

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---



**СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ  
IV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ, АСПИРАНТОВ И СТУДЕНТОВ**

**«ИЗОТОПЫ: ТЕХНОЛОГИИ,  
МАТЕРИАЛЫ И ПРИМЕНЕНИЕ»**

**30 октября - 3 ноября 2017 года**



**Физико-технический  
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Томск -2017**

**УДК 621.039.3(063)**

**ББК 35.364.лО**

**Изотопы: технологии, материалы и применение:**

Материалы IV Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (30 октября -3 ноября 2017 г.) Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Графика, 2017. – 86 с.

Сборник содержит материалы тезисов докладов, участвовавших в конференции, посвященной обобщению опыта исследований и разработок в области технологий получения изотопов, использования соединений заданного изотопного состава в различных отраслях народного хозяйства, а также технологий утилизации и хранения отходов изотопных производств. Материалы сборника представлены в авторской редакции и предназначены читателям, интересующимся тематикой представленных научных направлений.

**УДК 621.039.3(063)**

**ББК 35.364.лО**

**Мероприятие проводится при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований,  
грант № 17-38-10287 мол\_г**

© ФГАОУ ВО «Томский политехнический университет, 2017

## ПРИВЕТСТВИЕ УЧАСТНИКАМ КОНФЕРЕНЦИИ

В этом году кафедра «Техническая физика» Физико-технического института Томского политехнического университета, являющегося одним из ведущих центров подготовки специалистов для атомной промышленности, впервые проводит IV Международную конференцию молодых ученых, аспирантов и студентов «Изотопы: технологии, материалы и применение», посвященную проблемам получения различными методами изотопной продукции, диагностики и методов анализа веществ и примесей, создания моноизотопных и изотопномодифицированных материалов, расширения областей использования изотопов, глубокой очистки трудно разделяемых веществ, хранения и утилизации отходов изотопных производств.

Природа дала возможность человеку создать уникальный инструмент для разделения веществ по изотопному составу с высокой разделительной способностью и производительностью. Показана принципиальная возможность разделения изотопов почти всех элементов таблицы Менделеева. Однако путь практической реализации различных технологий разделения изотопов оказался непростым. Главной преградой на пути широкомасштабной практической реализации лазерных методов по-прежнему остается низкая эффективность генерации лазерного излучения. Это обстоятельство в определенной степени способствовало привлечению внимания конференции к другим перспективным методам селекции (например, к селективному ионно-циклотронному резонансному нагреву ионов), а также к «традиционным» методам: электромагнитному, центрифужному, методам ректификации и химического изотопного обмена и ряду других. Важным аспектом в этом плане является повышение энерго- и ресурсоэффективности технологий разделения изотопов и получения соединений с заданным изотопным составом.

Новым направлением является получение моноизотопных, изотопномодифицированных материалов и расширение области их использования. Так, например, в ядерной энергетике используются изотопически обогащенные поглотители нейтронов, интегрированные в топливо и размещаемые в активной зоне реактора для увеличения глубины выгорания топлива без ухудшения его термодинамических и механических свойств, что приводит к более высокой эффективности и безопасности работы реактора.

Развитие физики элементарных частиц, астрофизики, космологии,  $\gamma$  – резонансной спектроскопии требует производства ряда изотопически обогащенных элементов высокой чистоты.

Основной задачей проводимой конференции является обобщение опыта исследований и разработок в области технологий получения изотопов и

использования соединений заданного изотопного состава в различных отраслях народного хозяйства. Конференция призвана активизировать развитие науки и атомных производств страны, обеспечить интеграцию усилий работников вузов, НИИ и промышленных предприятий в решении наиболее актуальных проблем ядерной энергетики, укрепить связи образовательных учреждений с предприятиями отрасли, дать возможность публичного обсуждения информации о новых технологиях и научных направлениях, обеспечить продвижение научно-технических разработок в производство и повышение качества подготовки молодых специалистов.

Приглашаем Вас принять активное участие в нашей конференции. Искренне желаем всем участникам конференции интересных дискуссий и предложений, новых встреч и деловых контактов, успехов, научных достижений, счастья и благополучия!

**С уважением, президиум оргкомитета Долматов О.Ю.,  
Шаманин И.В.**

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

**Председатель: Байдали С.А.**, к.т.н., проректор ТПУ по научной работе и инновациям

### Члены программного комитета

**Пётр Панеч** - доктор наук, профессор, Институт прикладной радиационной химии Химический факультет Технологического университета г.Лодзь, Польша

**Милан Тихи** - доктор наук, профессор, кафедра физики поверхности и плазмы математико-физического факультета Карлова университета в г.Прага, Чехия

**Казарян М.А.** - д.ф.-м.н., профессор, академик НАН Республики Армения, ведущий научный сотрудник ФИАН

**Дуйсебаев Б.О.** - начальник Управления науки АО «НАК «КАЗАТОМПРОМ», Казахстан

**Плеханов В.Г.** - д.ф.-м.н., профессор Института физики АН Эстонии, Эстония

**Юхин Ю.М.** - д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Института химии твердого тела и механохимии СО РАН, Россия

**Скорынин Г.М.** - к.т.н., советник генерального директора ОАО "ПО ЭХЗ" по науке, Россия

**Ильин С.А.** - директор Завода разделения изотопов ОАО «Сибирский химический комбинат», Россия

**Власов В.А.** - д.ф.-м.н., профессор, член Международной Академии наук высшей школы и Международной Академии авторов научных изобретений и открытий, ректор ФГБОУ ВПО ТГАСУ, профессор ТПУ, Россия

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ**

**Председатель:** Долматов О.Ю., директор Физико-технического института ТПУ

**Секретарь оргкомитета:** Сукотнова В.В.

### **Члены организационного комитета**

**Шаманин И.В.**, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой ТФ ФТИ

**Орлов А.А.**, д.т.н., профессор кафедры ТФ ФТИ

**Мышкин В.Ф.**, д.ф.-м.н., профессор кафедры ТФ ФТИ

**Вергун А.П.**, д.ф.-м.н., профессор кафедры ТФ ФТИ

**Бутов В.Г.**, д.ф.-м.н., профессор кафедры ТФ ФТИ

**Видяев Д.Г.**, д.т.н., доцент кафедры ТФ ФТИ

**Каренгин А.Г.**, к.ф.-м.н., доцент кафедры ТФ ФТИ

**Тимченко С.Н.**, к.т.н., ст. преподаватель кафедры ТФ ФТИ

**Побережников А.Д.**, старший преподаватель кафедры ТФ ФТИ

**Новоселов И.Ю.**, ассистент кафедры ТФ ФТИ

**Ушаков И.А.**, инженер кафедры ТФ ФТИ

## СОДЕРЖАНИЕ

### Пленарное заседание

СКОРЫНИН Г.М.

Эволюция и графическая интерпретация понятий потенциала и работы  
разделения изотопов

MILAN TICHY,

Особенности плазменного формирования функциональных пленок на  
поверхности

КАЗАРЯН М.А.

Лазерные методы разделения стабильных изотопов

ДУЙСЕБАЕВ Б.О.

Экономичные методы и технологии обогащения урана

Крутых В. Н.

Тенденции развития рынка изотопных материалов в России и мире

Плеханов В.Г.

Изотопный состав и свойства материалов

Шаманин И.В.

Реакторное производство радиоизотопов в ТПУ

### **Секция 1. СЕЛЕКЦИЯ ВЕЩЕСТВ КИНЕТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ (ЦЕНТРИФУГИ, ГАЗОВАЯ ДИФФУЗИЯ)**

УШАКОВ А.А., СОВАЧ В.П., ОРЛОВ А.А.

Математическое моделирование процесса заполнения каскада  
газовых центрифуг для разделения изотопов никеля при различной  
величине потока питания .....14

КОТЕЛЬНИКОВА А.А., ЦИМБАЛЮК А.Ф., МАЛЮГИН Р.В., А.А.

ОРЛОВ

Влияние отношения высоты к радиусу емкости на динамику ее  
заполнения десублимированным  $UF_6$ .....15

БОЛГОВ С.Ю., ТИМЧЕНКО С.Н., УШАКОВ И.А., СИДОРЕНКО В.С.

Модернизация компьютерного тренажера  
разделительного производства.....16

ЛЕОНТЬЕВА Д.А., ЦИМБАЛЮК А.Ф., МАЛЮГИН Р.В., А.А. ОРЛОВ

Влияние диаметра центрального отверстия горизонтальных ребер  
емкости объемом  $0,06 \text{ м}^3$  на ее среднюю производительность .....17

СКОРЫНИН Г.М., УШАКОВ А.А.

Эволюция и графическая интерпретация понятий  
потенциала и работы разделения изотопов.....18

БОЛГОВ С.Ю., НЕКЛЮДОВ А.А., УШАКОВ И.А. Использование взвешенных графов для расчета параметров разделительного каскада.....	19
SMIRNOV A.YU., YAN J., BONAREV A.K. Obtainment of isotopically-substituted molybdenum in cascades of centrifuges.....	20

**Секция 2. СЕЛЕКЦИЯ ВЕЩЕСТВ ОПТИЧЕСКИМИ,  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ, ИЦР, ЛАЗЕРНЫМИ И  
ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ. ДИАГНОСТИКА И МЕТОДЫ  
АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И ПРИМЕСЕЙ**

ГАМОВ Д.Л., ХОРОХОРИН Д.М., РОЗДОЛЬСКИЙ В.Г., ШИКЕРУН К.Т. Исследование процесса десублимации углерода в низкотемпературной плазме, находящейся в магнитном поле.....	22
МАКАРЕВИЧ С.В., ГРИГОРЬЕВ А.С., ГАМОВ Д.Л., РОЗДОЛЬСКИЙ В.Г., ЗАГУЗИН И.Ю. Исследование распределения концентрации изотопов $^{35}\text{Cl}/^{37}\text{Cl}$ по объему кристаллов NaCl, выращенных из водного раствора в магнитном поле.....	23
ИЖОЙКИН Д.А., ГРИГОРЬЕВ А.С., ГАМОВ Д.Л., ЛЕОНТЬЕВА Д.А. Многоволновая диагностика нанодисперсных частиц, образующихся при плазмохимических процессах, протекающих в магнитном поле....	24
ЕРЕМЕЕВ Р.С., СОСНОВСКИЙ С.А., РОЗДОЛЬСКИЙ В.Г. Исследование плазменных процессов в электрической искре, помещенной в магнитное поле .....	25
ГАМОВ Д.Л., ЕРЕМЕЕВ Р.С. Разработка метода обработки данных лазерного зондирования гетерогенных систем.....	26
ИЖОЙКИН Д.А., ГАМОВ Д.Л. Плазменные и селективные по изотопам процессы в потоке ВЧ-плазмы, находящейся во внешнем магнитном поле.....	27
VORONINA T.V., TUGUSHEVA D.YU. Development of methodologies for isotope analysis of heavy water coolant at the PIK reactor .....	28
СОПЫРЯЕВ В.В., ЛУЦЕНКО Ю.Ю. Определение тепловых потерь в конструктивных элементах плазмохимического реактора для разделения изотопов углерода.....	30
БЕСПАЛА Ю.Р. Исследование процесса термообработки облученного ядерного графита в кислородной среде.....	31



### **Секция 3. ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ И ХРАНЕНИЯ ОТХОДОВ ИЗОТОПНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

КАБАНОВ Д.В., НЕСТЕРОВА Ю.В. Опыт аттестации международных стандартных образцов химического состава биологического происхождения.....	33
ROMANOV B. S., KOSTROMIN V. V., BEDENKO S. V., MUKHNUROV I. A., ROMÁN MATÍAS R. Research of dielectric properties dependence of new electrical insulating materials on radiation exposure.....	34
ТУНДЕШЕВ Н.В., КУЛИЕВ Р.У., КАРЕНГИН А.Г. Моделирование и исследование процесса плазменной конверсии обедненного по изотопу уран-235 гексафторида урана в диоксид урана.....	35
ПАВЛЕНКО А.П., КАРЕНГИН А.А. Интенсификация тепломассообменных процессов при плазменной обработке диспергированных жидких радиоактивных отходов.....	36
МЕНДОСА О. Определение теплофизических свойств дисперсионного ядерного топлива с использованием различных моделей.....	37
КАРЕНГИН А.А. Комплексная плазменная обработка отходов водоочистки.....	38
СЕЛИХОВА Е.А. Методы получения и применение нанодисперсных порошков в медицине.....	39
БАБАЕВ Р.Г. Моделирование процесса плазменного получения гомогенных оксидных уран плутониевых композиций.....	40
КУЗЕРО В.Б., НОВОСЕЛОВ И.Ю. Проблемы хранения отработавшего ядерного топлива и обращения с отходами его переработки.....	41
НИКИШКИН И.Ю. Плазменная обработка аммиачно-хлоридных маточных растворов.....	42
АЛЮКОВ Е.С. Синтез нанодисперсных порошков оксидов иттрия и циркония из диспергированных водно-солеорганических композиций в воздушной плазме.....	43
БЕСПАЛА Е.В., НОВОСЕЛОВ И.Ю., ПАВЛЮК А.О., КОТЛЯРЕВСКИЙ С.Г., МУДАРИСОВ О.В. Об особенностях термической дезактивации облученного графита	

в кислородсодержащей среде.....	44
БЕСПАЛА Е.В., МЫШКИН В.Ф., ПАВЛЮК А.О., МАКАРЕВИЧ С.В., МУДАРИСОВ О.В.	
Расчет газодинамики плазменного потока для неполного окисления углерода в низкотемпературной плазме.....	45
GRIGORYEV A.S., CHUBREEV D.O.	
Search for ceramic material for immobilization of radioactive wastes.....	46
ГРИГОРЬЕВ А.С., ЧУБРЕЕВ Д.О., АНТОНЕНКО М.В.	
Поиск керамического материала для утилизации радиоактивных отходов .....	47
КОТЕЛЬНИКОВА А.А.	
Плазмохимический синтез и определение теплофизических параметров металл-оксидных композиций «Mo-UO <sub>2</sub> ».....	48
SHAMANIN I. V., BEDENKO S. V., KNYSHEV V. V., UKRAINETS O. A., ZOR'KIN A. I.	
Isotopic composition and radiation characteristics of the 4th generation reactor spent fuel.....	49

**Секция 4. ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОТОПОВ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ, ПРИКЛАДНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И МЕДИЦИНЕ. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОТОПНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

МАКАРЕВИЧ С.В., ГРИГОРЬЕВ А.С., ЗАГУЗИН И.Ю., ЮРЬЕВ П.А.	
Исследование кристаллизации NaCl из водного раствора, находящегося в магнитном поле.....	51
ХОРОХОРИН Д.М., ЗАГУЗИН И.Ю., ЮРЬЕВ П.А., ЛЕОНТЬЕВА Д.А.	
Особенности формирования изотопных кластеров в твердом теле и их влияние свойства материалов.....	52
ЕГОРОВ Н.Б., ЗАЙЦЕВА А.С.	
Определение параметров плавления стабильных изотопов селена.....	53
КАБАНОВ Д.В., МЕРКУЛОВ В.Г.	
Определение природных и техногенных радионуклидов в бальнеологических объектах.....	54
ЕМЕЦ Е.Г., ГОЛОВАЦКИЙ А.В., ХУДОЛЕЕВ П.Н.	
Формирование нейтронного поля для проведения радиационных исследований полупроводниковых приборов.....	55
РОДИОНОВ А.В., ВЕРХОРУБОВ Д.Л.	
Моделирование противоточного процесса движения фаз в насадочной колонне для системы «жидкость-жидкость».....	56
БОРЕЦКИЙ Е.А., ВЕРХОРУБОВ Д.Л., САВОСТИКОВ Д.В.	

Перспективы использования соединений черных металлов в качестве вспомогательных веществ для таблетирования технического углерода.....	57
РОДИОНОВ А.В., ВИДЯЕВ Д.Г., ЛЕМЯКИН А.Э. Особенности определения коэффициентов разделения щелочных металлов и их изотопов в галламно-обменных системах.....	58
ТЮДЕЛЕКОВ Е.А., ВИДЯЕВА Н.Н., РОДИОНОВ А.В. Сравнительный анализ основных параметров нейтрон-захватной терапии при использовании соединений лития, бора и гадолиния.....	59
КУЦЕНКО Б.Д., АНТИПИН В.А. Применение радиоактивного изотопа $Cu^{64}$ в позитронной спектроскопии.....	60
ВАРЛАМОВ И.А., КАЛИНОВСКИЙ Ю.А. Моделирование изотопно-модифицированных наноуглеродных структур.....	61
КОЗНАКНМЕТ В.К. Improvement of neutron-physical characteristics of fast reactor by using 208PB reflector.....	62
СЫРТАНОВ М.С. Особенности процессов насыщения металлов изотопами водорода при облучении электронами.....	63
РЫЧКОВ Ю.В., КАРПУНИН С.М., ФЕДОРЕНКОВ С.В., ШЕСТАКОВ Р.Г. Изготовление слоев изотопически чистых актиноидных элементов на различных подложках методом ионной имплантации.....	64
ШАЙМЕРДЕНОВ А.А., КОЛТОЧНИК С.Н., ШАМАНИН И.В. Определение энерговыделения в самой энергонапряженной ТВС ВВР-КН С НОУ топливом.....	65
ШАМАНИН И.В., БЕДЕНКО С.В., КНЫШЕВ В.В. Напряжения в покрытие микротоплива.....	66

### **Секция 5. СЕЛЕКЦИЯ И ГЛУБОКАЯ ОЧИСТКА ТРУДНО РАЗДЕЛЯЕМЫХ ВЕЩЕСТВ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

АКИМОВ Д.В., ЕГОРОВ Н.Б. Возможности процесса зонной перекристаллизации при изменении изотопного состава солей и металлов.....	68
БАЛАШКОВ В.С., ВЕРГУН А.П., БЕЛЯКОВ Д.М. Разработка, оптимизация процессов разделения изотопов в противоточных колоннах с движущейся фазой ионита.....	69
КАБАК В.Ю., БАЛАШКОВ В.С., ВЕРГУНА П.	

Исследование электроионитного процесса обращения потоков фаз при разделении изотопов в обменных колоннах.....	70
БЕЛЯКОВ Д.М., КАБАК В.Ю., ВЕРГУН А.П.	
Моделирование процессов разделения изотопов в электроионитных и обменных системах.....	71
КОПЦЕВ М.О., ЧИНЗОРИГ С., ГОЛОВКОВ В.М.	
Особенности формирования пор в пленках ПЭТФ при облучении высокоэнергетическими частицами.....	72
СОХОРЕВА В.В., ДЮСЕМБЕКОВА А.А., ГОЛОВКОВ В.М.	
Исследование характеристик и структуры радиационно-привитых пленок ПВДФ облученных ионами водорода и гелия.....	73
НГУЕН АНЬ КУАН, ДОРОФЕЕВА Л.И.	
Моделирование сорбционных процессов на твердофазных ионообменниках.....	74
ОРЕХОВ Д.В., ДОРОФЕЕВА Л.И.	
Изучение возможности безопасного включения радиоактивных иловых отложений в керамическую матрицу.....	75
УШАКОВ И.А., ВАВИЛОВ А.Д., ГОЛОВКОВ Н.И.	
Разделение катионов магния и стронция под действием внешнего периодического электрического поля.....	76
ГОЛОВКОВ Н.И., УШАКОВ И.А., ТИМЧЕНКО С.Н.	
Изучение возможности разделение изомеров органических кислот в внешнем периодическом электрическом поле.....	77
УШАКОВ И.А., БУТОВ В.Г., ШАМАНИН И.В.	
Одномерный расчет траектории движения двухвалентных сольватированных ионов под действием внешнего периодического электрического поля.....	78
ДОРОФЕЕВА Л.И., ОРЕХОВ Д.В.	
Моделирование электроионитных процессов регенерации отработанных технологических растворов.....	79
ВЫДЫШ А.А., БЕЖИН Н.А.	
Влияние разбавителя краун-эфира на извлечение золота(III) из солянокислых растворов сорбентами на основе БЕНЗО-15-КРАУН-5.....	80
KARELIN V.A., STRASHKO A.N., SAZONOV A.V., KARELINA N.V.	
Titanium powder segregation out of cathode deposit of titanium electrolyzers.....	81
ШЕСТАКОВА Л.А., ЕФРЕМОВ И.Г.	
Плазменная утилизация органических отходов после переработки отработавшего ядерного топлива.....	82

*Секция 1*

**СЕЛЕКЦИЯ ВЕЩЕСТВ КИНЕТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ  
(ЦЕНТРИФУГИ, ГАЗОВАЯ ДИФФУЗИЯ)**

*Председатель: д.т.н., профессор А.А. Орлов*

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ КАСКАДА ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ НИКЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ВЕЛИЧИНЕ ПОТОКА ПИТАНИЯ

Ушаков А.А., Совач В.П., Орлов А.А.

Научный руководитель: Орлов А.А., д.т.н., профессор

АО «ПО «Электрохимический завод»,

663690, Россия, г. Зеленогорск Красноярского края, ул. Первая промышленная, 1

E-mail: ushakovaa2015@sibmail.com

При эксплуатации каскада газовых центрифуг (ГЦ) для разделения многокомпонентных изотопных смесей (МИС) возникают нестационарные гидравлические и разделительные процессы, в ходе которых необходимо обеспечить безопасную эксплуатацию оборудования и свести к минимуму потери работы разделения. В связи с этим приобрело актуальность решение задачи изучения нестационарных процессов при разделении МИС. Известные математические модели [1, 2] описывают нестационарные гидравлические процессы для случая длинного каскада и нестационарные разделительные процессы при постоянных гидравлических параметрах. Указанные недостатки устранены в модели [3, 4]. Режиму разделения изотопов в каскаде ГЦ предшествует процесс его заполнения рабочим веществом. До настоящего времени моделирование и изучение этого процесса ни кем не проводилось.

В данной статье проведены результаты исследований процесса заполнения каскада при различной величине потока питания для случая разделения изотопов никеля, которые используются в ядерно-физических исследованиях и для получения радиоактивных изотопов (например, изотоп  $^{62}\text{Ni}$  используется в качестве стартового материала для получения радиоактивного изотопа  $^{63}\text{Ni}$ ).

Установлено, что концентрации изотопов никеля в потоках лёгкой и тяжёлой фракции после заполнения каскада зависят от величины потока питания каскада. Увеличение потока питания каскада приводит к снижению максимальных значений концентраций изотопов и их перераспределению по каскаду. Это обусловлено интенсификацией процесса смешения изотопов, что происходит одновременно с процессом их разделения в ГЦ. Показано, что оптимизация величины потока питания при заполнении каскада позволяет повысить концентрацию целевого изотопа в потоке лёгкой или тяжёлой фракции после заполнения. Это уменьшит продолжительность дальнейшего установления стационарного распределения концентраций изотопов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин Д.М., Забелин Ю.П. Распространение динамических возмущений в каскаде для разделения изотопов. Сборник докладов XII Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул и в лазерных, плазменных и нанотехнологиях» (31 марта – 4 апреля 2008 г., Звенигород (Ершово)). Под ред. В.Е. Черковца. М., ЦНИИАтоминформ; г. Троицк, ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 2008. – 417 с.
2. Вецко В.М., Девдариани О.А., Левин Е.В., Сулаберидзе Г.А., Парцахишвили Г.Л. Моделирование переходных процессов в каскадных установках для разделения многокомпонентных изотопных смесей стабильных изотопов. *Isotopenpraxis*. 1982. 18 (8), 288-293.
3. Orlov A.A., Ushakov A.A., Sovach V.P. Mathematical model of nonstationary hydraulic processes in gas centrifuge cascade for separation of multicomponent isotope mixtures. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 92, 01033.
4. Orlov A.A., Ushakov A.A., Sovach V.P. Mathematical Model of Nonstationary Separation Processes Proceeding in the Cascade of Gas Centrifuges in the Process of Separation of Multicomponent Isotope Mixtures. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017. Vol 90, № 2, 258-265.

# ВЛИЯНИЕ ОТНОШЕНИЯ ВЫСОТЫ К РАДИУСУ ЕМКОСТИ НА ДИНАМИКУ ЕЕ ЗАПОЛНЕНИЯ ДЕСУБЛИМИРОВАННЫМ UF<sub>6</sub>

Котельникова А.А., Цимбалюк А.Ф., Мalyugin Р.В.

Научный руководитель: Орлов А.А., д.т.н., профессор

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

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

Данная работа посвящена исследованию влияния геометрии вертикальных погружных емкостей различного объема с гладкими внутренними стенками на динамику их заполнения десублимированным UF<sub>6</sub>. Задачей исследования являлось определение возможности увеличения производительности емкостей при изменении отношения их высоты и радиуса. Расчеты заполнения емкостей проводились с использованием двумерной математической модели нестационарного процесса десублимации UF<sub>6</sub> [1]. Для емкостей было введено ограничение по максимальной высоте 3,0 м, т.к. высота железнодорожных вагонов для их перевозки ограничена и минимальному радиусу 0,15 м для обеспечения возможности размещения на верхней крышке двух патрубков с клапанами (входного и отсосного). При этом не рассматривался вопрос устойчивости емкостей при их транспортировке.

Проведены расчеты динамики заполнения емкостей объемом 1,0; 2,0; 2,5; 3,0 и 4,0 м<sup>3</sup> десублимированным UF<sub>6</sub> на 70% их объема. Результаты представлены на рисунках 1 и 2. Крестом на графиках отмечены точки, соответствующие предельным значениям отношения высоты и радиуса ( $H/R$ ) емкостей.

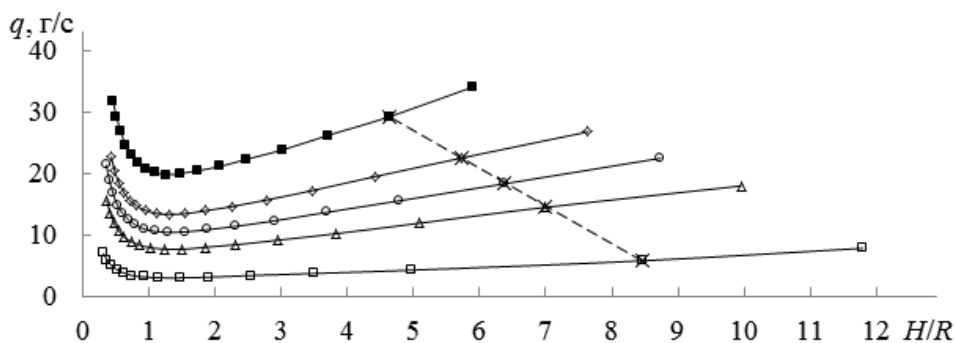


Рисунок 1. Зависимость средней производительности емкостей от отношения  $H/R$  □ —  $V=1,0$  м<sup>3</sup>; △ —  $V=2,0$  м<sup>3</sup>; ○ —  $V=2,5$  м<sup>3</sup>; ◇ —  $V=3,0$  м<sup>3</sup>; ■ —  $V=4,0$  м<sup>3</sup>

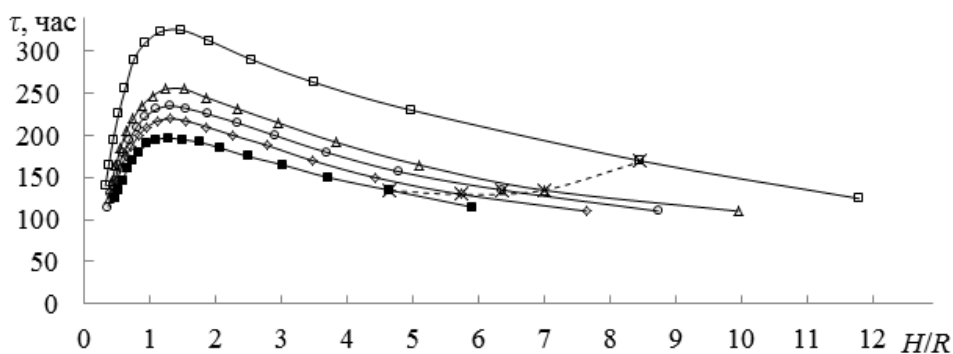


Рисунок 2. Зависимость времени заполнения емкостей от отношения  $H/R$  □ —  $V=1,0$  м<sup>3</sup>; △ —  $V=2,0$  м<sup>3</sup>; ○ —  $V=2,5$  м<sup>3</sup>; ◇ —  $V=3,0$  м<sup>3</sup>; ■ —  $V=4,0$  м<sup>3</sup>

Показано, что для каждой емкости имеется свое предельное значение отношения  $H/R$ , при котором их средняя производительность достигает «наибольшего» значения:  $1,0$  м<sup>3</sup> — 8,45;  $2,0$  м<sup>3</sup> — 6,99;  $2,5$  м<sup>3</sup> — 6,37;  $3,0$  м<sup>3</sup> — 5,74 и  $4,0$  м<sup>3</sup> — 4,64.

## 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 temperature, MATEC Web of Conferences. 72 (2016) 01079.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ТРЕНАЖЕРА РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Болгов С.Ю., Ушаков И.А.

Научный руководитель: Тимченко С.Н, к.т.н.

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

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

Современное высокотехнологичное производство характеризуется высокой степенью автоматизации производственных процессов. При этом большое значение имеет качество подготовки оперативного технологического персонала. В настоящее время существуют различные методики обучения, в частности одним из актуальных направлений подготовки кадров, является использование различного рода тренажеров.

Компьютерный тренинг предполагает:

- наличие высокоточных математических моделей широкого круга процессов, которые обладают ярко выраженной управленческой и технологической спецификой;
- воспроизведение работы системы управления ТП, включая базовое регулирование, систему блокировок и защит, расширенное регулирование и алгоритмы усовершенствованного управления;
- создание рабочего места инструктора, который осуществляет контроль и управление тренингом;
- наличие дидактической и методической базы компьютерного обучения, которая учитывает специфику процессов принятия решений, научения и переноса навыков операторами ТП [1].

На базе кафедры «Техническая физика» был разработан компьютерный тренажер ЗРИ «СХК»[2]. Тренажер максимально приближен к АКСУ-2, который внедрен на разделительных предприятиях отрасли. В нем моделируется управление технологическим процессом, реализовано управление основным и вспомогательным оборудованием, а также есть набор из 18 сценариев моделирующих работу технологического оборудования в аварийных ситуациях. Однако при применении данного тренажера в учебном процессе по специальности ядерная физика и технологии, возникает ряд сложностей. В первую очередь это связано с тем, что компьютерный тренажер разрабатывался для работы с профессионально подготовленным оператором, работающим на действующем производстве. По этой причине в компьютерном тренажере был реализован набор сценариев, направленных на отработку действий оперативного персонала во время возникновения нештатных (аварийных) ситуаций. В тоже время сценарии отработки действий оперативного персонала при производстве типовых (штатных) технологических операций в нем отсутствуют.

Для повышения базового уровня студентов была произведена модернизация компьютерного тренажера, адаптация его для обучения студентов по профильной специальности «Ядерная физика и технологии», путем добавления наборов сценариев реализующие типовые работы оперативного технологического персонала на языке программирования XML.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов: СИНТЕГ Москва – 2009.
2. A. A. Orlov, S. N. Timchenko, V. S. Sidorenko // Advanced Materials Research. 2015. Vol. 1084, P. 642-646.



# ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ЦЕНТРАЛЬНОГО ОТВЕРСТИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РЕБЕР ЕМКОСТИ ОБЪЕМОМ 0,06 М<sup>3</sup> НА ЕЕ СРЕДНЮЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

Леонтьева Д.А., Цимбалюк А.Ф., Малугин Р.В.

Научный руководитель: Орлов А.А., д.т.н., профессор

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

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

Работа посвящена исследованию влияния диаметра центрального отверстия горизонтальных ребер емкости объемом 0,06 м<sup>3</sup>, заполняемой десублимированным UF<sub>6</sub>, на ее среднюю производительность. Расчет средней производительности емкости проводился с использованием двумерной математической модели нестационарного процесса десублимации UF<sub>6</sub> [1].

Полученные зависимости средней производительности емкости и степени ее заполнения от диаметра центрального отверстия ребер представлены на рисунке 1. Участки кривых, на которых происходит «перемерзание» центральных отверстий на верхних ребрах емкости, отмечены точками с черной заливкой.

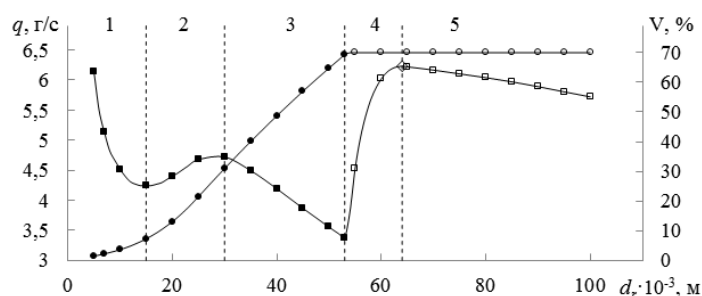


Рисунок 1. Зависимости средней производительности (□) и степени заполнения (○) емкости объемом 0,06 м<sup>3</sup> от диаметра центрального отверстия горизонтальных ребер

Расчетная кривая имеет несколько перегибов. В связи с этим на ней выделено 5 участков.

На участке 1 диаметр центрального отверстия в ребрах емкости существенно меньше диаметра отверстия входного патрубка. Большая часть входящего в емкость потока газообразного UF<sub>6</sub> попадает на поверхность верхнего ребра и десублимируется в объеме между ним и верхней стенкой емкости, вызывая «перемерзание» его центрального отверстия. Увеличение диаметра центрального отверстия ребер (участок 2) позволяет большему количеству газообразного UF<sub>6</sub> поступать в нижнюю часть емкости. Увеличивается поверхность теплообмена емкости, степень ее заполнения десублимированным UF<sub>6</sub> и средняя производительность, но это не позволяет избежать «перемерзания» центральных отверстий верхних ребер. На участке 3 диаметр центрального отверстия в ребрах становится больше диаметра отверстия входного патрубка. Газообразный UF<sub>6</sub> свободно поступает в нижнюю часть емкости. Увеличивается степень заполнения емкости и время ее заполнения, но улучшения условий газодинамического течения UF<sub>6</sub> и теплообмена в емкости недостаточно, т.к. «перемерзание» верхних ребер не позволяет заполнить емкость десублимированным UF<sub>6</sub> до заданной степени. На участке 4 достигается требуемая степень заполнения емкости и наблюдается максимальное значение средней производительности емкости 6,23 г/с (точка отмечена ромбом на кривой). Дальнейшее увеличение диаметра центрального отверстия ребер, по сравнению с диаметром входного отверстия, приводит к уменьшению их теплообменной поверхности. На участке 5 происходит практически линейное уменьшение средней производительности емкости.

Таким образом, показано, что диаметр центрального отверстия ребер оказывает существенное влияние на эффективность процесса десублимации UF<sub>6</sub> в емкостях с горизонтальным оребрением.

## 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 temperature, MATEC Web of Conferences. 72 (2016) 01079.

## ЭВОЛЮЦИЯ И ГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОНЯТИЙ ПОТЕНЦИАЛА И РАБОТЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ

Скорынин Г.М., Ушаков А.А.

АО «ПО «Электрохимический завод», 663690, Россия, Красноярский край,  
г. Зеленогорск, ул. Первая Промышленная, дом 1

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

Понятия идеального каскада, функции ценности (потенциала разделения) и работы разделения изотопов были обобщены и опубликованы Карлом Коэном в 1951 году. Первоисточники, которые использовал Коэн, представляли закрытые отчеты Поля Дирака, Клауса Фукса и Рудольфа Пайерлса, выполненные в рамках Манхэттенского проекта. Были развиты четыре различных подхода к определению потенциала разделения. Все они привели к одной и той же функции  $V$ , зависящей от концентрации  $C$  одного из компонентов бинарной смеси:

$$V(C) = (2C - 1) \cdot \ln \left( \frac{C}{1 - C} \right).$$

Оригинальные первоисточники стали доступными только в 1990-е годы во многом благодаря усилиям физика Ричарда Далитца, редактора сборников избранных трудов Дирака и Пайерлса. За полвека до рассекречивания основные положения теории разделения изотопов «обросли» рядом мифов и подверглись некоторому «препарированию». Попытка В. Буланга с сотрудниками в 1960 году расширить понятия теории на произвольные коэффициенты разделения не привела к логически стройным результатам. При постоянной разделительной мощности разделительных элементов функция ценности оказалась зависимой от коэффициентов разделения. Это сделало невозможным ее использование для сравнения каскадов, выполняющих одинаковые процессы разделения.

Начиная с середины 1960-х годов было предложено около десятка потенциалов разделения для многокомпонентных изотопных смесей. Однако, в отличие от бинарных смесей, ни один из них не обеспечивает независимость разделительной мощности разделительного элемента от изотопного состава в потоке питания. Поэтому в практических расчетах каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей потенциалы разделения не нашли применения.

В данной работе предложено новое толкование понятий теории разделения для бинарной смеси изотопов и разделительной способности каскадов из элементов с произвольными коэффициентами разделения. За основу для сравнения принимается идеальный каскад из элементов с бесконечно малыми коэффициентами разделения. Приводится графическая интерпретация работы разделительных ступеней с произвольными коэффициентами разделения в идеальном и реальных каскадах.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ ГРАФОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

Болгов С.Ю., Неклюдов А.А., Ушаков И.А.

Научный руководитель: Тимченко С.Н, к.т.н.

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

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

Современное производство изотопной продукции применяет сложные многокаскадные технологические схемы, которые состоят из нескольких разделительных каскадов соединённых между собой линиями межкаскадных коммуникаций. Каждый каскад содержит несколько разделительных ступеней соединённых определенным образом межступенными потоками. Таким образом, современное разделительное производство, в, представляет собой набор разделительных ступеней соединённых между собой межступенными и межкаскадными коммуникациями произвольным образом [1].

К настоящему времени теория и практические методы расчетов каскадов, предназначенных для разделения бинарных и многокомпонентных смесей изотопов, достаточно хорошо разработаны. Однако, в процессе эксплуатации возможны ситуации, когда часть оборудования выводится из работы, в этой ситуации происходит перенаправление межступенных потоков, при котором соответствующие потоки передаются в следующие работающие ступени, минуя исключенное из работы оборудование. В этом случае, классические методы расчета каскада требуют внесения значительных изменений не только в начальные данные, но и в сам алгоритм расчета [2]. По этой причине, быстрый расчет параметров становится затруднителен, так как требует не только определенного времени на внесение необходимых изменений в процедуру расчета, но и определенной квалификации от пользователя данной программы.

Решить данную проблему можно путем совместного использования классических методов расчета каскада с теорией графов [3].

Таким образом, цель данной работы заключается в разработке универсальной методики расчета разделительного каскада с использованием теории графов. И реализации созданной методики в виде компьютерной программы.

На основе классических методов расчета и теории графов была разработана методика расчета сложных технологических схем. На основе полученной методики разработан алгоритм расчета, который был реализован в вид программы в среде разработки «Borland Delphi». С помощью разработанной программы были произведены расчеты технологических схем, состоящих из нескольких разделительных каскадов, соединённых произвольным образом.

Результаты расчетов хорошо согласуются с результатами других авторов. Предложенная методика позволяет осуществлять расчет технологической схемы произвольной структуры без внесения изменений непосредственно в алгоритм расчета, что делает данную методику интересной для использования на реальном разделительном производстве.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулаберидзе, Г.А. Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей: учеб. пособие / Г.А. Сулаберидзе, В.А. Палкин, В.Д. Борисевич, В.Д. Борман, А.В. Тихомиров. – М. : НИЯУМИФИ, 2011. - 368 с.
2. A. A. Orlov, S. N. Timchenko, V. S. Sidorenko Mathematical Model of Non-Stationary Hydraulic Processes Occurring in Gas Centrifuges for Uranium Enrichment // Advanced Materials Research. 2015. Vol. 1084, P. 673-677.
3. А. А. Неклюдов, В. Г. Бутов, С. Н. Тимченко Использование теории графов для расчета параметров разделительного каскада // Альтернативная энергетика и экология, 2015. №23. С. 40-44.

## **OBTAINMENT OF ISOTOPICALLY-SUBSTITUTED MOLYBDENUM IN CASCADES OF CENTRIFUGES**

Smimov A.Yu., Yan J., Bonarev A.K.

National Research Nuclear University "MEPhI", 115409, Russia, Moscow, Kashirskoye shosse, 31

E-mail: [a.y.smirnoff@rambler.ru](mailto:a.y.smirnoff@rambler.ru)

The possibility of using of isotopically-substituted molybdenum with an average capture cross-section of thermal neutrons at the zirconium level is considered. Such a material can become an alternative to zirconium alloys used for making fuel rods of most commercial power reactors, since its application can increase the safety of these plants.

Two methods of obtaining this material have been analyzed: a single cascade for enrichment of  $^{92}\text{Mo}$  and a double cascade in which isotopes  $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{98}\text{Mo}$ ,  $^{100}\text{Mo}$  are simultaneously concentrated. The indicated cascade schemes for obtaining a mixture of molybdenum isotopes with an average capture cross-section of thermal neutrons close to that of zirconium, greater and smaller, are compared. The efficiency of both cascade schemes was compared by the value of the total relative flow. It is shown that, depending on the value of the average capture cross-section of thermal neutrons, a double cascade and a single one can be preferable.

This research is carried out in the framework of the common Sino-Russian project "Separation of multicomponent isotope mixtures by the method of centrifugation for production of new functional materials for nuclear energy, fundamental research, and medicine" supported by the Russian Fund of Basic Research, grant № 16-58-53058 GFEN\_a and National Scientific Fund of China (NSFC), grant № 1151101155.

*Секция 2*

**СЕЛЕКЦИЯ ВЕЩЕСТВ ОПТИЧЕСКИМИ,  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ, ИЦР, ЛАЗЕРНЫМИ И  
ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ. ДИАГНОСТИКА И МЕТОДЫ  
АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И ПРИМЕСЕЙ**

*Председатель: д.ф.-м.н., профессор В.Ф. Мышкин*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕСУБЛИМАЦИИ УГЛЕРОДА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Гамов<sup>1</sup> Д.Л., Хорохорин<sup>1,2</sup> Д.М., Роздольский<sup>1</sup> В.Г., Шикерун<sup>1</sup> К.Т.

Научный руководитель: Мышкин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор

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

<sup>2</sup>ФЯО «Горно-химический комбинат», Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, 53

E-mail: gdl@tpu.ru

В атомной отрасли всех стран накоплено большое количество отработанного ядерного графита, требующего переработки. Это обуславливает актуальность изучения процессов, в которых участвует углерод, а также разработки технологий переработки углеродных материалов.

Газоразрядная плазма позволяет переводить в атомарное состояние и поддерживать в неравновесном состоянии все элементы. Неравновесное возбуждение атомов на заданных уровнях энергии реагентов позволяет увеличить эффективность плазмохимических реакций. Одним из воздействий, позволяющих увеличить степень неравновесности низкотемпературной плазмы, является постоянное магнитное поле. Использование синергетического эффекта от совмещения низкотемпературной плазмы и магнитного воздействия позволит в значительной мере увеличить эффективность целевого использования подводимой энергии в плазменных технологиях.

Атомарные пары, находящиеся в низкотемпературной плазме, при её охлаждении, начинают образовывать молекулы и дисперсные частицы. Скорость этих процессов зависит от спинового состояния образующейся пары валентных электронов сталкивающихся частиц (атом - атом, атом - дисперсная частица) [1]. Известны два основных метода диагностики плазменных систем: контактные и неконтактные. Преимущества неконтактных методов связаны с малыми искажениями протекающих в плазменных условиях процессов. Например, лазерные методы диагностики гетерогенной плазмы. Однако, лазерные методы приводят к решению обратной задачи, приводящей, при высокой экспериментальной погрешности, к увеличению погрешности получаемых данных.

Контактные методы не позволяют получать данные о гранулометрическом составе конденсированной фазы в процессе её формирования в плазменной системе. Эти методы также искажают функцию распределения дисперсных частиц по размерам, если отбирать конденсированную фазу из объема, в котором возможны химические превращения или фазовые переходы. Несомненным преимуществом методов определения гранулометрического состава путем отбора пробы на подложки является возможность анализа различными прямыми методами. При этом возможна достаточно высокая точность определения размеров дисперсных частиц.

В статье приводятся и анализируются результаты исследования влияния внешнего постоянного магнитного поля на процесс формирования частиц сажи при охлаждении низкотемпературной углеродной плазмы. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон. Низкотемпературная плазма возбуждалась с помощью дугового разряда, в котором в качестве одного из электродов использовали графит цилиндрической формы. В качестве материала второго электрода использовали медь, алюминий, сталь, цинк или графит. Постоянный ток дуги устанавливали в диапазоне 15-40 А. Образующиеся дисперсные частицы осаждали на стеклянные пластинки. В дальнейшем регистрировали SEM-изображения с помощью электронного микроскопа при разных увеличениях. Гранулометрический состав определяли путем ручного подсчета количества изображений частиц разных размеров на SEM-изображениях. Анализ полученных результатов показывает следующее. Образующееся без внешнего магнитного поля конденсированная фаза представлена частицами в широком диапазоне размеров. При этом, например, частицы размерами 80-190 нм, образующиеся в смеси меди в смеси с оксидом кремния, на подложке располагаются группами, окруженными частицами размерами менее 10 нм. Частицы размерами 80-190 нм, как правило, имеет сферическую форму.

В постоянном магнитном поле, задаваемом в диапазоне 10-90 мТл, распределение дисперсных частиц по размерам более стабильно во времени. При этом распределение по размерам имеет более узкий диапазон, чем без поля, а также регистрируются отдельные дисперсные частицы неправильной формы размером менее 500 нм.

Исследования финансировались в рамках гранта РФФИ №16-08-00246.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мышкин В.Ф., Тихи М., Хан В.А., Беспала Е.В., Ленский В.Н., Гамов Д.Л. Гетерогенная плазма дугового разряда в магнитном поле // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т.60. №7. С.17-25.

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ИЗОТОПОВ $^{35}\text{Cl}/^{37}\text{Cl}$ ПО ОБЪЕМУ КРИСТАЛЛОВ NaCl, ВЫРАЩЕННЫХ ИЗ ВОДНОГО РАСТВОРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Макаревич<sup>1</sup> С.В., Григорьев<sup>1,2</sup> А.С., Гамов<sup>1</sup> Д.Л., Роздольский<sup>1</sup> В.Г., Загузин<sup>1</sup> И.Ю.

Научный руководитель: Мышкин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор

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

<sup>2</sup>ФЯО «Горно-химический комбинат», Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, 53

E-mail: gos100@tpu.ru

Использование обогащенных по изотопам материалов, в некоторых случаях, может дать существенный технологический или экономический эффект. Высокая стоимость изотопной продукции препятствует расширению сферы применения изотопов. Это обуславливает актуальность установления и изучения ранее не известных изотопных эффектов. Результаты такого исследования показывают перспективы использования новых методов разделения изотопов.

Известно, что атомы более тяжелых изотопов имеют меньший диаметр, чем легких. Это обуславливает изменения параметра кристаллической решетки при изотопном замещении. Энергия связи тяжелых изотопов также больше. В твердых телах, содержащих смесь более чем двух изотопов, неизбежно формируются кластеры из изотопов - изотопное разупорядочение, которое может изменить фоновую теплопроводность, электрофизические и другие свойства.

Формирование изотопной сверхрешетки, упорядоченной по изотопам структуры, содержащей моноизотопные области, также приводит к значительному изменению некоторых свойств кристаллов. Такая слоистая структура, например, будет иметь пространственную анизотропию в величинах теплопроводности и электропроводности. Поэтому в работе ставилась задача изучения особенностей распределения по объему изотопов хлора при росте кристаллов NaCl из пересыщенного водного раствора во внешнем постоянном магнитном поле.

Натрий является моноизотопным элементом, хлор представлен двумя изотопами:  $^{35}\text{Cl}$  и  $^{37}\text{Cl}$  в соотношении 75,8 : 24,2. Ядра обоих изотопов хлора, а также натрия имеют спин 3/2. При кристаллизации NaCl из водного раствора формируются кубические кристаллы правильной формы. Это существенно упрощает интерпретацию получаемых результатов.

Для формирования из водных растворов слоев кристаллов NaCl, обогащенных по изотопам хлора, была использована экспериментальная установка, содержащая следующие узлы: стеклянная колба Бунзена; вакуумная вытяжная установка, позволяющая создавать давление в колбе 1 мм.рт.ст.; источник постоянного магнитного поля; вакуумметр. Использовались две колбы с раствором NaCl. Установлено, что скорость испарения воды увеличивается при создании над поверхностью раствора потока газа. Поэтому на обеих колбах использовались натекатели.

Для кристаллизации использовали предварительно отстоянный пересыщенный раствор соли. После заливки раствора в колбы Бунзена и соединения вакуумной системы откачивали воздух из обеих колб до давления 20 мм рт.ст. При таком давлении колбы выдерживали в течении 30 мин. Далее давление уменьшали до 1 мм рт.ст. на все время кристаллизации. Вокруг одной из кювет периодически создавали постоянное магнитное поле величиной 20-80 мТл в течении 30 мин. Магнитное воздействие повторяли через 30 мин кристаллизации без магнитного поля.

На дне обеих колб образовывались кристаллы правильной формы. Кристаллы также образовывались на стенках кюветы и на поверхности пересыщенного раствора. Через время, необходимое для испарения 10% растворителя, остаточный раствор сливали, а кристаллы промывали ацетоном и высушивали. Изучали кристаллы со дна, для которых регистрировали размеры, спектры комбинационного рассеяния и рентгеновской дифракции.

Установлено, что размеры кристаллов, образовавшихся на дне кюветы без магнитного поля превышают 1,5 мм. В магнитном поле образуется большое количество кристаллов размером более 50 мкм, а крупная фракция, наблюдаемая визуально, до 2 раз мельче, чем без поля. Такое отличие в размерах обусловлено увеличением скорости образования зародышей новой фазы в магнитном поле - вместо роста кристаллов происходит зарождение ядер кристаллизации.

Спектры комбинационного рассеяния показывают, что в магнитном поле изменяется активность акустических и оптических фоннных мод. Спектры рентгеновской дифракции показывают, что при некоторых величинах магнитного поля дифракционный максимум раздваивается. Это связано с наличием областей с разным изотопным составом.

В докладе подробно анализируются и обосновываются причины наблюдаемых результатов.

Исследования финансировались в рамках гранта РФФИ №16-08-00246.

# **МНОВОЛНОВАЯ ДИАГНОСТИКА НАНОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ, ПРОТЕКАЮЩИХ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Ижойкин<sup>1</sup> Д.А., Григорьев<sup>2,3</sup> А.С., Гамов<sup>3</sup> Д.Л., Леонтьева<sup>3</sup> Д.А.

Научный руководитель: Мышкин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор

<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, г.Томск, пл. Соляная, 2

<sup>2</sup>ФЯО «Горно-химический комбинат», Красноярский край, г.Железногорск, ул.Ленина, 53

<sup>3</sup>НИ Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: gos100@tpu.ru

Плазменные технологии находят широкое применение в различных областях: разделение изотопов, переработка порошков и растворов, утилизация отходов, очистка поверхности и формирование покрытий. Это обусловлено увеличением скоростей физико-химических процессов при высоких температурах. Для увеличения эффективности использования подводимой энергии используется неравновесное состояние низкотемпературной плазмы: целенаправленное возбуждение заданных электронных энергетических уровней, определяющих скорость целевого процесса. Это определяет актуальность дальнейшего изучения различных плазменных процессов в постоянном магнитном поле, позволяющем увеличить неравновесность.

При комнатных температурах энергия теплового движения атомов значительно больше энергии магнитного воздействия. Магнитное поле упорядочивает спиновую динамику в радикалов уменьшает количество взаимных угловых ориентаций спинов в радикальных парах. Поэтому постоянное магнитное поле может изменить скорость конденсации за счет влияния на динамику спиновых пар на поверхности конденсированной фазы.

Для изучения влияния внешнего постоянного магнитного поля на процесс формирования ядер конденсации и роста аэрозольных частиц изучали гранулометрический состав образующейся конденсированной фазы. Пары металла формировали за счет термического испарения цинка. Гранулометрический состав конденсированной фазы определения методом лазерного рассеяния.

Для испарения Zn использовали цилиндрическую ванну из немагнитной нержавеющей стали, помещаемой в цилиндрический нагреватель. Для предотвращения окисления Zn ванна обдувалась аргоном. Оптимизирована конструкция нагревателя для уменьшения до минимума взаимодействие с атмосферным воздухом и охлаждение высокотемпературного потока, содержащая ультрадисперсные частицы металлического цинка.

Гетерогенный поток на срезе нагревателя просвечивали с помощью пучка оптического излучения, в диапазоне длин волн 420-650 нм, формируемый из излучения светодиода с длинноволновой перестройкой. Интенсивность излучения, прошедшего гетерогенный поток, регистрировали с помощью спектрометра SL-140 параллельно на всех длинах волн.

Анализ полученных экспериментальных данных о спектральном ходе коэффициентов пропускания наночастиц цинка показывает следующее. На участке спектра 0,42 – 0,63 мкм графики имеют незначительное отклонение от линейной зависимости, с разным углом наклона к оси длин волн. Установлено, что без магнитного поля угол наклона графиков изменяется в более широком диапазоне, чем в постоянном магнитном поле 44 или 76 мТл.

Гранулометрический состав дисперсной фазы определяли путем обработки спектрального хода коэффициентов пропускания с помощью регулирующих алгоритмов решения интегрального уравнения Фредгольма. Из экспериментальных данных формировали несколько выборок коэффициентов ослабления. С каждой группой экспериментальных данных решалась обратная задача, с учетом решений других выборок. Добивались схождения решений для большей части обрабатываемых групп коэффициентов пропускания.

Из анализа гранулометрического состава конденсированных частиц Zn следует следующее. Модальный размер частиц конденсированной фазы, образующийся без магнитного поля, изменяется в диапазоне 150-190 нм. Полуширина распределения по размерам не превышает 20 нм. В магнитном поле 44 мТл модальный размер находится в диапазоне 160-170 нм, а в поле 76 мТл – 180-190 нм. Данные о частицах Zn размерами менее 140 нм не удается получать из данных коэффициентов пропускания оптического излучения в диапазоне 0,42-0,63 мкм. Это связано с тем, что влияние мелкой фракции частиц металлического Zn на спектральный ход коэффициентов пропускания значительно меньше, чем более крупной фракции.

В докладе подробно анализируются и обосновываются причины наблюдаемых результатов. Исследования финансировались в рамках гранта РФФИ №16-08-00246.



# ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИСКРЕ, ПОМЕЩЕННОЙ В МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Еремеев<sup>1,2</sup> Р.С., Сосновский<sup>3</sup> С.А., Роздольский<sup>1</sup> В.Г.

Научный руководитель: Мышкин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор

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

<sup>2</sup>ФЯО «Горно-химический комбинат», Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, 53

<sup>3</sup>Сибирский физико-технический институт ТГУ, г. Томск, пр. Ленина, 36

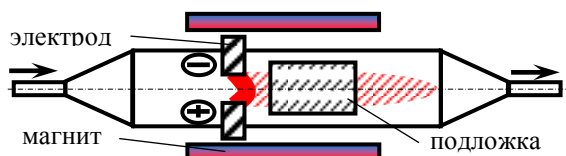
E-mail: gos100@tpu.ru

Плазменные процессы широко используются в различных технологиях: разделение изотопов, получение или переработка порошков, утилизация органических отходов, травление поверхности полупроводников, нанесение покрытий, генерация видимого излучения. Неравновесное состояние низкотемпературной плазмы при целенаправленном возбуждении заданных степеней свободы химически реагирующих систем приводит к увеличению скорости протекания целевого процесса. При этом также увеличивается эффективность использования подводимой электрической энергии. Магнитное поле позволяет дополнительно увеличить степень неравновесности низкотемпературной плазмы. Это обуславливает актуальность дальнейшего изучения различных плазменных процессов во внешнем постоянном магнитном поле.

Высоковольтная искра характеризуется малой длительностью существования, что обеспечивает высокую скорость закалки продуктов и сильную неравновесность плазменной системы. Эти особенности искрового разряда обуславливают его высокую эффективность при проведении плазмохимических процессов. Генерируемое искрой ультрафиолетовое излучение позволяет переводить в радикалы молекулярные компоненты плазмообразующей смеси. Это также способствует повышению эффективности проводимых плазмохимических процессов.

Для проведения исследований собрана экспериментальная установка, выполненная в виде герметичного цилиндра из кварцевого стекла (камера), в котором установлены два медных электрода. При диаметре цилиндра 5 см, расстояние между электродами составляло 1 см. Электроды подключались к высоковольтному накопительному конденсатору. Постоянные зарядной и разрядной цепей конденсатора подобраны так, что частота искровых разрядов составляет несколько килогерц. Энергия накопительного конденсатора в момент пробоя не превышала 0,3 Дж.

Для формирования магнитного поля использовались два постоянных магнита с остаточной намагниченностью 1,05 Тл, устанавливаемых за пределами камеры. Величину магнитного поля задавали путём изменения расстояния между магнитами. Магнитное поле способствовало формированию искры по кратчайшей прямой между электродами.



Через камеру продували смесь аргона и кислорода. В цилиндр, на заданном расстоянии от электродов, устанавливается кварцевая подложка для улавливания дисперсных частиц. Для этого коническая часть со стороны выхода газов выполнена съемной. Перпендикулярно цилиндру, в области искрового промежутка, предусмотрен штуцер, на конце которого через тefлоновое уплотнение установлена собирающая короткофокусная линза. Линза позволяет собирать и передавать на малогабаритный спектрограф, синхронизируемый во времени с электрической искрой, поток излучения плазменного канала.

Для диагностики параметров протекающих процессов использовались оптическая спектроскопия, масс-спектрометрия и электронная микроскопия. Получаемые результаты показывают следующее: не обнаружены существенные изменения спектра свечения искры при увеличении величины магнитного поля. В магнитном поле ускоряются процессы окисления паров меди в газовой фазе, при этом на подложке улавливается больше дисперсных частиц, имеющих меньший размер. С увеличением величины магнитного поля размер дисперсных частиц несколько уменьшается. Авторы предполагают, что магнитное поле обуславливает увеличение частоты образования ядер конденсации атомарных паров материала электродов. В докладе приводятся результаты численного моделирования и количественный анализ протекающих процессов.

Исследования финансировались в рамках гранта РФФИ №16-08-00246.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ

Гамов<sup>1</sup> Д.Л., Еремеев<sup>1,2</sup> Р.С.

Научный руководитель: Хан В.А., д.т.н.

<sup>1</sup>НИ Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
<sup>2</sup>ФЯО «Горно-химический комбинат», Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, 53  
E-mail: gdl@tpu.ru

Аэрозольные системы могут возникать в природных и технологических процессах. Появление конденсированной фазы может оказать существенное влияние на процессы химических превращений, теплообмена внутри системы и с окружающей средой, электрофизических явлений в низкотемпературной плазме, процессы разделения изотопов в газовой среде. Поэтому разработка новых методов диагностики параметров гетерогенных систем имеют несомненную актуальность.

Известны два основных метода диагностики гетерогенных систем: контактные и дистанционные. Несомненным преимуществом методов определения гранулометрического состава путем отбора пробы на подложки является возможность определения гранулометрического состава различными прямыми методами. При этом возможна достаточно высокая точность определения размеров дисперсных частиц. Однако, контактные методы не позволяют получать данные о гранулометрическом составе конденсированной фазы в процессе её формирования в плазменной системе. Эти методы также искажают функцию распределения дисперсных частиц по размерам при отборе конденсированной фазы из объема, в котором возможны химические превращения или фазовые переходы. Гранулометрический состав также может искажаться в результате коагуляции дисперсных частиц на поверхности подложки.

Преимущества лазерных методов связаны с малыми искажениями процессов, например, протекающих в плазменных условиях. Лазерные методы приводят к решению обратной задачи, математические подходы к которой хорошо разработаны и описаны в литературе. Обратные методы приводят, при невысокой экспериментальной точности, к значительному увеличению погрешности получаемых данных.

При лазерной диагностике ультрадисперсных частиц используется метод спектральной прозрачности, в котором гранулометрический состав определяют по искажению спектрального состава излучения, прошедшего гетерогенный поток. Современная спектральная аппаратура позволяет регистрировать неограниченный объем информации во времени и в широком диапазоне спектра. Широко доступны направленные источники оптического излучения широкого спектра: волоконные лазеры, светодиоды. Однако, небольшое увеличение объема обрабатываемых экспериментальных данных приводит к значительному увеличению времени расчета.

Поэтому нами разрабатывается подход, основанный на формировании нескольких пересекающихся выборок из полного набора экспериментальных данных и решении, с этими группами данных, обратной задачи по известным алгоритмам. Для этого экспериментально регистрировали спектры пропускания аэрозолей, содержащих ультрадисперсные частицы. Размеры частиц были определены предварительно с помощью SEM-изображений. Формировали до 10 групп по 7 значениям спектральных коэффициентов пропускания. При этом в каждую группу входило значение коэффициента пропускания в максимуме спектрального хода этих коэффициентов. Эти группы последовательно обрабатывали с учетом остальных решений. Сравнение значений модальных радиусов полученных решений показывает, что модальные радиусы 65% результатов расчетов объединяются в компактно расположенную группу. Установлено, что максимум кривой распределения по размерам, определенный из SEM-изображений, находится в диапазоне размеров, в которой группируются модальные размеры.

В докладе приводятся и анализируются результаты исследования влияния внешнего постоянного магнитного поля на процесс формирования частиц сажи при охлаждении низкотемпературной углеродной плазмы. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон. Низкотемпературная плазма возбуждалась с помощью дугового разряда, в котором в качестве одного из электродов использовали графит цилиндрической формы.

Анализ полученных результатов показывает следующее. Образующееся без внешнего магнитного поля конденсированная фаза представлена частицами в широком диапазоне размеров. При этом гранулометрический состав конденсированной фазы нестабилен во времени. В постоянном магнитном поле 10-90 мТл распределение дисперсных частиц по размерам более стабильно во времени и имеет более узкий диапазон размеров, чем без поля.

Исследования финансировались в рамках гранта РФФИ №16-08-00246.

# ПЛАЗМЕННЫЕ И СЕЛЕКТИВНЫЕ ПО ИЗОТОПАМ ПРОЦЕССЫ В ПОТОКЕ ВЧ-ПЛАЗМЫ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Ижойкин<sup>1</sup> Д.А., Гамов<sup>2</sup> Д.Л.

Научный руководитель: Мышкин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор

<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, пл. Соляная, 2

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

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

В низкотемпературной плазме все вещества переводятся в газовую фазу, а доля ионов не превышает 1%. Поэтому низкотемпературная плазма в основном состоит из радикалов – частиц, имеющих не спаренный спин. Известно, что химическая реакция между двумя радикалами в жидкости, находящейся в магнитном поле, селективна по изотопам из-за сохранения суммарного спина при формировании молекулы. Цель исследования – установление и исследование изотопного эффекта в газофазной радикальной реакции, протекающей в магнитном поле.

Плазмохимический стенд для проведения экспериментальных исследований содержал высокочастотный (ВЧ) генератор с частотой 27,12 МГц и мощностью 4 кВт. ВЧФ разряд формировали в кварцевой трубе с внутренним диаметром 4 см и длиной 100 см. Температура внутренней стенки реактора не превышала 700°C. Поэтому пары остаточного углерода из диффузной оболочки разряда конденсировались на стенках в виде сажи. Плазмообразующую смесь в реактор подавали тангенциально ниже электрода при расходе: Ar – 5-10 л/мин, O<sub>2</sub> – 5-10 мл/мин. Магнитное поле формировали с помощью двух постоянных магнитов.

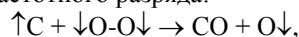
Графитовый электрод, с которого формируется поток низкотемпературной плазмы, разогревался и испарялся. В плазменном потоке концентрацию окислителя выдерживали в меньшем количестве, чем необходимо для полного окисления углерода. Из-за низкой концентрации углерода в плазмообразующей смеси количество образовавшегося СО не превышало 0,05% по объему. Для концентрирования СО использовалась азотная ловушка, в которую монооксид поступал после предварительного окисления до СО<sub>2</sub>.

Изотопный анализ проводили на масс-спектрометре ЭМГ 20-09, имеющем разрешение 400. Установлено, что в плазменных процессах, протекающих при атмосферном давлении, концентрация изотопа <sup>13</sup>С в продуктах реакции зависит от величины магнитного поля, расстояния между началом плазменного канала и областью приложения магнитного поля.

Между угловой координатой Δφ и полным моментом импульса ΔJ частицы, операторы которых не коммутируют, при малой угловой неопределенности, можно написать соотношение неопределенности  $\Delta\varphi \Delta J \geq 0,5\hbar$ . Это соотношение позволяет расширить понятие «синглет» для радикальной пары. Без магнитного поля образование химической связи происходит в результате случайного формирования синглетного состояния валентных электронов при столкновении атомов реагентов, энергия которых превышает порог химической реакции. Во внешнем магнитном поле спины валентных электронов прецессируют вокруг силовых линий. Поэтому количество возможных состояний спинов радикальных пар, образующихся при столкновении, уменьшается.

В низкотемпературной плазме время столкновения радикалов не превышает 10<sup>-13</sup> с. Поэтому состояние радикальной пары, образующейся при столкновении, определяется динамикой спинов перед столкновениями. В качестве радикальных пар можно рассматривать две частицы, между которыми неизбежно столкновение в конце времени свободного пробега.

С точки зрения динамики спина валентных электронов радикалов С и О<sub>2</sub> существенны: величина внешнего магнитного поля, частоты столкновений между собой <sup>13</sup>С, <sup>12</sup>С, О<sub>2</sub>. Реакция окисления углерода в низкотемпературной плазме высокочастотного разряда:



в постоянном магнитном поле может быть селективна по изотопам.

В модели сепарации изотопов предполагали следующее: для преимущественного выделения <sup>12</sup>С в конденсированную фазу необходимо, чтобы средняя частота столкновений О и <sup>12</sup>С была кратна разности парамагнитных частот наиболее химически активных возбужденных состояний указанных реагентов. Частоты прецессии спинов валентных электронов <sup>12</sup>С и <sup>13</sup>С отличаются из-за различия ядерных спинов. При этом скорость окисления изотопа <sup>12</sup>С уменьшается, что при охлаждении плазмы приводит к его преимущественной конденсации. Газ обогащается по <sup>13</sup>С.

В докладе анализируются физико-химические процессы, протекающие в низкотемпературной плазме, находящейся в магнитном поле, а также результаты экспериментальных исследований процесса формирования сажи в магнитном поле при охлаждении плазмы.

Исследования финансировались в рамках гранта РФФИ №16-08-00246.

## DEVELOPMENT OF METHODOLOGIES FOR ISOTOPE ANALYSIS OF HEAVY WATER COOLANT AT THE PIK REACTOR

Voronina T.V., [Tugusheva D.Yu.](#)  
 NRC "Kurchatov Institute" – PNPI, Gatchina, Russia  
 E-mail: [Tugusheva\\_DIU@pnpi.nrcki.ru](mailto:Tugusheva_DIU@pnpi.nrcki.ru)

PIK is a research heavy water reactor facility. According to the project, the PIK reactor incorporates two heavy-water circuits: a heavy water reflector (HWR) circuit and a liquid control loop (LCL). This requires the organization of control of the isotopic composition of heavy water (the content of deuterium and tritium), since:

1. Heavy water is hygroscopic, the rate of its dilution in the reactors is estimated as (0.1-0.3) atomic % per year. Calculations suggest that dilution (decrease of deuterium concentration) of heavy water in the reflector of the PIK reactor by 1% would result in a decrease in the thermal neutron flux by 20% [1].

2. A significant part (up to 40%) of the occupational dose-at the heavy water reactor facility is due to tritium dose. At the PIK reactor, the maximum volumetric activity of heavy water by tritium should not exceed 2 Ci / dm<sup>3</sup> [2].

Special methodologies are developed at the PIK reactor complex to determine the content of deuterium and tritium in heavy water.

To analyze the content of tritium in heavy water, the most sensitive and accurate radiometric method was chosen. In the laboratory of industrial chemical control, such an analysis is performed on a liquid-scintillation radiometer "Thriathler LSC". For several years, the technique "Measurement of the volume activity of tritium in light and heavy water by the method of liquid-scintillation radiometry" has been developed.

The work was performed using SSS (Standard State Sample) of tritium water, calibration standards (CS) were prepared from the SSS by the weight method. Based on the CS obtained, calibration dependences of the volumetric tritium activity on the radiometer count were constructed, the errors and the measurement range of the method were calculated. In addition, the influence of the measurement time on the result of the analysis was determined. In order to extend the measurement range of the method, different ratios of  $V_{\text{sample}}/V_{\text{SL}}$ , where SL is a Scintillation Liquid, were used. Approved in 2016, the technique allows determining the volumetric activity of tritium water from  $3.7 \cdot 10^{-7}$  Ci/dm<sup>3</sup> to 6 Ci/dm<sup>3</sup> [2]. The equations of calibration dependences are presented in Table 1.

Table 1. Equations of calibration dependences for various ratios  $V_{\text{sample}}/V_{\text{SL}}$  and their characteristics.

$V_{\text{sample}}/V_{\text{SL}}$	Dependence equation $C_T$ (Ci/dm <sup>3</sup> ) of I (imp/sec)	$C_{\text{min}}$ , Ci/dm <sup>3</sup>	$C_{\text{max}}$ , Ci/dm <sup>3</sup>
0.1/10	$4.25 \cdot 10^{-8} \cdot (I - I_0)$	$8.89 \cdot 10^{-6}$	$8.22 \cdot 10^{-2}$
1/10	$5.68 \cdot 10^{-9} \cdot (I - I_0)$	$1.15 \cdot 10^{-6}$	$1.11 \cdot 10^{-2}$
8/10	$1.83 \cdot 10^{-9} \cdot (I - I_0)$	$4.77 \cdot 10^{-7}$	$3.95 \cdot 10^{-3}$

The work is planned to be continued: it is necessary to study the influence of impurities in the coolant on the analysis result.

The next parameter that is important to control in the heavy water coolant is the deuterium content. Due to the high hygroscopicity of heavy water, working with it requires certain skills [and conditions]: tightness of the sample and storage tanks, low air humidity in the laboratory, etc. At the PIK facility, an IR spectrometry method was chosen for this analysis; this method is fast and sensitive enough, does not require additional preparation or a large amount of an analyzed sample. In the laboratory of industrial chemical control, measurements are performed on an IR Fourier spectrometer Tensor-37.

Several years ago, 14 calibration solutions of heavy water were prepared and measured for the development of a technique for measuring the deuterium concentration by the weight method. Two calibration curves were constructed from the spectrum obtained: for concentrated heavy water (99.0 – 99.9) atomic % and for the entire concentration range (0-100) atomic %. The error of curves was 0.005 atomic % and 0.4 atomic % respectively. These dependencies were used to analyze the heavy water of the PIK reactor HWR, but the analysis error over a wide range of heavy water concentrations turned out to be high. Therefore, the work was continued. For this purpose, 46 calibration solutions of heavy water were prepared, their spectra were measured and several calibration dependences were constructed. Moreover, the range of measured concentrations has been experimentally divided into several parts. The data are presented in Table 2. As a result, it was possible to reduce the measurement error by an order of magnitude. Today, these calibration dependences are used for analysis.

Table 2. Calibration dependence equations and their error for different concentration ranges.

Concentration range, atomic %	Calibration dependence equation	Analysis error, $\Delta$ , %
99.50 – 99.90	$a_D = 99.689 - 0.00166 \cdot S$	0.005
99.00 – 99.90	$a_D = 99.687 - 0.00168 \cdot S$	0.01
90.00 – 99.00	$a_D = 152.6 - 0.1586 \cdot S + 0.00095 \cdot S^2$	0.02
50.00 – 90.00	$a_D = 131.94 - 0.3712 \cdot S + 0.00023 \cdot S^2$	0.03
10.00 – 50.00	$a_D = 123.16 - 0.29924 \cdot S + 0.00008 \cdot S^2$	0.06
1.00 – 10.00	$a_D = 56.968 - 0.20462 \cdot S + 0.00012 \cdot S^2$	0.03
0.015 – 1.00	$a_D = 0.49215 + 0.00463 \cdot S$	0.003
0.015 – 99.90	$a_D = 0.49215 + 0.00463 \cdot S$	0.4

Currently, the measurement technique of deuterium in heavy water is under design.

#### REFERENCES

- 1 Petrov Yu.V. Choice of reactor parameters for physical researches // Preprint LNPI – 802. L., 1982. P. 62.
2. Voronina T.V., Romanova D.E., Tugusheva D.Yu. "Determination of the volumetric activity of tritium in the PIK reactor coolants by the liquid-scintillation radiometry method". Main results of scientific work 2015. Gatchina, 2016, P.106.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ УГЛЕРОДА

Сопыряев В.В., Луценко Ю.Ю.

Научный руководитель: Луценко Ю.Ю., д.ф.-м.н.

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

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

В настоящее время для разделения изотопов углерода разработан метод [1], основанный на избирательном протекании химических реакций при наложении на разделяемую смесь изотопов постоянного магнитного поля. Избирательность протекания химических реакций появляется за счёт соответствующей ориентации в магнитном поле спина химических соединений. Данный метод разделения был реализован в плазме высокочастотного факельного разряда.

Заметим, что эффективность процесса разделения изотопов при этом непосредственно связана с эффективностью работы используемого плазмохимического реактора.

В настоящей работе проведена оценка тепловых потерь на электроде и в стенке плазмохимического реактора для разделения изотопов. Полученные величины были сопоставлены с полной тепловой мощностью разряда.

Исследуемый плазмохимический реактор представлял собой две соосно установленные кварцевые трубки диаметром 32 мм и 56 мм, промежуток между которыми заполнялся водой. Длина плазмохимического реактора составляла 50 см. В качестве высоковольтного электрода использовался медный водоохлаждаемый электрод цилиндрической формы. Частота электромагнитного поля составляла 37 МГц. Калориметрирование тепловых потерь осуществлялось посредством измерения температуры и расхода воды, охлаждающей конструктивные элементы реактора.

В результате измерений было установлено, что тепловые потери на электроде и в стенках разрядной камеры увеличиваются с ростом полной мощности разряда по линейной зависимости. Результаты измерений для воздушной плазмы разряда представлены на следующем рисунке.

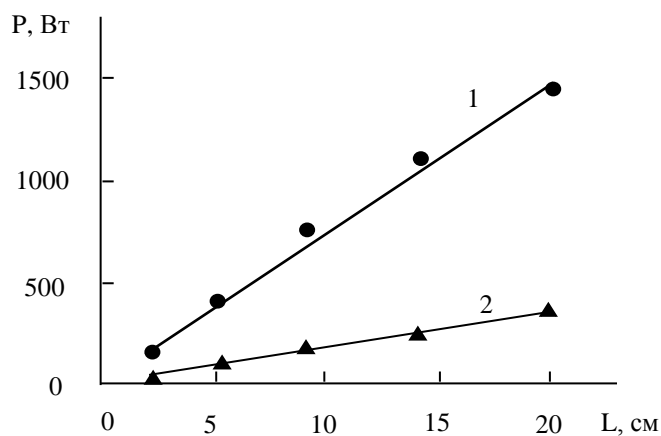


Рис.1. Зависимость тепловых потерь в разряде от длины его канала. 1 – полная тепловая мощность; 2 – тепловые потери на электроде.

В случае аргоновой плазмы разряда зависимость тепловых потерь имеет аналогичный вид. Однако в этом случае тепловые потери на электроде составляют 15% от полной тепловой мощности разряда, а не 30%, как в случае воздушной плазмы. Линейный характер полученной зависимости позволяет также утверждать, что диаметр канала пропорционален квадратному корню от мощности разряда.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мышкин В.Ф., Хан В.А., Плеханов В.Г., Ижойкин Д.А, Беспала Е.В. Спиновая сепарация изотопов при неполном окислении углерода в низкотемпературной плазме во внешнем магнитном поле // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. - Т. 57, - №10, - с. 127–132.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ ОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ГРАФИТА В КИСЛОРОДНОЙ СРЕДЕ

Беспала Ю.Р.

Научный руководитель: д.ф.-м.н. В.Ф. Мышкин

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

E-mail: bespalayr@tpu.ru

Известно, что в уран-графитовых ядерных реакторах (энергетических и промышленных) в качестве замедлителя нейтронов используется особо чистый графит. При производстве ядерный графит проходит несколько этапов очистки: термическое прокаливание кокса, высокотемпературный обжиг заготовок, графитация. Однако, в графите остаются различные примеси, например, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Fe, V, Ti, Al, Mn, Ni, Co, Ca, Mg, B, Cl, S. При работе реактора происходит поглощение нейтронов этими примесями и образование различных радионуклидов, которые формируют общую активность облученного ядерного графита.

В настоящее время в мире накоплено более 250 000 тонн графитовых радиоактивных отходов (РАО). Определено, что наведенная активность таких РАО определяется активационными радионуклидами (<sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>55</sup>Fe, <sup>60</sup>Co и др.), продуктами деления (<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 и др.) и трансурановыми элементами (<sup>241</sup>Am, <sup>243</sup>Am, <sup>244</sup>Cm и др.). Нуклиды непрочно удерживаются на поверхности. При приповерхностном захоронении облученного графита потенциальная опасность отходов заключается в повышенной скорости выщелачивания радионуклидов. При этом стоимость захоронения облученного ядерного графит зависит от класса РАО, который определяется суммарной активностью, входящих в его состав радионуклидов, и наличием в нем продуктов деления и актиноидов. Для уменьшения затрат на хранение необходимо снижать класс активности графитовых отходов.

К перспективным методам дезактивации и уменьшения потенциальной опасности облученного ядерного графита можно отнести: сжигание в окислительной среде [1], пиролиз, плазменная обработка [2]. Известные способы объединяет совокупность следующих технологических операций: подготовка облученного ядерного графита, его нагрев, селективное удаление радионуклидов. Однако графитовые РАО представляют собой особый класс отходов, в которых под действием нейтронного потока накапливается энергия, связанная с нарушением структуры графита. Эта энергия может выделяться в виде значительного количества тепла.

В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с взаимодействием химически активного газового потока с поверхностью облученного ядерного графита в широком диапазоне температур, при термической переработке графитовых РАО. Проанализирован процесс горения графита и показан вклад запасенной энергии на энергетический и массовый баланс облученного графита.

Разработана математическая модель процесса окисления облученного ядерного графита уран-графитовых реакторов при его термической обработке, основанная на уравнении теплопроводности. В докладе показывается, что качественный и количественный состав газообразных продуктов реакции зависит от термо- и газодинамического режима ведения процесса. Например, что в диапазоне температур 400–700°C и при скорости подачи газа 0,1 м/с, происходит кратковременное изменение температуры графита за счет отжига дефектов выделения энергии образования графита. Однако на состав газообразных продуктов реакции в большей степени влияет скорость набегающего потока, так, при отсутствии конвективных потоков, когда изменение концентрации продуктов реакции происходит только за счет диффузии, влияние выделения запасенной энергии на баланс массы системы максимально.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки термических методов снижения потенциальной опасности графитовых РАО.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кашеев В.А. Технология и установка для сжигания облученного реакторного графита / В.А. Кашеев, С.А. Якунин, В.С. Загуменнов, А.О. Павлюк, С.Г. Котляревский, Е.В. Беспала // Атомная энергия. – 2017. – Т. 122. – № 4. – С. 210–213.
2. Беспала Е.В. Тепломассоперенос при испарении цезия с поверхности графита в аргоновой среде / Е.В. Беспала, В.Ф. Мышкин, А.О. Павлюк, И.Ю. Новосёлов // Атомная энергия. – 2017. – Т. 122. – № 6. – С. 325–329.

*Секция 3*

**ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ И ХРАНЕНИЯ ОТХОДОВ  
ИЗОТОПНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

*Председатель: к.ф.-м.н., доцент А.Г. Каренгин*



## ОПЫТ АТТЕСТАЦИИ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА БИОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Кабанов Д.В., Нестерова Ю.В.

Научный руководитель: Меркулов В.Г.

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

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

Одним из основных средств обеспечения аналитических исследований в различных сферах средствами для контроля правильности измерений, градуировки, калибровки, поверки средств измерений являются стандартные образцы (СО).

Стандартные образцы имеют важное значение для обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений, в производстве веществ и материалов, обеспечения безопасности жизни и здоровья человека, окружающей среды, для контроля качества продукции.

Анализ микроэлементного состава стандартных образцов химического состава биологического происхождения достаточно сложен, и для его проведения необходимо использовать высокочувствительные, надежные, и по возможности, экономичные методы. Для определения уровней содержания макро- и микроэлементов в биологических образцах различного происхождения широко применяют такие методы количественного анализа, как атомно-эмиссионная спектрометрия, масс-спектрометрия, нейтронно-активационный анализ, рентгенофлуоресцентный анализ и различные их модификации. Авторы принимали неоднократное участие в работах по аттестации международных стандартных образцов химического состава различного происхождения с использованием нейтронно-активационного анализа (НАА), совместно с более чем 30-ю различных стран. Работы по сличению и обработке результатов проводил Институт ядерной химии и технологии (Варшава, Польша).

Для проведения НАА, анализируемые пробы (ткань баклана-cormorant tissue, ткань трески-cod tissue и донные отложения-bottom sediment, а также ранее проанализированные пробы табаков-OBTL-5,PVTL-б) предварительно сушили, взвешивали и упаковывали совместно с аттестованными стандартными образцами схожего химического состава, облучали в потоке тепловых нейтронов  $5 \cdot 10^{13}$  нейтр/(см<sup>2</sup>·с) на реакторе ИРТ-Т ТПУ. Время облучения составляло от нескольких секунд до 5ч, при анализе на короткоживущие и долгоживущие изотопы соответственно. Перед измерением облученные образцы распаковывались и переносились в полиэтиленовые измерительные емкости. Измерение активностей радиоаналитических изотопов определяемых элементов проводили с использованием гамма-спектрометра на базе многоканального анализатора и ОЧГ-детектора (Cанberra, USA). Далее производили расчет содержания элементов в представленных образцах по пять параллельных проб, проводили мат.обработку, полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1. Некоторые результаты содержания определенных элементов в ткани баклана.

Element	Net results of individual determinations $\mu\text{g g}^{-1}$ (ppm)					$X_{\text{md}}$	Combined standard uncertainty of the measurement %	Limit of detection $\mu\text{g g}^{-1}$ (ppm)
	1	2	3	4	5			
Sample mass, g	0,175	0,205	0,230	0,186	0,209			
As	0,413	0,373	0,396	0,364	0,432	0,395	8,78	0,5
Ba	2,85	2,62	2,62	2,79	2,78	2,73	4,86	0,5
Br	10,30	10,38	9,83	10,15	10,69	10,27	3,82	0,01
Ca	322,2	315,1	320,7	347,9	319,6	325,1	4,97	10
Co	0,0511	0,0456	0,0475	0,0500	0,0465	0,0481	8,93	0,005
Fe	331,2	348,2	329,5	339,2	325,8	334,8	3,07	1,0
Rb	13,6	13,2	13,1	14,1	12,9	13,4	4,42	0,01
Sb	0,058	0,065	0,064	0,062	0,069	0,064	7,81	0,001
Sr	55,07	47,61	56,87	56,32	53,77	53,93	8,58	1,0
Se	1,35	1,30	1,32	1,23	1,22	1,28	5,46	0,1

Полученные нами данные о содержании большинства химических элементов, оцененные с помощью критерия Шухарта, вошли в состав группы лабораторий, результаты которых признаны как более достоверные и использованы для расчетов аттестованных значений. Приобретен опыт участия в подобных мероприятиях международного масштаба, подтверждена компетентность и оценено качество нейтронно-активационного анализа.

## RESEARCH OF DIELECTRIC PROPERTIES DEPENDENCE OF NEW ELECTRICAL INSULATING MATERIALS ON RADIATION EXPOSURE

Romanov<sup>1</sup> B. S., Kostromin<sup>1</sup> V. V., Bedenko<sup>2</sup> S. V., Mukhnurov<sup>2</sup> I. A., Román Matías<sup>2</sup> R.

Scientific adviser: Bedenko<sup>2</sup> S. V., Ph.D. Physics, docent

<sup>1</sup>Special Design Bureau for Cable Industry, JSC Mytishchi, Russia

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

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

To provide reliability and safety of operation of nuclear power plants (NPP) at the present time there is the need for developing special wires and cable products on the basis of materials which could provide their continuous exploitation in ionizing radiation fields and at increased temperatures [1].

It is evident that selection of materials should follow the selection of materials not only in terms of the analysis of their electrophysical, physical and mechanical and processing properties, but also taking into account changes of these properties caused by long-term exposure and temperature [2].

When NPP, engineering systems and installations operate in specific conditions materials of different chemical nature are used (metals, semiconductors, polymers, etc.). The mechanism of radiation effect on different materials is not similar. Taking into account that it is difficult to find a universal approach to the description of radiation effects in various materials it makes sense to consider radiation exposure on separate groups of materials combined either by their chemical nature or by the application field.

Polymer materials are widely used in various engineering fields, including nuclear industry, where they are influenced by ionizing radiation of different activity. Radiation effects in such materials are determined not only by the absorbed radiation dose, but also by a number of other factors (for example, the radiation spectrum) specifying irradiation conditions.

Hundreds of works were devoted to the study of irradiation specificity influence on polymers properties. However, in many cases additional researches and experiments on the resistance to factors present in certain conditions are required.

One of such materials is PTFE-4MB (F-4 MB) developed as early as 1970. Working capacity of this material for special-purpose wires and cables was supported by numerous tests carried out in terms of scientific and design and experimental researches [3]. But its modification PTFE-4 MB of K-series (F-4 MBK) suggested by Plastpolymer Joint Stock Company is practically unstudied.

The study of external impact on the properties of F-4 MBK has some academic and practical interest and is the purpose of the present research.

The influence of gamma radiation on dielectric ( $\epsilon$  and  $\text{tg}\delta$ ) and physical mechanical properties of PTFE-4 MBK is considered. Research of radiation influence on relative dielectric permittivity  $\epsilon$  and dielectric loss tangent  $\text{tg}\delta$  allows predicting cable products properties applied in various conditions and developing exploitation reference documentation. The results of the research will be used for reasoning and locating cables and wiring in engineering systems and installations creating ionizing radiation fields.

### REFERENCES

1. Kostromin V V, Romanov B S, Popov M F, et al 2006 Novye metody izmerenija dijelektricheskikh harakteristik jelektroizoljacionnyh materialov [New methods for measuring dielectric characteristics of electrical insulating materials]. *Kabeli i provoda* **5** 16–22 (in Russian).
2. Kunica T N, Romanov B S 2010 O vozmozhnosti jekspluatacii v nestandartnyh uslovijah kabelej i provodov aviakosmicheskoy tehniky. *Kabeli i provoda* **3** 31–33 (in Russian).
3. Keam R, Green A D 1995 Measurement of complex dielectric permittivity at microwave frequencies using a cylindrical cavity *Electron. Lett.* **31**(3) 212–214.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОЙ КОНВЕРСИИ ОБЕДНЕННОГО ПО ИЗОТОПУ УРАН-235 ГЕКСАФТОРИДА УРАНА В ДИОКСИД УРАНА

Тундешев Н.В.<sup>1,2</sup>, Кулиев Р.У.<sup>2</sup>, Каренгин А.Г.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>АО «ПО«Электрохимический завод», 663690, Россия, г. Зеленогорск, ул. Промышленная, 1,  
E-mail: tundeshev93@mail.ru

В процессе работы АО «ПО» Электрохимический завод» и других разделительных предприятий ГК «Росатом», специализирующихся на обогащении гексафторида урана по изотопу уран-235, уже накоплены миллионы тонн и продолжается накопление обедненного по изотопу уран-235 гексафторида урана (ОГФУ), что привело к серьезным экологическим и экономическим проблемам.

Экологические проблемы ОГФУ связаны с потенциальной и фактической опасностью долгосрочного хранения миллионов тонн летучего радиоактивного фтористого продукта в стальных баллонах под открытым небом, а экономические проблемы определяются следующими основными факторами: вывод из оборота элементного фтора и изотопа уран-238; изготовление и ремонт баллонов для хранения; большие эксплуатационные затраты на содержание и расширение земельных участков под хранение, значительный рост этих затрат в недалеком будущем, когда встанут вопросы о цене омертвленных земельных участков и о стоимости их рекультивации.

Конверсия ОГФУ является актуальной и сложной технической задачей, решением которой занимаются многие страны, использующие атомную энергетику. Мировым лидером в области конверсии ОГФУ в оксиды урана в промышленных масштабах является французская компания «Cogema».

Принцип работы установки данной компании «W-ЭХЗ» основан на последовательных процессах гидролиза ОГФУ до уранилфторида и пирогидролиза уранилфторида до закиси-окиси урана. К серьезным недостаткам этой технологии следует отнести: многостадийность; высокие энерго- и трудозатраты; значительная потребность в химических реагентах (перегретый водяной пар, азот, водород); необходимость применения коррозионностойких к фтору и его соединениям конструкционных материалов, невозможность одностадийного получения безводного фтористого водорода, а применение ректификации для доведения образующегося разбавленного фтористого водорода (~74 %) до безводного требует дополнительных энерго- и трудозатрат.

Для конверсии ОГФУ перспективным является применение плазмы. К преимуществам плазмохимической конверсии ОГФУ следует отнести [1,2]: одностадийность; высокую скорость; возможность активно влиять на размер и морфологию частиц; компактность технологического оборудования; низкую себестоимость. Однако плазменная обработка только ОГФУ потребует значительных затрат электрической энергии. Существенное снижение энергозатрат может быть достигнуто при плазмохимической конверсии ОГФУ в виде оптимальных по составу газо-воздушных смесей на основе ОГФУ и водорода.

Проведен расчет показателей горения газо-воздушных смесей и определены составы, обеспечивающие энергоэффективную конверсию ОГФУ в воздушной плазме. По результатам термодинамического моделирования процесса плазмохимической конверсии ОГФУ в виде газо-воздушных смесей определены режимы, обеспечивающие в воздушной плазме получение в конденсированной фазе диоксида урана. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании технологии плазмохимической конверсии ОГФУ в виде газо-воздушных смесей.

## 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. Фэгер Андре. Способ и установка для непосредственного превращения гексафторида урана в оксид урана. Патент FR 2162058 C01G43/025.  
Toumanov I.N., Sigailo A. V. Plasma Synthesis of Disperse Oxide Materials from Disintegrated Solutions // Materials Science and Engineering. 1991.– Vol. A140.– P. 539-548.

# ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОМАСООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Павленко А.П., Каренгин А.А.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: moroziknastia94@mail.ru

За время многолетней работы предприятий ЯТЦ накоплены миллионы тонн жидких радиоактивных отходов (ЖРО) низкой и средней активности (азотнокислые экстракционные рафинаты, аммиачно-хлоридные маточные растворы, аммиачные маточные растворы и др.). К недостаткам применяемых технологий их переработки следует отнести многостадийность и значительные энерго- и трудозатраты [1].

Для обработки ЖРО в виде водно-солевых отходов (ВСО) перспективным является применение низкотемпературной плазмы. Плазменная обработка ВСО в виде диспергированных водных растворов солей или суспензий гидроксидов металлов является одностадийным, гибким и наиболее универсальным методом, основными достоинствами которого являются: высокая скорость процесса, большое число каналов воздействия на физико-химические свойства целевых продуктов [2]. Однако плазменная обработка только ВСО требует значительных энергозатрат (до 4,0 МВт·ч/т).

В современных условиях одним из путей повышения экономичности энергоустановок является совершенствование оборудования путем внедрения эффективных способов интенсификации тепло- и массообменных процессов. К наиболее распространенным способам интенсификации можно отнести: использование турбулентного режима течения теплоносителей, шероховатых теплообменных поверхностей, повышение скорости течения сред, использование поверхностей с оребрением, турбулизаторов потока, псевдооживление слоя и т.д. [3].

В работе представлены результаты моделирования процесса плазменной обработки ВСО в воздушно-плазменном потоке в виде оптимальных по составу диспергированных водно-солеорганических композиций (ВСОК).

По результатам расчетов показателей горючести различных модельных водно-солеорганических композиций («ВСО–метанол», «ВСО–этанол», «ВСО–ацетон», и др.) определены составы ВСОК, имеющие низшую теплотворную способность ( $Q_{н}^p \geq 8,4$  МДж/кг) и адиабатическую температуру горения ( $T_{ад} \geq 1200$  °С) и обеспечивающие не только существенное снижение затрат электрической энергии на плазменную обработку отходов (до 0,1 МВт·ч/т), но и дополнительное получение тепловой энергии (до 2,0 МВт·ч/т).

В результате термодинамических расчетов процесса плазменной обработки ВСО в виде ВСОК установлены основные закономерности влияния исходного состава этих композиций и массовых долей воздушного плазменного теплоносителя на равновесные составы образующихся газообразных и твердых продуктов и определены режимы для практической реализации процесса, обеспечивающие энергоэффективную обработку отходов в воздушной плазме.

По результатам численных расчетов процесса плазменной обработки диспергированных ВСОК в воздушно-плазменном потоке установлены основные закономерности влияния начальных параметров потока (температура, скорость), капель (размер, скорость), их массового отношения на параметры высокотемпературного двухфазного течения с фазовыми переходами и предложена модель реактора для их эффективной плазменной обработки.

Показано, что основными факторами, влияющими на интенсификацию тепло- и массообменных процессов при плазменной обработке диспергированных ВСОК являются: температура (мощность) воздушно-плазменного потока, размер капель обрабатываемых композиций (диспергирование), температура пленки вязкой жидкости композиции, скорость обдува капель диспергируемых композиций, химический состав обрабатываемых растворов (включение в состав композиций горючих органических веществ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябчиков Б.Е. Очистка жидких радиоактивных отходов. – М.: ДеЛи принт, 2008. – 512 с.
2. Туманов Ю. Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. – М.: «Физматлит», 2003. – 759 с.
3. Toumanov I.N., Sigailo A. V. Plasma Synthesis of Disperse Oxide Materials from Disintegrated Solutions // Materials Science and Engineering. 1991.– Vol. A140.– P. 539-548.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ

Мендоса О.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: kuros@tpu.ru

У современной атомной энергетики, использующей оксидное ядерное топливо (ЯТ) в реакторах на тепловых нейтронах в виде керамики из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, наряду с достоинствами есть и существенные недостатки [1]: низкая теплопроводность; высокая хрупкость и склонность к растрескиванию; короткий цикл использования; ограниченный ресурс изотопа уран-235.

Одним из перспективных направлений дальнейшего развития атомной энергетики является создание реакторных установок с использованием дисперсионного ЯТ, которое характеризуется отсутствием прямых контактов между частицами топлива благодаря их равномерному распределению в матрице и обладает следующими преимуществами [2]: высокие теплопроводность и механические свойства; высокое «выгорание» делящихся материалов; высокая радиационная стойкость и прочность, обеспечивающая геометрическую стабильность ТВЭЛ; локализация продуктов деления в гранулах.

Для получения металл-оксидных композиций перспективным является применение низкотемпературной плазмы. К преимуществам плазмохимического синтеза металл-оксидных композиций из водно-солевых композиций следует отнести [3]: одностадийность; высокую скорость; гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом; возможность активно влиять на размер и морфологию частиц; компактность технологического оборудования; низкие удельные энергозатраты.

В работе рассмотрена возможность применения окислительной и восстановительной плазмы для плазмохимического синтеза металл-оксидных композиций «W-UO<sub>2</sub>» из водно-солевых композиций (ВСК) «вольфрамовая кислота-нитрат уранила» и «вольфрамовая кислота-ацетат уранила». Представлены результаты расчетов составов ВСК и режимов их плазменной обработки, обеспечивающих плазмохимический синтез композиций «W-UO<sub>2</sub>». Расчеты проведены при атмосферном давлении (0,1 МПа), в широком диапазоне температур (300-4000 К), с использованием различных плазменных теплоносителей (воздух, водород).

Для расчета коэффициента теплопроводности  $\lambda$  композиционного материала в виде МОК «W-UO<sub>2</sub>» использовалась элементарная ячейка (рис. 1), состоящая из блока матрицы 1 и блока включения 2.

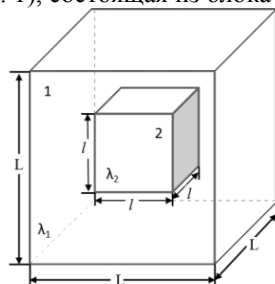


Рис. 1. Элементарная ячейка металл-оксидной композиции «W-UO<sub>2</sub>»: блок 1 – матрица (W), блок 2 – включение (UO<sub>2</sub>)

Расчет коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  проведен для МОК «30 % W-70 % UO<sub>2</sub>» (L=100 мкм, l=70 мкм) и «50 % W-50 % UO<sub>2</sub>» (L=100 мкм, l=50 мкм) при температурах 273-1073 К с интервалом в 200 К. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании технологии плазмохимического синтеза различных по составу гомогенных металл-оксидных композиций «W-UO<sub>2</sub>», а также для оценки и прогнозирования теплофизических свойств композиционных материалов на их основе для дисперсионного ядерного топлива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котельников Р.Б. и др. Высокотемпературное ядерное топливо. – М.: Атомиздат, 1978. – 432 с.
2. Алексеев С. В. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015.–248 с.
- Туманов Ю. Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. – М.: «Физматлит», 2003. – 759 с.

## КОМПЛЕКСНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ОТХОДОВ ВОДООЧИСТКИ

Каренгин А.А.

Научный руководитель: Каренгин А.Г., к.ф.-м.н., доцент  
АО «Сибирский химический комбинат»,  
636039, г. Северск, Томской области, ул. Курчатова, д.1  
E-mail: karenginaleksey@gmail.com

Только в России накоплены и ежегодно образуются миллионы тонн отходов после водоочистки, которые являются мощным фактором, воздействующим на окружающую среду и отрицательно влияющим на качество жизни человека.

Однако эти отходы не только могут быть использованы, но их применение может быть выгодно с экономической точки зрения. Использование отходов в качестве вторичных материальных ресурсов решает ряд важных хозяйственных задач, таких как экономия основного сырья, предотвращение загрязнения водоемов, почвы и воздушного бассейна, производство новых видов товаров народного потребления и др.

Так на Томском подземном водозаборе после очистки пресной воды ежегодно образуются свыше 3000 т отходов водоочистки (ОВО), имеющих следующий состав (%): Fe- 30,3; Mn – 4,5; Si – 4,0; Ca – 1,0; H<sub>2</sub>O – остальное [1]. Эти отходы содержат целый ряд металлов и могли бы стать серьезной сырьевой базой для многотоннажного производства пигментов, а также изготовления на их основе различных красок, окрашенных строительных материалов и изделий, железосодержащих концентратов для производства сталей и сплавов и др. Однако из-за отсутствия эффективных технологий эти отходы до сих пор не нашли широкого промышленного применения.

В компании ООО «Сибметаким» (г. Томск), занимающей лидирующие позиции в России по производству метанола (до 800 000 т/год), ежегодно образуется до 3500 т горючих отходов производства метанола (ГОПМ), имеющих следующий состав (%): CH<sub>3</sub>OH - (50-70); C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O - (2,6-5,3); C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O и другие высшие спирты - (2,5-4,7), H<sub>2</sub>O – остальное [2]. В настоящее время эти отходы сжигаются в печах реформинга и выбрасываются в атмосферу, что экологически небезопасно и приводит к значительным потерям тепловой энергии.

Прямая плазменная обработка ОВО потребует огромных затрат электрической энергии (до 4,0 кВт·ч/кг). Существенное снижение энергозатрат может быть достигнуто при совместной обработке горючих и негорючих отходов в воздушно-плазменном потоке в виде оптимальных по составу диспергированных водно-солеорганических композиций (ВСОК) [2].

На основе результатов расчетов показателей горючести композиций «ОВО–ГОПМ» определены оптимальные по составу ВСОК, имеющие низшую теплотворную способность ( $Q_{н}^P \geq 8,4$  МДж/кг), адиабатическую температуру горения ( $T_{ад} \geq 1200$  °С) и обеспечивающие не только существенное снижение затрат энергозатрат на плазменную обработку ОВО (с 4,0 до 0,1 МВт·ч/т), но дополнительное получение тепловой энергии для технологических и бытовых нужд (до 2,0 МВт·ч/т).

В результате термодинамических расчетов процесса плазменной обработки ВСОК установлены основные закономерности влияния исходного состава этих композиций и массовых долей воздушного плазменного теплоносителя на равновесные составы образующихся газообразных и твердых продуктов и определены режимы, обеспечивающие экологически безопасную плазменную обработку отходов в воздушной плазме и получение в составе твердых продуктов магнитного оксида железа (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). Для расчетов использовалась лицензионная программа «TERRA».

С учетом полученных результатов проведены исследования процесса плазменной обработки ОВО на плазменном стенде «Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01» (рабочая частота 13,56 МГц, колебательная мощность до 60 кВт), и экспериментально подтверждена возможность энергоэффективной совместной плазменной обработки ОВО и ГОПМ в воздушно-плазменном потоке в виде диспергированных ВСОК.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании технологии для энергоэффективной комплексной плазменной обработки ОВО и получения пигментов различного состава и назначения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисецкий В.Н., Брюханцев В.Н., Андрейченко А.А. Улавливание и утилизация осадков водоподготовки на водозаборах г. Томска. - Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 164 с.
2. Shekhovtsova A.P, Karengin A.G. Efficiency Assessment of Using Flammable Compounds from Water Treatment and Methanol Production Waste for Plasma Synthesis of Iron-Containing Pigments // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. Article number 012045. – P. 1-7.

## МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ В МЕДИЦИНЕ

Селихова Е.А.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: Selihova\_ekaterina@mail.ru

Даже сегодня различные заболевания, такие как диабет, рак, болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера, сердечно-сосудистые заболевания и рассеянный склероз, а также различные виды серьезных воспалительных или инфекционных заболеваний (например, ВИЧ) создают серьезную проблему для человечества.

Наномедицина - относительно новая область науки и техники. Медицинская область применения нанотехнологий имеет много прогнозируемых преимуществ для всего человечества. Благодаря взаимодействию с биологическими молекулами в наномасштабе нанотехнологии расширяют область исследований и применения. Взаимодействие наноустройств с биомолекулами возможно как во внеклеточной среде, так и внутри клеток человека. Наномедицина широко использует наноматериалы и наноэлектронные биосенсоры.

Секвенирование генов стало более эффективным с изобретением наноструктур, таких как наночастицы золота, эти частицы золота при маркировке короткими сегментами ДНК могут быть использованы для обнаружения генетической последовательности в образце.

С помощью нанотехнологий поврежденные ткани могут быть воспроизведены или отремонтированы. Эти так называемые искусственно стимулированные клетки используются в тканевой инженерии, что может революционизировать трансплантацию органов или искусственных имплантатов.

Продвинутые биосенсоры с новыми функциями могут быть разработаны с помощью углеродных нанотрубок (УНТ). Эти биосенсоры могут использоваться для астробиологии и могут проливать свет на истоки исследования жизни. Эта технология также используется для разработки датчиков для диагностики рака.

Нанотехнологии внесли большой вклад в исследование стволовых клеток. Например, магнитные наночастицы (MNP) были успешно использованы для выделения и группировки стволовых клеток. Квантовые точки были использованы для молекулярной визуализации и отслеживания стволовых клеток, для доставки гена или лекарств в стволовые клетки, использовали наноматериалы, такие как УНТ, флуоресцентные УНТ и флуоресцентные MNP.

Уникальные наноструктуры были разработаны для контролируемой регуляции пролиферации и дифференциации стволовых клеток, созданной уникальными наноструктурами. Все это ускоряет развитие стволовых клеток к применению в регенеративной медицине. Недавние применения нанотехнологий в исследованиях стволовых клеток обещают открыть новые пути в регенеративной медицине. Нанотехнология может быть ценным инструментом для отслеживания и изображения стволовых клеток, для их дифференциации в конкретных клеточных линиях и, в конечном счете, для понимания их биологии.

Наногубки являются важными инструментами при доставке лекарств, из-за их небольшого размера и пористой природы они могут связывать малорастворимые препараты в пределах их матрицы и улучшать их биодоступность. Они могут быть использованы для перевозки на определенные участки, что помогает предотвратить деградацию лекарств и белков и может продлить выведение лекарств контролируемым образом.

Применение наночастиц может быть очень полезно в онкологии, особенно при визуализации. Наночастицы могут использоваться в сочетании с магнитно-резонансной томографией, чтобы создавать исключительные изображения опухолевых сайтов. По сравнению с органическими красителями наночастицы намного ярче и нуждаются в одном источнике света для возбуждения.

Канонические селенидные наночастицы в виде квантовых точек используются для обнаружения опухолей рака, потому что при воздействии ультрафиолетового света они накаляются. Достигнуты хорошие результаты от применения различных наносистем в терапии рака, таких как УНТ, дендримеры, нанокристаллические, нанопроволоки, нанооболочки и т. д.

Прогресс в нанотехнологиях помогает в лечении нейро дегенеративных расстройств, таких как болезнь Паркинсона и болезнь Альцгеймера.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО ПОЛУЧЕНИЯ ГОМОГЕННЫХ ОКСИДНЫХ УРАН ПЛУТОНИЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Бабаев Р.Г.

Научный руководитель: к.ф.-м.н., Каренгин А.Г.

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

E-mail: bobontuber@inbox.ru

На сегодняшний день оксидное ядерное топливо является единственным топливом, используемым в промышленных масштабах. Однако современные технологии получения ядерного топлива не решают все проблемы в данной области.

Получение  $UO_2$ - $PuO_2$  золь-гель методом включает три основные стадии: приготовление золь, удаление воды с образованием твердых частиц геля и прокаливание. Общими недостатками метода многостадийность, высокая стоимость переработки, необходимость использования большого количества химических реагентов, неэкспрессность и т.д.

Значительное снижение материальных затрат, а также одностадийность процесса получения оксидных уран-плутониевых композиций может быть осуществлено при плазменной обработке уран и плутоний содержащих водно-солевых растворов в виде оптимальных по составу горючих водно-солеорганических композиций (ВСОК).

На первом этапе был проведен расчет показателей горения различных по составу ВСОК на основе нитратов плутония и уранила с добавлением этанола. В процессе расчетов соотношение компонентов принималось равным  $U:Pu = 95\%:5\%$ , концентрации урана в водно-солевом растворе принимались равными 100 г/л и 140 г/л, плутония – 22 г/л. В работе [1] показано, что плазменная переработка оптимальных по составу горючих ВСОК, имеющих адиабатическую температуру горения  $T_{ад} \approx 1200$  °С, обеспечивает их энергоэффективную и экологически безопасную переработку, в связи с этим из анализа расчетов были определены оптимальные составы ВСОК-1: 29%  $C_2H_5OH$ ; 71%  $U-Pu$  раствор (концентрация урана 100 г/л) и ВСОК-2: 28%  $C_2H_5OH$ ; 72%  $U-Pu$  раствор (концентрация урана 140 г/л).

Для определения оптимальных режимов исследуемого процесса были проведены расчёты равновесных составов газообразных и конденсированных продуктов плазменной обработки оптимальных по составу ВСОК в воздушной плазме. Для расчётов использовалась лицензионная программа «TERRA». Расчёты проведены при атмосферном давлении (0,1 МПа), широком диапазоне рабочих температур (300–4000 К) и для различных массовых долей воздушного плазменного теплоносителя (0,1–0,9).

С учетом полученных результатов показано, что оптимальный режим процесса плазменного получения гомогенных оксидных уран плутониевых композиций характеризуется следующим соотношением фаз: 50% воздух : 50% ВСОК, при котором основными конденсированными продуктами являются  $UO_2$  и  $PuO_2$ , основными газообразными продуктами –  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ .

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании промышленных установок для плазменной получения гомогенных оксидных уран-плутониевых порошков заданного состава.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каренгин А.Г., Каренгин А.А., Ковалев А.В., Новоселов И.Ю., Расчет и оптимизация процесса плазменной утилизации горючих отходов переработки отработавшего ядерного топлива // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014.– Т. 57.– № 2/2.– С. 31-34.



## ПРОБЛЕМЫ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА И ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ ЕГО ПЕРЕРАБОТКИ

Кузоро В.Б.<sup>1</sup>, Новоселов И.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО Атомтехэнерго, 141011, Россия, г. Мытищи, ул. Коммунистическая, 23

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

E-mail: infi24ity@gmail.com

Все страны, развивающие атомную энергетику, сталкиваются с проблемой нехватки объемов для хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Сегодня в России на площадках АЭС и в хранилищах радиохимических заводов размещено около 16000 т ОЯТ. Ежегодный прирост хранящегося топлива составляет более 850 т. Увеличение количества ОЯТ делает проблему обеспечения безопасности все более актуальной [1]. ОЯТ в отличие от «свежего» топлива имеет значительную радиоактивность за счет содержания большого количества продуктов деления (табл. 1), которые определяют его активность и токсичность [2].

Таблица 1. Радионуклиды, определяющие активность и токсичность ОЯТ

Временной интервал, год	Определяющие радионуклиды
< 100	Fe-55, Co-58, Ni-59, Sr-90, Ru-106, Sb-125, Cs-134,137, Ce-144, Pm-147, Eu-154,155
100-1 000	Sm-151, Co-60, Cs-137, Ni-59,63
1 000-10 000	Pu-239,240, Am-241
10 000-100 000	Np-237, Pu-239,240, Am-243, C-14, Ni-59, Zr-93, Nb-94
> 100 000	I-129, Tc-99, Pu-239

В России ОЯТ размещают в основном под водой в бассейнах выдержки. Каждый такой бассейн снабжен технологическим и подъемным оборудованием для приема топлива и его выгрузки. Такие хранилища обеспечивают ядерную и радиационную безопасность ОЯТ, минимизируют выбросы радиоактивных компонентов в окружающую среду. Увеличение объема ОЯТ в хранилищах для обеспечения бесперебойной работы реакторов требуются дополнительные площади хранения. Самые большие трудности связаны с накоплением неперерабатываемого ОЯТ (топливо реакторов РБМК-1000 и ВВЭР-1000). Проблему увеличения вместимости хранилищ ОЯТ можно решить тремя способами: построить дополнительные сооружения для хранения ОЯТ, реконструировать старые бассейны выдержки, перейти к принципиально новым способам хранения.

Большинство АЭС в России выбрали второй и третий пути, последний предусматривает так называемое «сухое» хранение – размещение ОЯТ в специальных контейнерах, которые герметизируют сваркой, заполняют гелием, транспортируют к гнезду хранения. Гнездо заваривают с последующим контролем герметичности. Отвод тепла за счет конвекции атмосферного воздуха вокруг гнезда обеспечивает безопасный режим хранения [2].

По действующим технологическим схемам, РАО и отходы переработки ОЯТ (ОП ОЯТ) выпариваются и после добавления необходимых химических реагентов направляются на операции кальцинации, остекловывания (витрификации), цементирования и пр. с последующим захоронением. Такие химические методы имеют ряд существенных недостатков.

Если переход к «сухому» хранению ОЯТ является принципиально новым методом хранения отработавшего топлива, то в области переработки ОЯТ и обращения с ОП ОЯТ таковым можно обозначить плазменную переработку [4] с последующей иммобилизацией в расплавах хлоридов металлов (Na, Ca), которая предлагается авторами. В результате образуется субстанция, стойкая к радиационному облучению. Несомненными достоинствами такой технологии можно назвать уменьшение стоимости за счет сокращения количества предельных операций, объема емкостного оборудования, затрат химических реагентов и электроэнергии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электронный ресурс: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2008/10/22/491>.
2. Хвостова М.С. Экологические проблемы накопления отработавшего ядерного топлива в России // Вестник РУДН. Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 2. – С. 104-114.
3. Новоселов И.Ю., Подгорная (Шахматова) О.Д., Шлотгауэр Е.Э., Каренгин А.Г., Кокарев Г.Г. Исследование процесса иммобилизации отходов переработки отработавшего ядерного топлива в расплавах хлоридов металлов в воздушной плазме ВЧФ-разряда // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – №. 2/2. – С. 22-25.

## ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА АММИАЧНО-ХЛОРИДНЫХ МАТОЧНЫХ РАСТВОРОВ

Никишкин И.Ю.

Научный руководитель: Каренгин А.Г., к.ф.-м.н., доцент  
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: nikishkin.il@yandex.ru

За период работы предприятий ядерного топливного цикла накоплены, а также ежегодно образуются огромные объемы низко- и среднеактивных водно-солевых отходов (аммиачные маточные растворы, аммиачно-хлоридные маточные растворы, азотнокислые экстракционные рафинаты, и др.), которые размещают для длительного хранения в бассейнах различного назначения.

В первую очередь направляют на переработку образовавшиеся с течением времени иловые отложения, которые подвергают обезвоживанию, термообработке (выпаривание и прокалка) для уменьшения объема, а затем направляют на цементирование или битумизацию и далее на длительное хранение или захоронение. Данная технология многостадийна и требует значительных трудо- и энергозатрат на обработку таких отходов.

Плазменная обработка диспергированных водных растворов солей или суспензий гидроксидов металлов является одностадийным, гибким и наиболее универсальным методом получения как простых, так и сложных оксидов металлов многоцелевого назначения. Основными достоинствами способа является: высокая скорость процесса; большое число каналов воздействия на физико-химические свойства целевых продуктов; возможность синтеза сложных оксидных соединений.

Однако плазменная обработка только водно-солевых отходов является дорогостоящим процессом из-за высоких удельных энергозатрат (до 4,0 МВт·ч/т). Существенное снижение энергозатрат на процесс обработки таких отходов может быть достигнуто при их плазменной обработке в виде оптимальных по составу диспергированных горючих водно-солеорганических композиций (ВСОК).

В работе представлены результаты моделирования процесса обработки в воздушной плазме водно-солевых отходов в виде аммиачно-хлоридных маточных растворов (АХМР), имеющих следующий характерный состав (г/л):  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  – (70÷80);  $\text{CaCl}_2$  – 5;  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  – 20;  $\text{NH}_4\text{Cl}$  – 4; ПАВ – (0,2÷0,3); U – менее 0,002;  $\text{H}_2\text{O}$  – остальное.

В результате расчетов показателей горючести различных по составу модельных водно-солеорганических композиций на основе этанола (ацетона) и АХМР, обладающих высокой взаимной растворимостью, определены составы ВСОК, имеющие низшую теплотворную способность ( $Q_{\text{нр}} \geq 8,4$  МДж/кг) и адиабатическую температуру горения ( $T_{\text{ад}} \geq 1200$  °С) и обеспечивающие не только существенное снижение затрат энергозатрат на плазменную обработку СНР (до 0,1 МВт·ч/т), но дополнительное получение тепловой энергии для технологических и бытовых нужд (до 2,0 МВт·ч/т).

По результатам термодинамического моделирования исследуемого процесса плазменной обработки таких отходов в виде горючих ВСОК определены и рекомендованы для практической реализации оптимальные режимы их энергоэффективной и экологически безопасной обработки в воздушной плазме.

С учетом полученных результатов проведены экспериментальные исследования процесса плазменной обработки модельных отходов на плазменном стенде «Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01» (рабочая частота 13,56 МГц, колебательная мощность до 60 кВт), и экспериментально подтверждена возможность энергоэффективной плазменной обработки АХМР в воздушно-плазменном потоке в виде диспергированных горючих композиций.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании технологии для эффективной плазменной обработки различных радиационно-загрязненных водно-солевых отходов в виде горючих композиций, а также других жидких радиоактивных отходов создаваемого российского замкнутого ядерного топливного цикла.

# СИНТЕЗ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ОКСИДОВ ИТТРИЯ И ЦИРКОНИЯ ИЗ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ВОДНО-СОЛЕОРГАНИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ В ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЕ

Алюков Е.С.

Научный руководитель: Новоселов И.Ю.

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

E-mail: john.judo@mail.ru

Нанодисперсные порошки оксидов иттрия и циркония занимают в современном материаловедении особое место [1]. Оксид иттрия ( $Y_2O_3$ ) имеет широкий спектр применения. Высокотемпературная керамика из него используется в агрессивных средах (поршни двигателей, детали турбин) благодаря своей химической стойкости. Прозрачная керамика из оксида иттрия обладает высоким светопропусканием в видимой и ИК-области спектра, высокими температурой плавления и термостойкостью, хорошими электрофизическими свойствами. Диоксид циркония ( $ZrO_2$ ) – высокотехнологичный материал, используемый для получения высокоогнеупорных изделий, жаростойких эмалей, тугоплавких стекол, различных видов керамики, пигментов, твердых электролитов, катализаторов, в создании теплозащитных экранов космических аппаратов, в эндопротезировании и стоматологии, для изготовления режущих инструментов т.д.

Выбор способа получения нанодисперсного порошка определяется его назначением, производительностью способа, сложностью и стоимостью используемого оборудования. К недостаткам применяемых способов получения нанодисперсных порошков (лазерный, гидротермальный, золь-гель, осаждение из растворов и др.) следует отнести: многостадийность, продолжительность, низкую производительность, необходимость использования химических реагентов, неоднородное распределение фаз, высокую себестоимость. Для получения нанодисперсных порошков перспективным является применение низкотемпературной плазмы. К преимуществам плазмохимического синтеза нанодисперсных порошков из водно-солевых растворов 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, низкую себестоимость. Однако плазменная обработка только водно-солевых растворов требует значительных затрат электрической энергии (до 4 кВт·ч/кг). Существенное снижение энергозатрат может быть достигнуто при плазменной обработке водно-солевых растворов в виде оптимальных по составу водно-солеорганических композиций (ВСОК).

В работе было изучено влияние состава ВСОК на основе нитрата иттрия (ВСОК-1) и нитрата циркония (ВСОК-2) на низшую теплотворную способность этих композиций, по результатам которого определены оптимальные составы ВСОК-1 и ВСОК-2. Проведено термодинамическое моделирование процесса плазмохимического синтеза оксидов иттрия и циркония: рассчитаны адиабатические температуры плазменной обработки ВСОК-1 и ВСОК-2, определены равновесные составы основных газообразных и конденсированных продуктов обработки ВСОК-1 и ВСОК-2 в воздушной плазме. Из анализа полученных данных определены оптимальные режимы процесса плазмохимического синтеза для каждой ВСОК.

Экспериментальные исследования по получению порошков оксидов иттрия и циркония из ВСОК проведены на лабораторном плазменном стенде. После предварительной подготовки полученные порошки направлялись на исследования: сканирующую электронную микроскопию для изучения морфологии и размера частиц, БЭТ-анализ для определения величины удельной поверхности порошка и рентгенофазовый анализ для изучения фазового состава проб.

Анализ полученных порошков показал, что проба порошка, полученного из ВСОК-1 состоит из  $Y_2O_3$  в кубической фазе, размер частиц составляет 40-60 нм, удельная поверхность порошка 31,01 м<sup>2</sup>/г. Проба порошка, полученного из ВСОК-2 состоит из  $ZrO_2$  в тетрагональной и кубической фазах, размер частиц составляет 60-110 нм, удельная поверхность порошка 12,65 м<sup>2</sup>/г. Результаты анализов подтверждают, что полученные порошки оксидов иттрия и циркония можно отнести к классу нанодисперсных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алымов, М. И. Механические свойства нанокристаллических материалов. – М. : МИФИ, 2004. – 32 с.

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕЗАКТИВАЦИИ ОБЛУЧЕННОГО ГРАФИТА В КИСЛОРОДСОДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Беспала Е.В.<sup>1</sup>, Новоселов И.Ю.<sup>2</sup>, Павлюк А.О.<sup>1</sup>, Котляревский С.Г.<sup>1</sup>, Мударисов О.В.

<sup>1</sup>АО «ОДЦ УГР», г. Северск

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

E-mail: bespala\_evgeny@mail.ru

На сегодняшний день во многих странах, в том числе в России, остановлены все промышленные уран-графитовые ядерные реакторы (ПУГР). Однако при ВЭ некоторых зарубежных реакторов типа Magnox и российских реакторов типа РБМК и ЭГП необходимо проведение работ, связанных с демонтажем графитовой кладки и последующим захоронением радиоактивных отходов (РАО). При этом целесообразно снижать объем графитовых РАО или их удельную активность с целью уменьшения стоимости захоронения.

Ранее в работах [1,2] была показана эффективность использования высокотемпературных методов обработки графитовых поверхностей в инертной среде, что обусловлено возможностью селективного удаления продуктов деления и активации, которые могут находиться в облученном графите. Однако не уделялось внимание вопросам, связанным с переработкой облученного графита в окислительной среде.

В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с взаимодействием химически активного газового потока с поверхностью облученного ядерного графита в широком диапазоне температур. Описан механизм горения графита и показано влияние выделения запасенной энергии на энергетический и массовый баланс системы.

В работе описана математическая модель процесса окисления облученного ядерного графита уран-графитовых реакторов при его термической обработке. Модель использовалась для оценки влияния выделения запасенной энергии (энергии Вигнера) на энергетический и массовый баланс системы. В работе было показано, что качественный и количественный состав газообразных продуктов реакции зависит от термо- и газодинамического режима ведения процесса. Было доказано, что в диапазоне температур 400–700 °С и при скорости подачи газа 0,1 м/с происходит кратковременное изменение температурного режима ведения процесса термообработки за счет отжига дефектов. Однако на состав газообразных продуктов реакции в большей степени влияет скорость набегающего потока. Так при отсутствии конвективных потоков, когда изменение концентрации продуктов реакции происходит только за счет диффузии, влияние выделения запасенной энергии в графите на массовый баланс системы максимально.

Практическое значение полученных результатов заключается в том, что предложенные математические модели и алгоритмы расчета могут быть использованы при оптимизации процессов термообработки облученного графита с целью селективного выделения из него ряда радионуклидов (главным образом С-14 и С1-36), сконцентрированных в тонком приповерхностном слое поверхностей графитовых деталей, а также структурных поверхностей (поры, кристаллиты). При этом задача оптимизации заключается в достижении максимальной степени выделения радионуклидов при минимальной потере массы самого графита за счет окисления путем вариации температурных параметров, параметров состава газовых сред и динамических параметров газовых потоков.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bepala E. Heat transfer during evaporation of cesium from graphite surface in an argon environment / E. Bepala, I. Novoselov, I. Ushakov // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 72. – P.1–5. DOI: 10.1051/mateconf/20167201011.
2. Беспала, Е.В. Влияние газодинамики высокотемпературного потока на эффективность переработки ядерного графита / Е.В. Беспала, А.О. Павлюк, С.Г. Котляревский // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – №23(187). – С.19–25.

# РАСЧЕТ ГАЗОДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ДЛЯ НЕПОЛНОГО ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

Беспала Е.В.<sup>1</sup>, Мышкин В.Ф.<sup>2</sup>, Павлюк А.О.<sup>1</sup>, Макаревич С.В.<sup>2</sup>, Мударисов О.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «ОДЦ УГР», г. Северск

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

E-mail: inovoselov@tpu.ru

Известен эффект сепарации изотопов в химической реакции между радикалами как в жидкости [1], так и в плазменных процессах [2]. Радикалы в жидкости получают путем фотолиза. В низкотемпературной плазме многие вещества находятся в радикальной форме, а степень ионизации не превышает 1–2%. Интерес к процессам в низкотемпературной газоразрядной плазме вызван неравновесностью в распределении по энергетическим уровням компонентов плазмообразующей смеси, что позволяет проводить процессы, не протекающие в равновесных условиях.

Проводили исследования процесса сепарации изотопов углерода при неполном окислении атомарного углерода во внешнем магнитном поле. Для экспериментальных исследований использовали стенд на основе одноэлектродного высокочастотного факельного (ВЧФ) разряда. Факельный разряд возбуждался в плазмохимическом реакторе, который размещался внутри цилиндрического кожуха, при помощи ВЧ генератора мощностью 4 кВт и частотой 27 МГц. Для ввода радикалов углерода в плазменный поток использовали нагреваемый разрядом графитовый электрод. Электрод разогревается до температуры испарения углерода за время 10-15 сек генерации плазменного потока. В верхней части цилиндрического кожуха располагали два патрубка для ввода плазмообразующей смеси, содержащей аргон и кислород. Содержание кислорода поддерживали на уровне, не достаточном для полного окисления паров углерода. Ориентированное перпендикулярно плазменному потоку магнитное поле 20 или 44 мТл создавалось постоянными магнитами.

Для увеличения коэффициента разделения изотопов в плазменных процессах необходимо оптимизировать параметры, оказывающие влияние на протекающие процессы. Также необходимо предпринять меры по разделению оксидов углерода от остаточного углерода. При длительном контакте продуктов плазменных процессов и исходных веществ возможно уменьшение коэффициента разделения изотопов на выходе из реактора. Поэтому исследования, связанные с изучением влияния газодинамики потоков на процесс охлаждения продуктов плазмохимической реакции при спиновой сепарации изотопов в магнитном поле в низкотемпературной плазме, являются актуальными.

Задача исследований – моделирование газодинамики высокотемпературного потока для увеличения скорости охлаждения плазменного потока.

Путем моделирования распределения скоростей потока газа при плазменном окислении изотопов углерода показано, что тангенциальная подача газа в плазмохимический реактор с ВЧФ-разрядом способствует его поджатию в осевой области и стабилизации газового потока. При увеличении расхода плазмообразующего газа возрастает скорость охлаждения продуктов плазменных процессов для цилиндрического реактора постоянного диаметра. Для увеличения эффективности целевых процессов необходимо решать задачу выбора между полнотой протекания целевых процессов и полнотой сохранения достигнутого результата.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00382 мол\_а и при финансовой поддержке гранта УМНИК № 10212ГУ/2015.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Myshkin V.F., Khan V.A., Plekhanov V.G., Izhoikin D.A., Bospala E.V, Spin isotope separation under incomplete carbon oxidation in a low-temperature plasma in an external magnetic field // Russian Phys. J., – 2015. – 57/10. – PP.1442-1448.
2. Myshkin V.F., Izhoikin D.A., Ushakov I.A., Shvetsov V.F., Physical and Chemical Processes Research of Isotope Separation in Plasma under Magnetic Field // Adv. Mater. Res., – 2014. – №880. – PP.128-133.

## SEARCH FOR CERAMIC MATERIAL FOR IMMOBILIZATION OF RADIOACTIVE WASTES

Grigoryev A.S.<sup>1,2</sup>, Chubreev D.O.<sup>1</sup>

Scientific adviser: Antonenko M.V.<sup>1</sup>, candidate of technical sciences, Myshkin V.F.<sup>2</sup>, doctor of physical and mathematical sciences, professor

FSUE «Mining and Chemical Combine», 662972, Zheleznogorsk, Lenin St., 53

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

E-mail: atomlink@mcc.krasnoyarsk.su

Spent fuel rods of industrial uranium-graphite reactors (IUGR) of FSUE «MCC» were stored in Reactor plant (RP) cooling pools. To date a large number of radioactive silt sediments have been formed in the cooling pools. This silt is of a natural origin and of alluvial character and contain beta and gamma activity including <sup>137</sup>Cs, <sup>241</sup>Am, <sup>152</sup>Eu, <sup>154</sup>Eu. At present it is envisaged to extract the silts from the cooling pools with its subsequent solidification and its transfer to National Operator for Radioactive Waste Management [1].

The report considers measures to minimize the amount of RW generated during the decommission of the cooling pools. It is proposed to put the silt sediments in a ceramic matrix, which further is planned to place in the clay belt of the reactor.

In the report the results of studying the properties of kaolin clay, bentonite clay, red clay and loam that are located in the quarries near Zheleznogorsk city are presented. The main components of these clays are SiO<sub>2</sub> (50–64%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (12–20%), components that are contained in smaller quantities are Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, CaO, MgO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O. Also, the composition of the silt sediments of the cooling pools was determined and the radiation resistance of ceramic materials was analyzed.

In accordance with State Standard 21216-2014 "Raw clay. Test methods" the following parameters was determined: sand content in a sample weighing 100 g is 14-80 g; the plasticity number is 9-13; air shrinkage is 8,9-9,24% and fire shrinkage is 8,92-10,08% [2]. Photos of the samples after the research on fire shrinkage are shown in Figure 1.

The study of the water-resistant properties of the samples revealed that the calcined clays possess weak anti-filtration properties. In this regard, as a protective water-repellent coating for the clay after calcination Na<sub>2</sub>O(SiO<sub>2</sub>)<sub>n</sub> was applied [3]. By the results of conducted experimental tests of the coated with a layer of Na<sub>2</sub>O(SiO<sub>2</sub>)<sub>n</sub> samples was determined that red clay possesses the minimum absorption of water (7.5%).

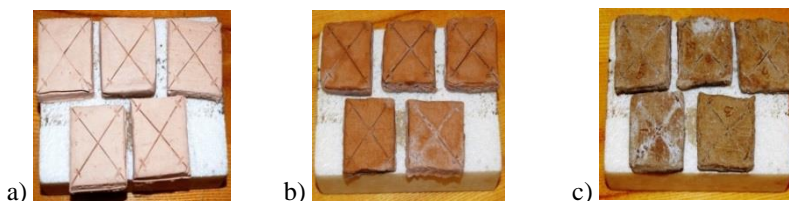


Figure 1 - Samples after sintering: a) kaolin; b) loam; c) red clay.

It is known that the radiation resistance of structural materials depends on their isotopic composition and cross sections of the interactions of these isotopes with ionizing radiation [4]. It should also be expected that the destruction of the clay materials during an interaction with ionizing radiation is connected with their isotopic composition.

Analysis of the  $\gamma$ -radiation interaction with the silt deposits reveals that the radionuclides from the silt deposits have an insignificant influence on the structure of the clay samples. Therefore, it can be considered that both the investigated clay samples and their mixtures are suitable for use as a matrix for immobilization of the MCC radioactive silt deposits. Within the framework of this study additional experimental studies to predict long-term stability and to determine a leaching rate of <sup>137</sup>Cs are planned.

### LIST OF REFERENCES

1. Search for ceramic material for silt deposits of FSUE "MCC" solidification / Proceedings of the "Isotopes: technologies, materials and applications", Tomsk, 19-23.09.2016.
2. State Standard 21216-2014 Raw clay. Test methods
3. N. R. Rahimova, R. Z. Rahimov, O.V. Stoyanov. Composite binders for immobilization of toxic and radioactive wastes // KTU Bulletin, № 4, v. 16, 2013.
4. N. S. Kostyukov, V. I. Dmitriev, G. N. Stepanov, F. Ya. Kharitonov, T. Meykson, L. Gorbaty, B. P. Golubev. Insulating materials for application in thermal neutron flows, USSR Academy of Sciences, High temperature thermophysics, vol. 5, № 2, 1967.

## ПОИСК КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Григорьев А.С.<sup>1,2</sup>, Чубреев Д.О.<sup>2</sup>, Антоненко М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
<sup>2</sup>ФГУП «Горно-химический комбинат», 662972, г. Железногорск, Красноярского края,  
ул. Ленина, д. 53  
E-mail: grigorev\_92@mail.ru

Надежное, безопасное и эффективное обращение с радиоактивными отходами (РАО) на конечной стадии топливного цикла – необходимый компонент ядерной индустрии. Проблема РАО поднимается в различных областях науки, промышленности, медицины, где используются радионуклиды. Так или иначе, РАО образуются в настоящее время практически во всех промышленных странах, и проблема обращения с ними стоит достаточно остро.

При обращении с РАО учитываются два критерия. Первый – РАО не должно оказывать вредного воздействия на человека и окружающую среду, второй – ответственность за обеспечение безопасности РАО лежит на современных получателях выгоды от использования ядерной энергии и не должна перекладываться на следующие поколения [1].

Проводя обзор методов обращения и хранения РАО, можно утверждать, что только включение их в твердые матрицы с получением монокристаллической структуры обеспечивает надежную защиту окружающей среды. Наиболее распространенными методами отверждения РАО являются цементирование, битумирование, остекловывание (витрификация) и включение в керамические формы. В компактной остеклованной (битумированной, цементированной, и пр.) форме такие отходы легче хранить, надежно обеспечивая их изоляцию на длительное время.

Впервые включать продукты деления в стекловидную матрицу было предложено в 1951 году, так как стекло при нагревании способно растворять, а при последующем охлаждении прочно удерживать смесь продуктов деления. Было подтверждено, что получаемый продукт обладает высокой химической и радиационной стойкостью, является изотропным и непористым. В то же время определился главный недостаток стекла – его термодинамическая нестойкость – «расстекловывание» под действием высокой температуры, поддерживаемой радиоактивным распадом. Явление «расстекловывания» ухудшает первоначальные свойства продукта, в частности, возрастает скорость его выщелачивания [1].

Наряду с остекловыванием развиваются и другие методы отверждения отходов, предназначенные для получения более стойких форм, способных сохранять длительное время механическую и химическую стойкость. К таким формам относят стеклокерамику, керметы и др. Идея, заложенная в основу иммобилизации различных радиоактивных отходов в керамику, основана на использовании устойчивых в земной коре минералов, основная масса которых достаточно хорошо изучена. Следует отметить, что керамические формы позволяют включать в них до 50-65 % [1] отходов по массе, что значительно больше, чем стекло.

Таким образом, стоит выделить несколько критериев, которыми необходимо руководствоваться при выборе стекла или керамики для иммобилизации радиоактивных отходов:

1. Преимуществом остеклованной формы является одноэтапность технологического режима приготовления. Энергоемкость и сложность технологии керамики делает ее приготовление более дорогостоящей.

2. Достоинством керамики является ее термодинамическая стабильность и более высокая гидротермальная и радиационная стойкость, особенно в отношении актинидов. Однако использование керамики ограничивается составом РАО.

3. Стекло менее чувствительно к изменению состава в потоках отходов. Так, боросиликатное стекло допускает изменения в содержании Fe, Al, Mn, Ca и Ni в 2-3 раза без значительного снижения выщелачиваемости.

4. Несмотря на то, что керамика превосходит стекло в отношении термической и механической стабильности, эти показатели стекла достаточно высоки, чтобы оно было приемлемой формой для безопасного включения РАО.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекман И.Н. Ядерная индустрия. Курс лекций. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 867 с.

# ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛ-ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «Mo-UO<sub>2</sub>»

Котельникова А.А.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: m\_aak135@tpu.ru

Ядерное топливо (ЯТ) из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, имеет ряд существенных недостатков [1]: низкая теплопроводность, высокая хрупкость и склонность к растрескиванию, короткий цикл использования, ограниченный ресурс изотопа уран-235 и др. Это стало причиной замедления развития атомной энергетики и привело к отказу в ряде стран.

Перспективным направлением является создание дисперсионного ЯТ, которое характеризуется отсутствием прямых контактов между частицами топлива благодаря их равномерному распределению в матрице и обладает следующими преимуществами [2]: высокая теплопроводность и механические свойства, высокое «выгорание» делящихся материалов, радиационная стойкость и прочность; локализация продуктов деления и др.

Для получения металл-оксидных композиций перспективным является применение низкотемпературной плазмы. К преимуществам плазмохимического синтеза металл-оксидных композиций из водно-солевых композиций следует отнести [3,4]: одностадийность; высокую скорость; гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом; возможность активно влиять на размер и морфологию частиц; компактность технологического оборудования; низкие удельные энергозатраты.

В работе рассмотрена возможность применения окислительной и восстановительной плазмы для плазмохимического синтеза металл-оксидных композиций «Mo-UO<sub>2</sub>» из водно-солевых композиций (ВСК) «молибденовая кислота-нитрат уранила» и «молибденовая кислота-ацетат уранила».

Проведен расчет составов ВСК и режимов их плазменной обработки, обеспечивающих плазмохимический синтез композиций «Mo-UO<sub>2</sub>». Расчеты проведены при атмосферном давлении (0,1 МПа), в широком диапазоне температур (300-4000 К), с использованием различных плазменных теплоносителей (воздух, водород).

В результате проведенных расчетов определены оптимальные по составу водно-солевые композиции ВСК-1 (на основе молибденовой кислоты и нитрата уранила) и ВСК-2 (на основе молибденовой кислоты и ацетата уранила), а также режимы их плазменной обработки (массовое отношение фаз, температура), обеспечивающие плазмохимический синтез МОК «40 % Mo-60 % UO<sub>2</sub>» в восстановительной водородной плазме.

Проведен расчет коэффициентов теплопроводности для МОК «40 % Mo-60 % UO<sub>2</sub>», состоящих из непрерывной компоненты (матрицы из молибдена), в которой упорядоченно распределены включения из керамики в виде диоксида урана. Особое внимание уделено методам расчета коэффициентов теплопроводности данных композиций с использованием различных моделей. Проведено сравнение полученных расчетных данных с результатами экспериментов.

В результате проведенных расчетов коэффициентов теплопроводности металл-оксидных композиций с использованием ряда моделей показано, что модель с замкнутыми включениями Одолевского наиболее точно описывает экспериментальные данные для коэффициента теплопроводности  $\lambda$  композиционного материала МОК «40 % Mo-60 % UO<sub>2</sub>».

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании различных металл-оксидных композиций для дисперсионного ядерного топлива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котельников Р.Б. и др. Высокотемпературное ядерное топливо. – М.: Атомиздат, 1978. – 432 с.
2. Алексеев С. В. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015.–248 с.
3. Toumanov I.N., Sigailo A. V. Plasma Synthesis of Disperse Oxide Materials from Disintegrated Solutions // Materials Science and Engineering. 1991.– Vol. A140.– P. 539-548.
4. Туманов Ю. Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. – М.: «Физматлит», 2003. – 759 с.



# ISOTOPIC COMPOSITION AND RADIATION CHARACTERISTICS OF THE 4TH GENERATION REACTOR SPENT FUEL

Shamanin I. V., Bedenko S. V., Knyshev V. V., Ukrainets O. A., Zor'kin A. I.  
National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia  
E-mail: [bedenko@tpu.ru](mailto:bedenko@tpu.ru)

Neutron transfer computational methods are used in reactor physics, in process control of nuclear fuel manufacturing and reprocessing, in determination of spent fuel burn-up, in biological protecting design as well as in perfection of nuclear materials handling procedures and regulations. The computational method which is based on the draw of neutron interaction probability is called Monte-Carlo method [1].

There are a lot of specialized software applications and computational codes implementing Monte Carlo method. The following packaged programs: MMKKENO and MMKC (State Scientific Center of the Russian Federation, Institute for Physics and Power Engineering), MCU (National Research Center «Kurchatov Institute», Russia), MCNP (USA), KENO-3D (USA), MONK (Great Britain) and other, are internationally-recognized. These programs allow getting high precision results due to creation of three-dimensional geometry, simulating the object and the process of real neutron transfer in the matter.

High accuracy of the verified computational codes based on Monte Carlo method is achieved by consumption of huge computing resources and is determined mainly by the fault in interaction cross section of neutrons with the matter nuclei. Algorithms based on group and subgroup approaches used when solving Boltzmann equation (neutron-transport equation) [2], do not require big computational resources. Although, the accuracy of the desired functional ( $\Phi(\mathbf{r}, E, t)$ ,  $\Sigma(\mathbf{r}, E)$ ,  $k_{\text{eff}}$ ) in such solutions is lower, multigroup diffusion approximation is considered suitable and is currently used in Russian and foreign programs. For example, there is a multigroup module in MCNP and many other programs. Using additional computational procedures such approaches significantly simplify the principle simulation stage, which consists in transport equation solution. In some cases they provide an accurate and reliable result [3]. In the present paper computation of neutron generation intensity and neutron spectrum distribution is an additional procedure.

It should be noted that in the solution of the transport equation (irrespective of the solution method) in subcritical systems neutron spectral distribution has the determining value. When the number of calculated iteration increases, such approach makes it possible to improve the neutron-physical functions.

Neutrons in spent nuclear fuel are created due to spontaneous and induced fission and as a result of ( $\alpha, n$ )-reactions on light elements nuclei. In case of the traditional  $\text{UO}_2$  ( $\alpha, n$ )- reaction proceeds on oxygen. For burnup fuel of the researched reactor there are some other nuclei besides oxygen on which such reaction is possible, namely: C – carbon, PyC – pyrolytic carbon,  $\text{TiSiC}_2$  – titanium silicon carbide,  $\text{SiC}_2$  – silicon carbide.

The normalized neutron spectrum on carbon is essentially higher, than on oxygen [4,5]. Consequently, for creating an efficient instrument used for developing procedures and regulations of spent fuel handling ( $\alpha, n$ )-reaction should be treated separately as an independent task.

Computation of intensity and neutron spectrum of spontaneous and induced fission is not a difficult task. But calculation of ( $\alpha, n$ )-neutron spectrum is a more complicated task which is solved using such specialized programs as NEDIS-2.0, SOURCE-4C and other.

At present the developers of these programs pay great attention to accuracy of the neutron yield computation. However, existing high precision experimental data show significant variation (10 % and even more) with calculated estimates carried out using NEDIS and SOURCE.

In the present paper spectral neutron distribution was obtained using approximation of an extensive list of experimental (Experimental Nuclear Reaction Data – EXFOR) and computation data (Evaluated Nuclear Structure Data File – ENSDF).

## REFERENCES

1. Bell D, Glesston S M 1974 Teoriya jadernyh reaktorov [Theory of nuclear reactors]. Atomizdat, 1974. (in Russian).
2. Abagyan L P, Bazazyanets N O, Nikolaev M ., Tsibulya A. M. 1981 Gruppovye konstanty dl'ya rascheta jadernyh reaktorov Moscow [Group constants for the calculation of nuclear reactors]. *Energoatomizdat* (in Russian).
3. Plevaka M N, Bedenko S V, Gubaidulin I M, Knyshev V V 2015 Neutron-physical studies of dry storage systems of promising fuel compositions. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* **42**, 240–243.
4. Heaton R, Lee H, Skensved P, Robertson B C 1989 Neutron production from thick-target ( $\alpha, n$ ) reactions. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **276**, 529–538.
5. Murata T, Shibata K, et al 2002 Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3. *J. Nucl. Sci. Technol.* **39**, 76–79.

*Секция 4*

**ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОТОПОВ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ,  
ПРИКЛАДНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И  
МЕДИЦИНЕ. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОТОПНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

*Председатель: д.т.н., доцент Д.Г. Видяев*

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ NaCl ИЗ ВОДНОГО РАСТВОРА, НАХОДЯЩЕГОСЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Макаревич<sup>1</sup> С.В., Григорьев<sup>1,2</sup> А.С., Загузин<sup>1</sup> И.Ю., Юрьев<sup>1</sup> П.А.

Научный руководитель: Мышкин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор

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

<sup>2</sup>ФЯО «Горно-химический комбинат», Красноярский край, г. [Железногорск](#), ул.Ленина, 53

E-mail: gos100@tpu.ru

Использование материалов, изотопный состав которых отличается от природного, в некоторых случаях может обуславливать существенное изменение потребительских свойств материалов различного применения. Расширению сферы применения изотопов препятствует высокая стоимость изотопной продукции. Поэтому актуально установление и изучение ранее не исследованных изотопных эффектов. Эти исследования направлены на разработку новых методов разделения стабильных изотопов или формирования структуры твердого тела с разными концентрациями изотопов. Последнее направление развивается как изотопная инженерия. При этом исходное сырье может иметь любой изотопный состав, в том числе природный.

Известно, что в твердых телах, содержащих двухкомпонентную смесь изотопов, неизбежно формируются кластеры из изотопов, обуславливающее изотопное разупорядочение. Это разупорядочение может изменить фоновую теплопроводность, электрофизические и другие свойства. Формирование изотопной сверхрешетки, упорядоченной структуры, содержащей моноизотопные области, также приводит к значительному изменению некоторых свойств кристаллов. Такая структура, например, будет иметь анизотропию теплопроводности и электропроводности. Поэтому в работе ставилась задача изучения особенностей роста кристаллов NaCl из пересыщенного водного раствора во внешнем постоянном магнитном поле.

Известны два основных способа поддержания заданной степени пересыщения, необходимой для непрерывного роста кристаллов: испарение растворителя и охлаждение раствора. Растворимость поваренной соли в воде незначительно зависит от температуры. Поэтому кристаллизацию проводили за счет вакуумного испарения воды. В вакуумных условиях кристаллизация протекает в результате адиабатического испарения части растворителя при пониженном давлении. При этом на испарение растворителя расходуется теплота раствора, что приводит к его охлаждению. Для получения необходимого количества кристаллов раствор, имеющий объем 300 мл, испаряли на 10%.

Магнитное поле изменяет скорость кристаллизации из водных растворов за счет формирования различия в скоростях спиновой динамики изотопов одного элемента. Очевидно, что кроме величины магнитного поля необходимо оптимизировать скорость кристаллизации, зависящей от температуры раствора, разряжения атмосферы над раствором.

Для проведения исследований по формированию обогащенных по изотопам слоев кристаллов NaCl из водных растворов, была разработана экспериментальная установка, содержащая следующие узлы: колба Бунзена с раствором NaCl; вытяжная установка, создающая давление 1 мм.рт.ст.; источник постоянного магнитного поля; вакуумметр. Пересыщенный раствор предварительно отстаивали для удаления нерастворимых примесей.

При кристаллизации, после заливки раствора, откачивали воздух из колбы до давления 20 мм рт.ст. При таком давлении колбу выдерживали в течении 30 мин. Далее давление уменьшали до 5 мм рт.ст. на все время кристаллизации. Вокруг кюветы периодически создавали постоянное магнитное поле в диапазоне 20-80 мТл в течении 30 мин. Магнитное воздействие повторяли через 30 мин кристаллизации без магнитного поля.

На дне колбы образовывались кристаллы правильной формы. Кристаллы неправильной формы также образовывались на стенках кюветы и на поверхности пересыщенного водного раствора. Через время, необходимое для испарения заданного количества растворителя, остаточный раствор сливали, а кристаллы промывали ацетоном и высушивали в вакууме. В дальнейшем определяли размеры кристаллов с помощью оптического микроскопа.

Установлено, что размеры кристаллов правильной формы, образовавшихся на дне кюветы без магнитного поля не превышают 1,5 мм. В магнитном поле образуется большое количество кристаллов размером более 50 мкм, а крупная фракция, наблюдаемая визуально, до 2 раз мельче, чем без поля. Такое отличие в размерах связано с увеличением скорости образования зародышей новой фазы. Поэтому вместо роста кристаллов происходит зарождение новых кристаллов. В докладе подробно анализируется и обосновываются причины наблюдаемых результатов.

Исследования финансировались в рамках гранта РФФИ №16-08-00246.

# ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОТОПНЫХ КЛАСТЕРОВ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Хорохорин<sup>1</sup> Д.М., Загузин<sup>2</sup> И.Ю., Юрьев<sup>2</sup> П.А., Леонтьева<sup>2</sup> Д.А.

Научный руководитель: Хан В.А., д.т.н.

<sup>1</sup>ФЯО «Горно-химический комбинат», Красноярский край, г.Железногорск, ул.Ленина, 53

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

E-mail: nt.centre@mail.ru

Основой всех используемых человечеством устройств и механизмов, в том числе в ядерных энергетических устройствах, является материаловедение [1]. На современном этапе материаловедение достигло высокого уровня развития. Скачок в материаловедении был совершен в связи с разработкой мезомеханического подхода анализа прочности твердых тел. Следующим прорывом в материаловедении может быть использование специально формируемых изотопных структур – изотопное материаловедение [2, 3]. Препятствием в этой области является высокая стоимость изотопной продукции. Поэтому несомненно актуальным является поиск методов формирования изотопных структур из соединений природного изотопного состава. Известны два класса твердых тел – стекла и кристаллы. Однокомпонентные стекла и монокристаллы являются простыми и достаточно однородными твердыми телами. В этом случае неоднородности, в основном, связаны с неизбежным структурным несовершенством твердых тел. Поликристаллические твердые тела могут состоять из нескольких отличных друг от друга достаточно однородных микрокристаллов, которые скреплены межкристаллическим веществом. При этом межкристаллическое вещество по своим свойствам и составу существенно отличается от каждого из имеющихся микрокристаллов. Также следует учесть, что каждая из фаз может иметь изотопный состав, который может отличаться от среднего по объему микрокристалла величине (природный изотопный состав химических элементов). При этом следует учесть, что из 92 стабильных элементов 21 являются моноизотопными.

Изотопы одного элемента незначительно отличаются по большинству физико-химических свойств. Однако, по эффективности взаимодействия с ионизирующим излучением [4] и скоростью протекания химических реакций во внешнем постоянном или переменном магнитном полях изотопы могут сильно различаться [5]. При этом в основе процессов формирования отдельных молекул и образования твердой фазы лежит одно и то же явление – образование ковалентных связей, даже в типичных кристаллах с ионной связью. Логично, что скорости формирования и разрушения ковалентных связей в твердых телах коррелированы. Поэтому можно предположить, что скорость разрушения твердых тел, протекающая одновременно с непрерывным восстановлением части разрушенных связей, будет зависеть как от изотопного состава, так их пространственного распределения.

Известно, что тяжелые изотопы одного химического элемента имеют большую энергию связи и меньший параметр кристаллической решетки, чем более легкие изотопы [6]. Это приводит к формированию изотопных кластеров в твердых телах, а также к изотопному разупорядочению в кристаллах. В природных минералах обнаружены кластеры тяжелых изотопов, в которых тяжелые изотопы кислорода и углерода присутствуют одновременно [7].

В докладе анализируются возможности и перспективы метода формирования изотопных кластеров заданного размера из материалов природного изотопного состава с помощью внешнего постоянного магнитного поля. Приводятся количественные характеристики возможных изменений материаловедческих параметров твердых тел, содержащих два изотопа.

Исследования финансировались в рамках гранта РФФИ №16-08-00246.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физическое материаловедение: Учебник для вузов: В 6 т. /Под общей ред. Б.А. Калина. – М.: МИФИ, 2008.
2. Haller E.E. Isotopically engineered semiconductors // *Applied Physics Reviews* **77** (7), 1 April 1995.
3. Berezin, A.A., Isotopicity: implications and applications // *Interdisciplinary Science Reviews*, 17 (1), pp. 74-80, 1992.
4. Радиационный захват нейтронов: Справочник / Т. С. Беланова, А. В. Игнатюк, А. Б. Пашенко, В. И. Пляскин. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 248 с.
5. Бучаченко А.Л. Магнитный изотопный эффект в пластичности диамагнитных кристаллов // *Письма в ЖЭТФ*, 2006, Т.84, Вып.9, С.590-591.
6. Магомедов М.Н. О возможности создания нового вида фуллереновых структур путем изотопного замещения углерода // *Письма о материалах* т. 4 №1 (2014) 22-24.
7. Whiticar M. J., Suess E. The cold carbonate connection between Mono Lake, California and the Bransfield Strait, Antarctica // *Aquatic Geochem.* 1998. Vol. 4. P. 429—454.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАВЛЕНИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ СЕЛЕНА

Егоров Н.Б., Зайцева А.С.

Научный руководитель: Жерин И.И., д.х.н., профессор

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

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

Среди проблем современного материаловедения исследования свойств изотопно-чистых соединений относятся к тем, которые призваны определить в будущем основные наукоемкие технические достижения. В связи с этим большой научный интерес представляет всестороннее исследование свойств изотопно-чистых веществ, познание которых позволит определить потенциальные возможности их практического применения.

Целью данной работы было определение параметров плавления (энтальпии и температуры плавления) стабильных изотопов селена.

Селен относится к стеклообразным полупроводникам, которые интересуют исследователей благодаря тому, что являются материалами для применения во многих отраслях электроники и оптоэлектроники. Они прозрачны в видимой и ближней ИК-области спектра, обладают высокой фоточувствительностью, оптической нелинейностью. Данные материалы изменяют свои электрические, фотоэлектрические и оптические свойства под действием света, обладают фотолюминесценцией со стоковым сдвигом и т.д. Природный селен состоит из смеси стабильных изотопов с массовыми числами 82, 80, 78, 77, 76 и 74 относительное содержание которых составляет соответственно 9,19 %, 49,82 %, 23,52 %, 7,58 %, 9,02 % и 0,87%.

Изотопы селена в основном используются для производства медицинских и промышленных радиоизотопов. Так  $^{77}\text{Se}$  и  $^{78}\text{Se}$  используются для производства терапевтического радиоизотопа  $^{77}\text{Br}$ .  $^{80}\text{Se}$  используется для производства медицинского радиоизотопа  $^{80\text{m}}\text{Br}$ .  $^{74}\text{Se}$  используется для производства  $^{75}\text{Se}$ , который используется в качестве источника в гамма-радиографии.  $^{76}\text{Se}$  может использоваться для производства медицинских изотопов  $^{75}\text{Br}$  и  $^{76}\text{Br}$ .  $^{82}\text{Se}$  использовался для изучения двойного бета-распада. Некоторые сведения о физико-химических свойствах моноизотопа  $^{80}\text{Se}$  представлены в работе [1].

В настоящей работе использовали изотопы селена производства АО «Сибирский химический комбинат» с изотопной чистотой:  $^{76}\text{Se}$  – 99,8 %,  $^{78}\text{Se}$  – 99,3 %,  $^{80}\text{Se}$  – 99,9 %,  $^{82}\text{Se}$  – 99,0 %. Для получения химически чистого селена изотопы подвергали трехкратной дистилляции при температуре 400 °С и низком вакууме с последующим их отжигом в вакууме при температуре 210 °С в течение 48 часов. Полученные таким образом изотопы селена имели химическую чистоту не менее 99,9 %.

Предварительно было исследовано влияние массы и скорости нагрева на параметры плавления селена с природным изотопным составом. Эксперимент проводили на совмещенном ТГА/ДТА/ДСК анализаторе SDT Q600. Было определено, что наиболее близкие значения к табличным параметрам плавления селена соответствуют при 5 мг навески и скорости нагрева равной 4 град/мин.

Температуры плавления и энтальпии плавления изотопов селена гексагональной модификации были измерены на дифференциальном сканирующем калориметре DSC Q2000 с навеской 5 мг и скоростью 4 град/мин. Каждый образец снимали не менее шести раз и определяли средние значения энтальпий плавления изотопов селена, которые представлены в таблице.

Таблица. Параметры плавления стабильных изотопов селена

Параметр	$^{76}\text{Se}$	$^{78}\text{Se}$	$^{80}\text{Se}$	$^{82}\text{Se}$
$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	221,00	220,88	220,78	220,70
$\Delta H_{\text{пл}}, \text{кДж/моль}$	5,869	5,853	5,836	5,817

Из данных таблицы следует, что с увеличением массы изотопа температура и энтальпия плавления стабильных изотопов селена понижаются. Наблюдаемые изотопные эффекты по всей видимости определяются суммой нескольких различных по природе эффектов, а именно, взаимодействием между атомами соседних цепочек и зависимостью амплитуды колебаний атомов селена от массы изотопа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суханов М. В. Теплофизические свойства и кристаллическая структура особо чистого моноизотопного  $^{80}\text{Se}$  / М. В. Суханов, А. Д. Плехович, Т. В. Котерева, А. М. Гибин, А. М. Потапов, А. М. Кутын, М. Ф. Чурбанов // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 466. – № 3. – С. 302 – 305.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В БАЛЬНЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Кабанов Д.В., Меркулов В.Г.

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

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

Санаторно-курортное лечение в Российской Федерации основано на применении природных лечебных ресурсов в сочетании с физиотерапевтическими и медикаментозными методами, причем природным ресурсам отводится главенствующая роль. К природным лечебным ресурсам относятся ландшафты, биоклимат и гидроминеральные ресурсы (минеральные воды и лечебные грязи). Лечебные свойства природных объектов и условий устанавливаются на основании научных исследований, многолетней практики и утверждаются федеральным органом исполнительной власти, ведающим вопросами здравоохранения.

В пределах обширной территории РФ, характеризующейся исключительно разнообразными физико-географическими и геологическими условиями, распространены различные по составу и свойствам лечебные минеральные воды и лечебные грязи (бальнеологические объекты). Химический состав исследуемых образцов является результатом сложного сочетания природных процессов и антропогенного воздействия, и зависит от множества факторов. Достоверной и объективной формой учета информации о различных природных ресурсах являются кадастры, позволяющие на основе анализа состояния природных объектов, дать объективную оценку, выбрать оптимальные направления и объём их использования.

Таким образом, оценка современного состояния изучаемых объектов исследуемых территорий, возможностей курортно-рекреационного освоения, учет и определение направлений рационального использования природных лечебных ресурсов, приобретает не только теоретическое, но и важное практическое значение.

Целью данной работы являлось, и проводится в настоящее время, определение содержания природных и техногенных радионуклидов в водных объектах и лечебных грязях с различных территорий РФ.

Для проведения нейтронно-активационного определения тяжелых металлов (Zn, Mn, Cu, Co, Hg, Cd) анализируемые пробы предварительно сушили, взвешивали и упаковывали совместно с аттестованными стандартными образцами схожего химического состава, облучали в потоке тепловых нейтронов  $5 \cdot 10^{13}$  нейтр/(см<sup>2</sup>·с) на реакторе ИРТ-Т ТПУ. Время облучения составляло от нескольких секунд до 5ч, при анализе на короткоживущие и долгоживущие изотопы соответственно. Перед измерением облученные образцы распаковывались и переносились в полиэтиленовые измерительные емкости. Измерение активностей радиоаналитических изотопов определяемых элементов проводили с использованием гамма-спектрометра на базе многоканального анализатора и ОЧГ-детектора (Canberra, USA). Далее производили расчет содержания элементов в представленных образцах.

При анализе исследуемых проб на содержание естественных радионуклидов (Ra-226, Th-232, U-238), упаковывали в сосуды геометрии Дента или Маринелли, плотно герметизировали и выдерживали для наступления в системе равновесия. После пробы измеряли на низкофоновой установке, рассчитывали содержание радионуклидов и делали вывод о соответствии нормативным документам (НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99/2010). В таблице 1 представлены результаты о содержании радионуклидов в одной из исследуемых проб за определённый период времени.

Таблица 1. Содержание естественных и техногенных радионуклидов в пробы подземной минеральной воды из п.Оз.Карачи Новосибирской области, Бк/л.

	2011г.	2012г.	2013г.	2014г.	2015г.	2016г.
A <sub>Ra</sub>	0,6	1,0	0,5	0,2	0,2	0,2
A <sub>Th</sub>	<1,0	0,8	0,3	<0,6	<0,6	<0,5
A <sub>U</sub>	<1,0	<0,5	<1,0	1,2	1,2	1,0
A <sub>Cs</sub>	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5

В результате проведенных работ определено содержание естественных и техногенных радионуклидов в лечебных водах и грязях с различных курортно-рекреационных территорий РФ. Освоена методика по определению содержания радионуклидов в данных объектах, приобретен огромный опыт в подобных исследованиях, накоплена статистика по содержанию радионуклидов на исследуемых территориях за большой период времени, прослежена динамика изменения содержания радионуклидов в зависимости от исследуемой территории и геологических структур подстилающей поверхности.

# ФОРМИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО ПОЛЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Емец Е.Г., Головацкий А.В., Худолеев П.Н.

Научный руководитель: Варлачев В.А., д.т.н., профессор

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

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

В науке постоянно растёт интерес к повышению радиационной стойкости полупроводниковых материалов, работающих в условиях повышенного ионизирующего излучения (ИИ), особенно при производстве аппаратов для космоса. Известно, что под действием ИИ изменяются свойства всех материалов. Например, у полупроводниковых приборов ухудшаются их электрофизические характеристики, вплоть до выхода их из строя. Для изделий из таких материалов необходимо уделять особое внимание исследованиям по влиянию нейтронного, протонного, альфа и электронного излучений на изменение их характеристик. Проведение подобных исследований требует создания установок, позволяющих исследовать образцы в условиях приближенных к реальным. Нами была создана установка для исследований влияния нейтронного излучения на полупроводниковые материалы.

В качестве источника быстрых нейтронов выбран горизонтальный экспериментальный канал ГЭК-6 исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т Национального исследовательского Томского политехнического университета.

В ходе работы была создана полномасштабная модель реактора со всеми экспериментальными каналами с помощью пакета программы MCU5 [1]. С помощью неё были получены: спектр в канале, распределение плотности потока нейтронов с энергиями более 0,1 МэВ по длине канала. Кроме того, в работе моделировалось влияние кадмиевого фильтра в различных геометриях для снижения плотности потока тепловых нейтронов в точке облучения образцов.



Рисунок 1. Распределение плотности потока тепловых нейтронов по длине канала ГЭК-6 с установленным кадмиевым стаканом на удалении от а.з. на расстоянии 53 см

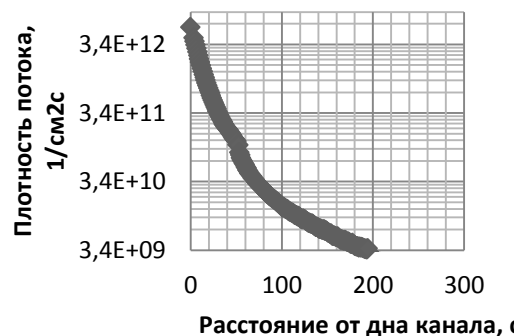


Рисунок 2. Распределение плотности потока быстрых нейтронов по длине канала ГЭК-6 с установленным кадмиевым стаканом на удалении от а.з. на расстоянии 53 см

Для проверки результатов теоретических расчетов были проведены экспериментальные измерения спектра нейтронов в созданной установке. Определение плотности потока быстрых нейтронов проведено методом пороговых серных детекторов [2], которые облучались в такой же геометрии. При этом сам облучатель был обернут в кадмиевый фильтр толщиной 0,5 мм и длиной 50 см. Затем спустя примерно сутки серные детекторы измерялись на пересчетном устройстве ОСУ-П и по методике, аттестованной ВНИИФТРИ вычислялась плотность потока быстрых нейтронов, которая составила  $2,0 \cdot 10^{10}$  нейтр./(см<sup>2</sup>·с) и оказалась на 30% ниже расчетной.

Результаты расчетов позволили оптимизировать геометрию установки. Они показали, что оптимальным положением облучателя будет удаление от активной зоны реактора на 53 см с установленным кадмиевым фильтром в виде стакана, дно которого имеет засыпку из карбида бора толщиной 1 см.

На созданной установке были проведены пробные испытания полупроводниковых материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гомин Е.А. Программа MCU5TPU // РИЦ «Курчатовский институт», институт ядерных реакторов. – М., 2007.
2. Ломакин С.С., Петров В.И., Самойлов П.С. Радиометрия нейтронов активационным методом. – М.: Атомиздат, 1975. – 203 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТИВОТОЧНОГО ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ФАЗ В НАСАДОЧНОЙ КОЛОННЕ ДЛЯ СИСТЕМЫ «ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ»

Родионов А.В., Верхорубов Д.Л.

Научный руководитель: Видяев Д.Г., д.т.н., доцент

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

E-mail: ozushnik@gmail.com

Известно, что для очистки соединений лёгких щелочных металлов и разделения их изотопов на практике чаще всего используются два, реализуемые для систем «жидкость–жидкость», метода разделения – амальгамный обмен и экстракция [1–2]. Экстракционный метод обладает хорошими разделительными характеристиками и принципиальной возможностью организации непрерывного обменного процесса в колоннах и актуален для производств, где требуется регенерация ценных продуктов, высокая степень извлечения веществ, чувствительных к высоким температурам, а также разделение смесей, состоящих из веществ с близкими физико-химическими свойствами.

Для проведения экстракции используют специальные колонны – экстракторы, которые имеют различную конструкцию и могут объединяться в каскады для обеспечения многократного умножения однократного эффекта разделения. Однако различные экстракционные аппараты показывают различную эффективность и не все экстракционные системы применимы для колонного разделения. Проведение натурных испытаний эффективности экстрактора и пригодности той или иной системы невыгодно из-за больших материальных затрат. В связи с этим становятся актуальными исследования, направленные на проведение численного анализа параметров и оптимизации работы экстракционных колонн различного типа в зависимости от систем и условий их эксплуатации. Данная работа является частью этих исследований и ставит целью разработать модель и провести расчет основных параметров процесса экстракции протекающего при противоточном движении двух несмешивающихся жидкостей в насадочной колонне и сопоставить их с параметрами роторного экстрактора.

В ходе выполнения работы была создана модель, описывающая протекания процесса экстракции в насадочной колонне и отработана методика расчета роторно-дискового экстрактора, что позволило определить такие показатели процесса, как скорости движения фаз и скорости захлебывания по дисперсной и сплошной фазам, а также рассчитать массообменные параметры процесса экстракции: удельную межфазовую поверхность и высоту единицы переноса.

Исследования проводились для экстракции диэтиламина из водного раствора толуолом, имеющим перспективы совместного с высокоэффективными краун-эфирами использования для экстракции щелочных металлов. В качестве насадки были выбраны простые по конструкции и недорогие в исполнении кольца Рашига.

Анализ расчетных данных показал, что при одинаковой пропускной способности диаметр капель в насадочной колонне примерно в 3,5 раза больше, чем в роторно-дисковой. Таким образом, насадочная колонна имеет значительно менее развитую межфазовую поверхность и процесс массопереноса в ней протекает менее эффективно, а в результате полная высота ее в два раза больше высоты роторно-дискового экстрактора. Следовательно, необходимо провести подбор и оптимизацию типа насадочных элементов, что позволит повысить эффективность процесса массопереноса в насадочной экстракционной колонне и обеспечит сопоставимость его скорости со скоростью в роторно-дисковом экстракторе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экстракция металлов фенолами/ А.И. Холькин, Л.М. Гиндин, Л.С. Маркова, И.С. Штильман; Под ред. А.В. Николаева. – Новосибирск: Наука, 1976. – 192 с.
2. Андреев Б.М., Зельвенский Я.Д., Котальников С.Г. Разделение стабильных изотопов физико-химическими методами. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 208 с.



# ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ В КАЧЕСТВЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ТАБЛЕТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Борецкий Е.А.,<sup>1</sup> Верхорубов Д.Л.,<sup>1</sup> Савостиков Д.В.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Видяев Д.Г., д.т.н., доцент

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

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 40  
E-mail: eboretsky@mail.ru

Одной из важных проблем, затрудняющих развитие водородной энергетики, является низкая скорость проникновения водорода в поры углеродных материалов. На сегодняшний день известно, что время сорбции может изменяться от нескольких часов до нескольких сотен и тысяч часов.

Одним из способов повышения скорости сорбции водорода является внедрение в углеродный материал различных катализаторов, способствующих диссоциации молекул водорода. Известно, что скорость диффузии атомарного водорода выше скорости диффузии молекулярного, поэтому, диссоциация молекул водорода значительно уменьшит время диффузии водорода в поры технического углерода и тем самым увеличится скорость сорбции. В качестве катализатора могут выступать Ti, V, Fe, Ni, Mo, Pd, W, Pt и др. [1].

С другой стороны, увеличить скорость сорбции можно за счет увеличения площади поверхности контакта. При использовании технического углерода это можно обеспечить приданием ему заданной формы, например таблетки, с развитой пористой структурой за счет использования в процессе изготовления таблеток вспомогательных материалов – пластификаторов. Как правило, в качестве таких пластификаторов выступают парафины, воски и стеараты. Использование парафинов и восков в качестве материала-пластификатора не является целесообразным, поскольку эти вещества не выгорают полностью в процессе обжига. Стеараты в свою очередь лишены этого недостатка.

Таким образом, на основании вышесказанного можно сделать вывод, что наиболее подходящим вспомогательным веществом для таблетирования технического углерода будет стеарат одного из упомянутых ранее металлов, так как после обжига заготовки в ее порах останется только этот металл.

В связи с этим нами произведена оценка диффузии водорода в объем углеродного образца содержащий никель или титан с помощью известного уравнения Аррениуса:

$$D = D_0 \exp(-E/RT), \quad (1)$$

где  $D_0$  – предэкспоненциальный фактор,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $E$  – энергия активации диффузии,  $\text{кДж}/\text{моль}$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$ ;  $T$  – температура,  $\text{К}$ .

На основании литературных данных установлено, что для титана и никеля величина  $D_0$  соответственно составляет  $6,4\cdot 10^{-6}$  и  $1,5\cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , а  $E$ , соответственно, 53,7 и 32,4  $\text{кДж}/\text{моль}$  [2, 3].

В результате расчетов установлено, что величина коэффициента диффузии неуклонно растет с увеличением температуры. Особенно резкий рост наблюдается в диапазоне температур 300 – 700 К, после чего скорость нарастания снижается. Кроме того, показано, что скорость процесса возрастает в ряде титан – никель. Таким образом, представляется перспективным проведение экспериментальных исследований сорбционных, по отношению к водороду, свойств углеродных таблеток содержащих никель.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 21769812180458, 20.12.2001.
2. Лучинский Г.П. Химия титана. – М.: Химия, 1971. – 472 с.
3. Полетаев Г.М., Кулабухова Н.А., Старостенков М.Д. // Химическая физика и мезоскопия. – 2011. – Т.13, № 3. – С. 411–418.

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕЙТРОН-ЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СОЕДИНЕНИЙ ЛИТИЯ, БОРА И ГАДОЛИНИЯ

Тюделеков Е.А.<sup>1</sup>, Видяева Н.Н.,<sup>2</sup> Родионов А.В.<sup>3</sup>

Научный руководитель: Видяев Д.Г., д.т.н., доцент

<sup>1</sup>АО «СХК», 636039, г. Северск, Томской области, ул. Курчатова, дом 1

<sup>2</sup>ОГАУЗ «СП №1», 634050, Россия, г. Томск, ул. Гагарина, 34

<sup>3</sup>Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

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

Согласно статистическим данным во всем мире ежегодно регистрируют более 10 миллионов первично заболевших раком, т.е. в сутки заболевают около 27 тысяч человек. В России по статистике каждые сутки регистрируется примерно 1500 больных онкологическими заболеваниями, а всего на учете состоят не менее 2,5 миллионов пациентов [1]. При этом по данным различных статистических исследований за последнее десятилетие наблюдается рост частоты обнаружения злокачественных новообразований в среднем примерно на 15%. В связи с этим, исследования, направленные на поиск эффективных способов диагностики и лечения такого рода заболеваний, являются весьма актуальными.

Для лечения онкологических заболеваний используются три основных метода: хирургический, химиотерапевтический и лучевой. Особого внимания заслуживает лучевая терапия, а в частности, нейтрон-захватная (НЗ). Данный вид терапии дает возможность селективно поражать в области опухоли раковые клетки и сохранять здоровые, обеспечивая при этом минимальную радиационную и химическую травматичность организма пациента в целом [2].

Основным элементом, используемым на сегодняшний день для НЗ терапии, является  $^{10}\text{B}$ , однако ведутся поиски и других веществ, пригодных для этой цели. Анализ литературных данных показал, что перспективными в плане нейтрон-захватной терапии изотопами помимо  $^{10}\text{B}$  являются  $^6\text{Li}$  и  $^{157}\text{Gd}$ . Поэтому целью данной работы являлось проведение сравнительного анализа основных параметров нейтрон-захватной терапии при использовании в качестве рабочих веществ соединений с изотопами  $^{10}\text{B}$ ,  $^6\text{Li}$  и  $^{157}\text{Gd}$ .

В результате проведенного обзора установлено, что в качестве источников нейтронов для НЗ терапии используются ускорители и реакторы, причем последние предпочтительнее, так как позволяют получить более моноэнергетический нейтронный пучок. Поэтому в процессе работы по отработанной методике проведен расчет основных параметров эффективности НЗ терапии для изотопов  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$  и  $^{157}\text{Gd}$  для двух видов нейтронов – тепловых и ультрахолодных (УХ).

Установлено, что наибольшие значения по мощности поглощенной дозы имеет гадолиний – 2,16 и 0,591 Гр/мин для тепловых и УХ нейтронов, соответственно. Для лития и бора величина указанного параметра на порядок ниже и имеет близкие значения – соответственно, 0,131 и 0,153 Гр/мин при использовании тепловых и 0,0357 и 0,0437 Гр/мин при использовании УХ нейтронов. Таким образом, для достижения необходимого терапевтического эффекта при лечении онкологических заболеваний достаточное время экспозиции для всех трех изотопов не превышает 1 часа при использовании тепловых нейтронов и 2-х часов при использовании УХ нейтронов [3].

Отмечается, что, несмотря на наилучшую способность гадолиния к захвату нейтронов, использование его для НЗ терапии сопряжено с рядом трудностей, прежде всего из-за его высокой токсичности. Таким образом, на возможность и эффективность использования того или иного изотопа для НЗ терапии, помимо ядерных свойств существенное влияние оказывают экологические и биологические аспекты, что позволяет утверждать, что у каждого из рассмотренных изотопов есть свои «плюсы» и «минусы».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статистика рака в России [Электронный ресурс] //Российский онкологический портал. Режим доступа: <http://www.oncoforum.ru/o-rake/statistika-raka/statistika-raka-v-rossii.html>. Дата обращения: 30.08.2017.
2. Современные методы лечения онкологических больных [Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://www.cancer.ic.ck.ua/index\\_5\\_1.htm](http://www.cancer.ic.ck.ua/index_5_1.htm). Дата обращения: 30.08.2017.
3. Хмелевский Е.В. Современное состояние и перспективы нейтронзахватной лучевой терапии [Электронный ресурс] // Вестник РНЦРР МЗ РФ. – №7. – 2007. – Режим доступа: [http://vestnik.mcr.ru/vestnik/v7/papers/khmelevsky\\_v7.htm](http://vestnik.mcr.ru/vestnik/v7/papers/khmelevsky_v7.htm). Дата обращения: 30.08.2017.

# ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И ИХ ИЗОТОПОВ В ГАЛЛАМНО-ОБМЕННЫХ СИСТЕМАХ

Родионов А.В.<sup>1</sup>, Видяев Д.Г.<sup>1</sup>, Лемякин А.Э.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Видяев Д.Г., д.т.н., доцент

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

<sup>2</sup>ПАО «НЗХК», 630110, Россия, г. Новосибирск, ул. Б. Хмельницкого, 94

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

Современные технологии требуют использования особо чистых материалов. Одной из наиболее сложных задач является получение чистых щелочных металлов. Для их разделения и очистки нами предложено использовать галламно-обменный метод, основанный на реакции химического обмена между галламой (соединение галлия со щелочным металлом) и раствором щелочи [1].

Наиболее важной характеристикой эффективности какого-либо метода разделения служит коэффициент разделения  $\alpha$ . При разделении лития, натрия и калия в системе галлама – водный раствор электролита, на границе раздела фаз протекает обменная реакция типа



Значение равновесного коэффициента разделения или константы равновесия  $K$  данной реакции при постоянном давлении и температуре согласно [2] определяется из выражения:

$$\alpha = K = \exp[\Delta EF/(RT)] \quad (2)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $F$  – число Фарадея;  $T$  – абсолютная температура;  $\Delta E$  – разность равновесных потенциалов галлам металлов, участвующих в обмене.

Коэффициент разделения изотопов  $i$ -го элемента согласно [3] можно найти из выражения:

$$\ln \alpha_i = - \left( \frac{d \ln K}{dr_i} \right)_{r_i} \cdot \Delta r_i$$

где  $r_i$  – кристаллохимический радиус иона;  $\Delta r_i$  – разность кристаллохимических радиусов.

При этом для расчета значения логарифма термодинамической постоянной применима формула:

$$\ln K_{\text{Na}}^i = \frac{F (E_{\text{Me}_i}^{\circ} - E_{\text{Na}}^{\circ}) - (\Delta \bar{G}_{\text{Me}_i(\text{Ga})}^{\circ} - \Delta \bar{G}_{\text{Na}(\text{Ga})}^{\circ})}{RT}$$

где  $E_{\text{Me}_i}^{\circ}$  – стандартный электродный потенциал  $i$ -го элемента;  $\Delta \bar{G}_{\text{Me}_i(\text{Ga})}^{\circ}$  – стандартная парциальная энергия Гиббса (изобарно-изотермический потенциал) растворения  $i$ -го элемента в галлии, причем стандартная энергия Гиббса связана со стандартной эдс ( $E^0$ ) элемента, как  $\Delta G^0 = -E^0F$ .

Таким образом, значения равновесных потенциалов или энергии Гиббса галлам разделяемых элементов позволяют оценить коэффициент их разделения, и чем больше разница потенциалов рассматриваемых элементов, тем больше и коэффициент разделения. Поэтому задачей настоящей работы было проведение теоретических расчетов значений изобарно-изотермического потенциала галлам лития, натрия и калия на основе имеющихся литературных данных.

Величины изобарно-изотермического потенциала галлам щелочных металлов были определены нами из значений парциальной молярной энергии Гиббса щелочных металлов в галламе, найденных в литературе и экстраполированных на бесконечно разбавленные растворы.

Установлено, что величина потенциала для металлов в галламе в ряду  $\text{Li} \rightarrow \text{K} \rightarrow \text{Na}$  возрастает с –44,25 до –26,60 кДж/моль. Кроме того, так как полученные нами значения энергии Гиббса для натрия и калия в галламе отрицательнее, чем для лития, то натрий и калий при обмене с литием должны концентрироваться преимущественно в фазе галламы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров И.А., Орлов А.А., Видяев Д.Г. Разделение щелочных металлов // Журн. прикл. химии. – 2003. – Т. 76, вып. 6. – С. 888-891.
2. Практикум по физической химии: Учебное пособие/Под ред. М.И. Гельфмана. – СПб.: Издательство «Лань», 2004. – 256 с.
3. Князев Д.А. Расчет коэффициентов разделения изотопов при амальгамном обмене // Журн. физ. химии. – 1965. – Т. 39, № 1. – С. 40–43.

# ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗОТОПА $\text{Cu}^{64}$ В ПОЗИТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Куценко Б.Д., Антипин В.А.

Научный руководитель: Бордулёв Ю.С., ассистент КОФ, ТПУ  
Томский Политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: [bdk2@tpu.ru](mailto:bdk2@tpu.ru)

С развитием ядерной и водородной энергетики, всё больше требований предъявляется к используемым в этих отраслях материалам. В частности, для водородной энергетики требуются материалы накопители водорода. В ядерной энергетике, абсорбция водорода конструкционными материалами делает материал более хрупкими, из-за чего актуальной задачей является защита материала от водородного проникновения и прогнозирование его разрушения. Для изучения процесса поглощения водорода требуется изучить изменение дефектной структуры материала во время этого процесса. Одним из наиболее эффективных методов изучения дефектной структуры является позитронная спектроскопия (ПС) [1]. Однако, использование традиционных источников позитронов, таких как  $\text{Ti}^{44}$  и  $\text{Na}^{22}$  не позволяет производить исследования ПС в условиях повышенных температур и в среде водорода. Причиной этому является нестабильность компонентов источника позитронов при данных условиях, связанная с низкой температурой плавления (полимерная пленка источника  $\text{Na}^{22}$  [2]) и насыщение водородом (титановая капсула [3] источника  $\text{Ti}^{44}$ ). В качестве решения, в данной работе было предложено использование изотопа  $\text{Cu}^{64}$  в качестве источника позитрона, т.к. медь обладает высокой температурой плавления ( $1085^\circ\text{C}$ ) и не взаимодействует с водородом. Особенностью данного источника является короткий период полураспада (12,7 часов).

Целью исследования является разработка методики измерения дефектной структуры материала с использованием источника позитронов -  $\text{Cu}^{64}$ . Для получения источника позитронов  $\text{Cu}^{64}$  была использована медная фольга толщиной 10 мкм и массой 1 мг. Данная фольга была облучена потоком тепловых нейтронов  $10^{13}$  нейтрон/см<sup>2</sup>\*сек в течение 3 часов. Активность на момент начала эксперимента составляла 61,07 МБк. Источник позитронов был помещен между двумя исследуемыми образцами и расположен напротив детектора. В качестве метода ПС, применяемом в данной работе был использован метод доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ) [1]. В качестве исследуемых образцов были выбраны образцы сплава титана с разной плотностью дислокаций (бездефектные образцы были подвержены холодной прокатки до различных степеней деформации). Для контроля изменения дефектной структуры применялся S-параметр [1].

В ходе проведения эксперимента была получена зависимость, представленная на рисунке 1.

Из представленной зависимости видно, что с увеличением деформации образца, увеличивается значение S-параметра, что говорит об увеличении плотности дефектов в материале. Однако, видно также, что с уменьшением активности материала, увеличивается значение S-параметра, не связанное с изменением дефектной структуры. Данное изменение имеет линейный характер и может быть учтено в дальнейших экспериментах. Таким образом, в результате проделанной работы было показано, что  $\text{Cu}^{64}$  может быть использован в качестве источника позитронов для реализации метода ДУАЛ, если учитывать изменение его активности за время эксперимента. Это позволит учитывать изменение S-параметра, несущего информацию о дефектной структуре, т.к. зависимость S-параметра от активности является линейной. В дальнейшем планируется провести исследования дефектной структуры различных материалов при повышенных температурах, а также в среде водорода с применением источника позитронов на основе  $\text{Cu}^{64}$ .

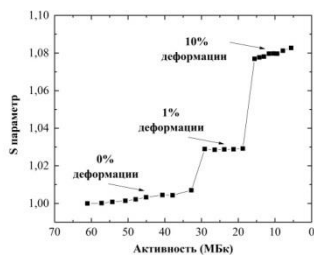


Рис.1. Зависимость S параметра от активности источника  $\text{Cu}^{64}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Графутин В. И., Прокопьев Е. П. Применение позитронной аннигиляционной спектроскопии для изучения строения вещества // УФН. –2002. –172. –67–83.
2. F. Vecvar, J. Cizek, L. Lestak, I. Novotny, I. Prochazka, F. Sebesta. A high-resolution BaF2 positron-lifetime spectrometer and experience with its long-term exploitation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. –2000. –A.443. –557–577.
3. San-Martin A., Manchester F. D. The H– Ti (hydrogen-titanium) system //Journal of Phase Equilibria. – 1987. – Т. 8. – №. 1. – С. 30-42.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОТОПНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОУГЛЕРОДНЫХ СТРУКТУР

Варламов И.А., Калиновский Ю.А.

Научный руководитель: Мышкин В.Ф. д.ф.-м.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина,30  
e-mail: xxxhxxx16@gmail.com

Нанотехнологии – ключевое понятие современности. Под нанотехнологиями понимается совокупность устройств и систем, методов и приемов, включающих целенаправленный контроль и управление строением, химическим составом и характером взаимодействия между составляющими элементами, имеющих нанометровый диапазон размеров. Нанотехнологии ориентированы как на улучшение свойств и характеристик объектов, так и получение принципиально новых материалов. Большие перспективы в электронике, материаловедении, медицине возлагаются на использование углеродных наноструктур: графен, фуллерен, нанотрубка. Большинство природных элементов представлены двумя и более изотопами, имеющими незначительное отличие большинства физико-химических свойств. При этом изотопы в чистом веществе могут быть распределены как равномерно, так и образовывать флуктуации концентрации (кластер). Теплофизические, электрофизические и механические свойства чистых материалов во многом зависят от вида распределения изотопов по их объему. Изучение изотопно-модифицированных материалов является одним из перспективных направлений в нанотехнологиях, что связано с возможностью формирования материалов, обладающих уникальными физико-химическими свойствами [1]. В настоящее время наблюдается тенденция к уменьшению размеров вычислительной техники и отображающих устройств. Например, создание плоских мониторов на основе графена. Создание излучающих структур возможно на основе полупроводникового графена. В работе [2] показано, что путем механического деформирования структуры графена возможно преобразовать проводящий графен в полупроводниковый. Для этого можно использовать отличие длины связей между двумя легкими и двумя тяжелыми изотопами углерода. Это позволит показать перспективность изотопного материаловедения в области применения углеродных наноструктур. Получение чистых материалов и изучение изменения их свойств при изотопном замещении технически очень сложная задача. Поэтому цель исследования – компьютерное моделирование влияния изотопного состава на различные параметры углеродных наноструктур. В настоящее время разработано и используются множество программ для моделирования молекулярных структур [3,4]. Большинство из них снабжено базой данных по строению атомов различных элементов, например, HyperChem. Для моделирования с помощью HyperChem необходимо лишь указать выбранный элемент и вид гибридизации. Однако в HyperChem не предусмотрена возможность замены изотопов для большинства элементов. Программа квантово-химического моделирования Gaussian требует указания координат атомов, входящих в молекулу, вид гибридизации и позволяет устанавливать массу атомов. Для моделирования изотопных наноструктур нами использовались две указанные лицензионные программы совместно. Вначале выстраивали и оптимизировали структуру графена в программе HyperChem в виде сетки 10×10 углеродных атомов. Из результатов работы HyperChem координаты атомов переносили в программу Gaussian. Изменяли для части атомов атомную массу и запускали работу программы. При этом рассматривались как однослойные, так и двуслойные графеновые слои. В докладе приводятся результаты определения с помощью пакетов квантово-химического моделирования длин связей между атомами в изотопно-модифицированном графене. Получена карта распределения <sup>13</sup>C для формирования запрещенной зоны, превращающей графен в полупроводник. В работе показано, что изотопное замещение углерода позволяет изменять длину связи, ширину запрещенной зоны и спектр колебательных частот.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Р. Келсалл, А. Хэмли, М. Геогеган (ред.) Научные основы нанотехнологий и новые приборы. Учебник-монография. Пер. с англ.: Научное издание / Р. Келсалл, А. Хэмли, М. Геогеган (ред.) — Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. – 528 с.
2. Zh.H. Ni, T. Yu, Y.H. Lu, et al., Uniaxial strain on graphene: Raman spectroscopy study and band - gap opening, ACS Nano, 3, 2009. – С. 483 – 492.
3. Квантовохимическое моделирование процесса синтеза фрагментов структуры аналогов гуминовых веществ / М. А. Пошелюжная [и др.]. // Журнал общей химии. - 2014. - Т. 84 (146), вып. 5. - С. 755-760. - Библиогр.: с. 760. - ISSN 0044-460X.
4. Цышевский Р.В., Гарифзянова Г.Г., Храпковский Г.М. Квантово-химические расчет механизмов химических реакций. Учебно-методическое пособие. — Казань: КНИТУ, 2012. — 87 с.

## **IMPROVEMENT OF NEUTRON-PHYSICAL CHARACTERISTICS OF FAST REACTOR BY USING <sup>208</sup>Pb REFLECTOR**

Kozhakhmet B.K., Shmelev A.N.  
National research nuclear university "MEPHI"  
e-mail:borzhik\_88@mail.ru

As a rule materials of small atomic weight (light and heavy water, graphite and so on) are used as neutron moderators and reflectors. A new very heavy atomic weight moderator is proposed – radiogenic lead consisting mainly of isotope <sup>208</sup>Pb. It is characterized by extremely small neutron radiative capture cross-section (~0.5 mbarn for thermal neutrons, i.e. less than that for graphite and deuterium) and highest albedo of thermal neutrons.

It is evaluated that the use of radiogenic lead makes it possible to slow down the chain fission reaction on prompt neutrons in a fast reactor. This can improve safety of fast reactor

In this work the chain fission reaction slowed down by prolonging mean lifetime of prompt neutrons. The use thick (3-4 m) <sup>208</sup>Pb reflector in fast reactors can considerably prolong mean lifetime of prompt neutrons (on three orders of magnitude) that can substantially improve nuclear safety even if positive reactivity above \$1 is inserted into the reactor core;

Such a drastic extension of mean prompt neutron lifetime is caused by the following effect. Fast neutrons from the reactor core penetrated deeply into <sup>208</sup>Pb reflector, multiple neutron-nucleus collisions slowed down these neutrons and they came back to the reactor core after an essential time delay (due to small absorption and effective albedo of <sup>208</sup>Pb). Since these returning neutrons, in the terms of their origin, are prompt neutrons, it can be spoken about the slowed progression of chain fission reaction on prompt neutrons.

This means, in its turn, that application of such a thick neutron reflector gives a new quality to the reactor – the larger fraction of delayed neutrons and, as a consequence, slowing down of chain fission reaction.

One else important circumstance consists in the following fact. The larger fraction of delayed neutrons depends mainly on neutron leakage from the reactor core and, thus, may be chosen as a developer wills, while fraction of nuclei-emitters of delayed neutrons may be chosen only within very stringent constraints. Evidently, generation rate of these “delayed” neutrons substantially depends on leakage rate of fast and resonance neutrons from the reactor core. That is why application of thick neutron reflector is a reasonable option not only for fast reactors but also for the reactors with resonance and even thermal spectra, i.e. for the reactors with significant leakage of fast and resonance neutrons from the reactor core.

Also studied affect of reflector with different isotope composition on fast reactor’s neutron-physical behavior.

Obtained Dependencies of asymptotic power excursion period in the fast reactor with thick reflector on the inserted positive reactivity

Thereby use thick <sup>208</sup>Pb reflector in fast reactors can improve safety of fast reactor.

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ НАСЫЩЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗОТОПАМИ ВОДОРОДА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Сыртанов М.С.

Научный руководитель: Ларионов В.В., д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: [mass12@tpu.ru](mailto:mass12@tpu.ru)

Известно, что облучение электронами, а также гамма- и рентгеновскими квантами наводороженных металлов проводится для осуществления радиационно-стимулированного выхода водорода, для стимулирования и возбуждения водородной подсистемы, накопления водорода и его энергии с целью создания водородных топливных элементов. В результате облучения наводороженных металлов рентгеновскими лучами, электронами образуется водородная подсистема, обладающая особым свойством накапливать энергию [1]. Основными характеристиками водородной подсистемы являются ее энергия, особое состояние электронов, обнаруженное при изучении электронных спектров металлов, и величина десорбции водорода из них. Посредством радиационного облучения управляют концентрацией водорода в объеме твердых тел и создают неравновесные термодинамические системы, синтез которых традиционными методами невозможен. При исследовании десорбции дейтронов из комбинированной системы в виде Pd/PdO, насыщенной дейтерием с образованием Pd/PdO:D<sub>x</sub>, и облучаемой электронами, выявлено, что энергия дейтронов увеличивается более чем на два порядка по сравнению с тепловой. Также показана возможность протекания DD-реакции, стимулированной в дейтерированных мишенях Pd/PdO:D<sub>x</sub> механическими напряжениями, пучками электронов и рентгеновскими квантами. Получение высокоэнергетических атомов водорода (дейтерия) при возбуждении водородной подсистемы при электронной бомбардировке обусловлено генерацией плазменных колебаний (плазмонов) в кристаллической решетке, локализованных в окрестности атомов водорода. При этом часть работ посвящена теоретическому обоснованию эффектов возбуждения водородной подсистемы. Одной из важнейших проблем является увеличение времени сохранения подведенной энергии в масштабе времени электронной релаксации в металлах для стимулирования процессов, как ускоренной диффузии, так и перестройки всей кристаллической структуры под действием излучения. Особое место в исследовании условий наводороживания занимает анализ оксидных пленок на поверхности металлических образцов. Их величина в ряде случаев играет роль накопителя водорода, так как задерживает его выход. В ряде случаев большое значение имеет соотношение между размерами пучка и мишени. Поглощение энергии водородной подсистемой может быть частично объяснено эффектом гигантского комбинационного рассеяния. При электролизе на поверхности (и в объеме) образуются квазимикроскопические (с размерами порядка 10-100 нм) зерна в форме выступов или сфероидов, хаотично распределенных в пространстве с расстоянием между ними равным размерам зерен. Гладкая поверхность металла не способствует задержке дейтерия в образцах. Исследования насыщения изотопами водорода металлов обусловлены потребностью таких высокотехнологичных отраслей как водородной, ядерной и термоядерной энергетики.

Целью данной работы является исследование особенностей процессов электролитического накопления изотопов водорода титаном и палладием, изучение влияния поверхностной пленки оксидов на десорбцию изотопов водорода в условиях облучения, получение количественных характеристик сорбции и десорбции изотопов водорода. Исследован проходящий поток водорода / дейтерия через образцы металла и насыщение образцов. Процесс выхода изотопов сопоставлен с коэффициентами их диффузии. Величина потока возрастает прямо пропорционально плотности тока электролиза при облучении электронами. Выделены две области такой зависимости – 100 - 600 мкА/см<sup>2</sup> и 600-1000 мкА/см<sup>2</sup>. Обнаружена линейная зависимость количества накопленных изотопов водорода от времени насыщения. При одном и том же времени количество введенного водорода в 5 – 6 раз превышает количество введенного дейтерия при аналогичных условиях. В отличие от палладия для титана характерно наличие области насыщения изотопом водорода от времени. Исследуемые эффекты могут быть применены в технологии разделения изотопов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hydrogen in Metals. Ed. G. Alefeld,. J. Volkl.- Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1978.- Vol. I. Basic Properties, 427 p. Vol. II. Application-oriented Properties, 387 p.



## ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЛОЕВ ИЗОТОПИЧЕСКИ ЧИСТЫХ АКТИНОИДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ПОДЛОЖКАХ МЕТОДОМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Рычков Ю.В., Карпунин С.М., Федоренков С.В., Шестаков Р.Г.  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
e-mail: [otd4@expd.vniief.ru](mailto:otd4@expd.vniief.ru)

Электромагнитный масс-сепаратор С-2 предназначен для получения изотопически чистых элементов актиноидного ряда. Использование сепаратора в качестве ионного имплантера предоставляет уникальную возможность изготовления слоев на подложках с одновременным обогащением по целевому нуклиду. Такие слои в качестве мишеней или источников излучений используются в фундаментальных и прикладных ядерных исследованиях.

Метод ионной имплантации является альтернативой другим методам нанесения слоев на подложки, таким как электролизное осаждение или разложение летучих соединений из паровой фазы. Слои, изготовленные методом ионной имплантации, отличаются высокой изотопной концентрацией целевого нуклида, стабильностью химической формы вещества в слое, высокой механической прочностью.

Целью работы являлась разработка способа изготовления слоев актиноидных элементов с высоким изотопным обогащением, основанного на имплантации ускоренных ионов в металлические и органические подложки.

В процессе работы сконструировано мишенное устройство с электростатическим подавлением динаatronного эффекта и многопозиционным механизмом смены подложек.

В результате изготовлены слои плутония активностью порядка  $10^3$  Бк на металлических и органических подложках с массовой долей целевого изотопа вплоть до 99.996%. Изготовленные слои обладают высоким энергетическим разрешением альфа-спектра - не менее 12.6 кэВ. Проведена оценка глубины внедрения ионов в материал подложки по смещению пиков в альфа-спектре при измерении слоя под разными углами к поверхности детектора.



## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В САМОЙ ЭНЕРГОНАПРЯЖЕННОЙ ТВС ВВР-КН С НОУ ТОПЛИВОМ**

Шаймерденов А.А.<sup>1</sup>, Колточник С.Н.<sup>1</sup>, Шаманин И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> РГП «Институт ядерной физики», Министерство энергетики,  
Ул. Ибрагимова 1, 050032, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Пр. Ленина 30, 634050, г. Томск, Российская Федерация

В рамках конверсии исследовательского реактора ВВР-К был проведен цикл расчетно-экспериментальных исследований с целью обоснования возможности перевода реактора на низкообогащенное (НОУ) топливо без ухудшения эксплуатационных и экспериментальных характеристик реактора. При конверсии любого реактора важно, чтобы запас безопасности и надежности топлива не снизился, относительно активной зоны с высокообогащенным топливом.

После выбора ТВС ВВР-КН и компактной конфигурации активной зоны с НОУ топливом были проведены детальные нейтронно-физические расчеты активной зоны реактора для определения самой энергонапряженной ТВС. По результатам расчетов, энерговыделение в самой энергонапряженной ТВС ВВР-КН составило 388 кВт и она расположена в центральной ячейке 6-5. Из восьми твэлов самым энергонапряженным оказался внешний твэл, в котором расчетное удельное энерговыделение самого энергонапряженного сегмента длиной 3 см составило 1500 Вт/см<sup>3</sup>. Полученные данные были использованы для анализа тепловых режимов работы как ТВС, так и активной зоны в целом с точки зрения ядерной безопасности работы реактора как в нормальных, так и в аварийных условиях.

В данной работе приведены результаты нейтронно-физических расчетов по определению самых энергонапряженных ТВС и сегментов ТВС для проведения тепловых расчетов активной зоны.

## НАПРЯЖЕНИЯ В ПОКРЫТИИ МИКРОТОПЛИВА

Шаманин И.В., Беденко С.В., Кнышев В.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

E-mail: [vvk28@tpu.ru](mailto:vvk28@tpu.ru)

В последние годы проводится анализ различных решений [1-2], позволяющих существенно повысить эксплуатационные параметры микротоплива (МТ) с TRISO покрытием в процессе выгорания. Однако рост концентрации продуктов деления (ПД) в МТ создает высокое давление на покрытие зерна, в результате чего может наступить момент, когда покрытие зерна претерпевает разрыв [1-3].

Существующие сегодня технические решения направлены на повышение ресурса эксплуатации МТ за счет увеличения числа слоев [1-2, 4], тем самым снижая повреждаемость силовых покрытий. Увеличение числа слоев МТ принципиально не решает проблему разгерметизации и миграции топливного зерна в условиях длительного облучения и высокой температуры. Нужны принципиально новые материалы и технологии нанесения покрытий [1-4].

В данной работе представлена топливная таблетка (ТТ), позволяющий существенно повысить эксплуатационные параметры МТ с покрытием BISO, за счет применяемых материалов, технологий его изготовления и конфигурации [5-6]. Предлагаемая ТТ позволяет существенным образом повысить эффективность использования ядерного горючего. Рассмотренные покрытия микротоплива типа BISO имеют высокую эффективность удержания ГПД и компенсации распухания ТТ [5-6].

Приведены результаты компенсации напряжений, создаваемое продуктами деления при высоких и сверх высоких глубинах выгорания, в микротопливе [6]. Нейтронно-физический расчет проводился в 3D-геометрии в диффузионном приближении и методами Монте-Карло с использованием оцененных ядерных данных (ENDF/B-VIII, JENDL-3.3, JEFF 3.0, EXFOR, РОСФОНД) и претензионного расчетного кода программ серии MCU5 [5], с подготовкой расчетных нейтронно-физических констант [8]. Расчет термодинамических параметров проводился с привлечением алгоритма многоцелевого программного комплекса АСТРА.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivanov, A.S., Rusinkevich, A.A. The kinetics of fission products release from microfuel taking into account the trapped fraction and limited solubility effects // Nuclear Engineering and Design Vol. 306, 2016, P. 47-51.
2. Ponomarev-Stepnoy, N.N., Makarov, V.M., Ivanov, A.S., Belov, I.A., Rusinkevich, A.A., Lindemer, T., McEachern, D., Razvi, J. Evaluation of the thermodynamics of deep burnup HTGR fuel with plutonium kernels // Proceedings of the 4th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, HTR 2008 Vol. 1, 2009, P. 257-262.
3. 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.
4. Ivanov, A.S., Rusinkevich, A.A. The kinetics of fission products release from microfuel taking into account the trapped fraction and limited solubility effects // Nuclear Engineering and Design Vol. 306, 2016, P. 47-51.
5. Shamanin I., Chertkov Y., Bedenko S., Gubaydulin I. Gas-Cooled Thorium Reactor with Fuel Block of the Unified Design Adv. in Mater. Science and Eng. 2015 p. 1-8.
6. Shamanin I.V., Grachev V.M., Knyshev V.V., Bedenko S.V., Novikova N.G. Calculation evaluation of multiplying properties of LWR with thorium fuel // Journal of Physics: Conference Series. - 2017 - Vol. 781, Article number 012030. - p. 1-6.
7. Oleynik D 2015 The Monte Carlo estimation of an effect of uncertainties in initial data on solving the transport equation by means of the MCU code Phys. of Atom. Nucl. 2015 Vol 78 (11) p.1194–1199.
8. Bedenko S. V. , Jeremiah J. J. , Knyshev V. V. , Shamanin I. V. Analysis constants for database of neutron nuclear data // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2016 - Vol. 135, Article number 012004. - p. 1-6.

*Секция 5*

**СЕЛЕКЦИЯ И ГЛУБОКАЯ ОЧИСТКА ТРУДНО РАЗДЕЛЯЕМЫХ  
ВЕЩЕСТВ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

*Председатель: д.ф.-м.н., профессор А.П. Вергун*

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЦЕССА ЗОННОЙ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА СОЛЕЙ И МЕТАЛЛОВ

Акимов Д.В., Егоров Н.Б.

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

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

На протяжении нескольких лет на кафедре ХТРЭ ФТИ ТПУ проводились исследования, посвященные вопросам изменения изотопного состава химических элементов в форме солей и металлов. Изучалось поведение изотопов следующих химических элементов в процессе их зонной перекристаллизации: литий, магний, никель, индий, церий и свинец. В работе были использованы химические элементы как природного изотопного состава, так и высокообогащенные стабильные изотопы лития и свинца (таблица 1, 2).

Таблица 1. Изотопный состав высокообогащенных изотопов лития

Наименование	Изотопный состав, %	
	<sup>6</sup> Li	<sup>7</sup> Li
Образец <sup>6</sup> Li	90,30±0,02	9,70±0,01
Образец <sup>7</sup> Li	0,50±0,01	99,50±0,02

Таблица 2. Изотопный состав высокообогащенных изотопов свинца

Наименование	Изотопный состав, %			
	<sup>204</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb
Образец <sup>206</sup> Pb	<0,10	99,30±0,10	0,50±0,10	0,20±0,10
Образец <sup>208</sup> Pb	<0,01	0,03±0,01	0,27±0,01	99,70±0,01

На первой стадии экспериментов основной задачей являлся выбор рабочих соединений для проведения процесса зонной перекристаллизации. Часть элементов исследовалась в форме солей (литий, магний, кальций, никель, церий), а другая часть - индий и свинец в форме металлов. К рабочим соединениям при изменении изотопного состава солей предъявлялись следующие требования:

1. Конгруэнтный вид плавления;
2. Низкая температура плавления;
3. Изменение объема соли при кристаллизации должно быть несущественным для предотвращения растрескивания контейнера, содержащего соль.

После выбора рабочего соединения осуществлялось исследование оптимальных параметров процесса зонной перекристаллизации, таких как скорость движения слитка и количество проходов зоны. По полученные данным устанавливалась возможность изменения изотопного состава элемента с помощью данного процесса. В случае с литием, магнием и свинцом, проводился поиск факторов, интенсифицирующих процесс изменения их изотопного состава при зонной перекристаллизации.

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований рассчитывались коэффициенты разделения изотопов (таблица 3).

Таблица 3. Коэффициенты разделения изотопов и условия процесса зонной перекристаллизации

Изотоп	Коэффициент разделения	Условие процесса
<sup>6</sup> Li	1,0072	Использование в качестве рабочего соединения эвтектической смеси LiClO <sub>4</sub> -LiClO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O
<sup>7</sup> Li	0,9928	
<sup>6</sup> Li-обогащенный	1,0080	
<sup>7</sup> Li-обогащенный	1,1390	
<sup>24</sup> Mg	0,9992	Совмещенное действие ЗП и постоянного электрического тока
<sup>25</sup> Mg	0,9962	
<sup>26</sup> Mg	1,0020	
<sup>60</sup> Ni	1,0010	Зонная перекристаллизация
<sup>113</sup> In	0,9998	
<sup>115</sup> In	1,0002	
<sup>140</sup> Ce	1,0013	
<sup>206</sup> Pb	0,9993	Совмещенное действие ЗП и переменного электрического тока
<sup>208</sup> Pb	1,0010	
<sup>206</sup> Pb-обогащенный	1,1090	
<sup>208</sup> Pb-обогащенный	1,120	

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что изменять изотопный состав химических элементов различных масс в процессе зонной перекристаллизации возможно, для этого необходимо исследовать параметры процесса, а также провести поиск факторов интенсифицирующих его.

# РАЗРАБОТКА, ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В ПРОТИВОТОЧНЫХ КОЛОННАХ С ДВИЖУЩЕЙСЯ ФАЗОЙ ИОНИТА

Балашков В.С.<sup>1</sup>, Вергун А.П.<sup>2</sup>, Беляков Д.М.<sup>2</sup>

Научный руководитель Вергун А.П., д.ф.м.н., профессор

<sup>1</sup>ОАО «Томскгазпром»

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

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

E-mail: balaskow vit@mail.ru

Изотопы нашли широкое применение в науке, технике, ядерной энергетике, различных областях промышленности, медицине [1].

На кафедре ТФ ТПУ проводятся исследования по разделению изотопов и тонкой очистке веществ с использованием ионитов, мембран, сорбентов.

При выборе ионитов используется метод направленного поиска систем с максимальными разделительными свойствами. Сущность метода состоит в том, что определяются значения  $\beta$ -факторов соединений, участвующих в изотопном обмене [2]. С учетом результатов направленного поиска систем с высокой селективностью разработан метод разделения изотопов, совмещающий обменные и электрохроматографические процессы. Экспериментальная установка, реализующая данный метод разделения, включает противоточные обменные колонны, электродиализатор и колонну электрохроматографии. Для процесса разделения используются органические и неорганические иониты.

Определены оптимальные значения скоростей движения ионита и ВЭС в колоннах при разделении изотопов легких щелочных элементов и тонкой очистке веществ. При оптимизации процессов разделения изотопов и ионов с близкими свойствами используются методы планирования экстремальных экспериментов с получением математических моделей в виде уравнений регрессии.

Электрохимическое обращение потоков фаз производится с применением электродиализатора [3,4].

Найдены оптимальные условия электропитания аппарата, предложена конструкция электродиализатора ступенчатого типа.

Для повышения концентрации выделяемого изотопа используется электрохроматографическая колонна, где разделение изотопов осуществляется за счет разности в их подвижностях [5]. С целью повышения эффективности работы колонны противоток в ней осуществляется путем совместного движения ионита и раствора. Оптимальное значение скорости движения фазы ионита в электрохроматографической колонне находится на основании разработанной программы, в которой определяется скорость движения фронта разделяемых изотопов в зависимости от разности их подвижностей, плотности тока и характеристик ионита. Существенное увеличение чисел переноса разделяемых изотопов достигается путем выполнения установки «колонна-электродиализатор». Отбор обогащенного продукта осуществляется из катодной камеры этого аппарата. Изучены режимы работы установки при интенсивных токовых нагрузках. На основании полученных результатов по разделению изотопов в обменных и электроионитных процессах разработана компьютерная программа применительно к каскаду разделительных установок. Программа позволяет анализировать работу каскада в стационарных и нестационарных условиях. Рассматривается влияние флуктуаций основных параметров на эффективность работы каскада. Программа позволяет определять концентрационные профили и характер распределения потоков выделяемого изотопа по ступеням каскада.

Комплекс проведенных исследований по разделению изотопных и ионных смесей на экспериментальной установке, оптимизации процессов позволили сделать вывод об адекватности полученных в работе математических моделей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Б.М., Зельвенский Я.Д., Котальников С.Г. Разделение стабильных изотопов физико-химическими методами. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 208 с.
2. Вергун А.П., Пуговкин М.М., Шаров Р.В. Разделение изотопов и тонкая очистка веществ электроионитными и обменными методами. Учебное пособие. Томск, ТПУ, 2000. – 68 с.
3. Дубяга В.П., Бесфамильный И.Б. Нанотехнологии и мембраны (обзор) // Мембраны. – 2005. – №3 (27). – С. 11–16.
4. Власов В.А., Вергун А.П., Орлов А.А., Тихонов Г.С. Разделительные процессы с применением ионообменных материалов: Учебное пособие. – Томск: ТПУ, 2002. – 121 с.
5. Балашков В.С., Вергун А.П. Моделирование и оптимизация гибких обменных и электроионитных систем изотопного разделения // Известия высших учебных заведений «Физика», -2010.-№11/2,-с.154-157.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИОНИТНОГО ПРОЦЕССА ОБРАЩЕНИЯ ПОТОКОВ ФАЗ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ИЗОТОПОВ В ОБМЕННЫХ КОЛОННАХ

Кабак В.Ю.<sup>1</sup>, Балашков В.С.<sup>2</sup>, Вергун А.П.<sup>1</sup>  
Научный руководитель Вергун А.П., д.ф.м.н., профессор  
<sup>2</sup>ОАО «Томскгазпром»

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

Проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований процессов изотопного разделения имеет важное научное и практическое значение, обусловленное потребностями атомной промышленности.

Обменные, мембранные и электроионитные процессы являются перспективными в плане разработки новых технологий разделения изотопов и тонкой очистки веществ.

Нами изучаются особенности разделения изотопов и ионов щелочных элементов в системе ионит-раствор.

Рассматриваемый способ разделения изотопных и ионных смесей, основан на совмещении обменных и электрохроматографических процессов. В первой серии колонн осуществляется изотопный обмен с электрохимическим обращением потоков фаз. При большом числе разработанных конструкций ионообменных противоточных аппаратов электрохимический способ обращения потоков при движущемся слое ионита изучен недостаточно. Здесь возможны два варианта проведения процесса: организации одновременного замещения обогащённой фракции зоной, обедненной по выделяемому изотопу в трехкамерном электродиализаторе и использовании многокамерного электромембранного аппарата.

Разделительный процесс организован таким способом, что, пройдя обменную колонну, обогащённый по лёгкому изотопу ионит, поступает в электродиализный аппарат, где под действием электрического поля зона более подвижного изотопа бинарной смеси из фазы ионообменника через катионитовую мембрану мигрирует в катодное отделение установки. Ионит при этом насыщается изотопом с меньшей подвижностью из анодной камеры аппарата.

Исследования проводились в двух направлениях: экспериментальное изучение движения границы, разделяющей два вида ионов; оценка перемещения границы зоны между ионами одного вида с различным изотопным обогащением по средней камере электродиализатора.

Достигнутая степень замещения составила 96–98 %, что является достаточным для организации непрерывного процесса разделения.

Проведено моделирование электроионитного процесса замещения разных ионных и изотопных форм в процессе электродиализа в системе ионит – раствор.

Разработана программа для расчета размеров электродиализного аппарата. Для этого используются значения скорости движения фронта в зависимости от условий электропитания аппарата, характеристик ионообменника и подвижностей разделяемых изотопов.

Процесс обращения потоков фаз изучался в аппаратах фильтр-прессного и трубчатого типа. С точки зрения повышения производительности электродиализаторов проводились исследования по обращению потоков фаз при интенсивных токовых режимах, когда плотность тока в аппарате выше предельных значений.

Обращение фаз проводилось также на многокамерном электродиализаторе ступенчатого типа.

Электродиализатор выполнен в виде фильтр-пресной установки из камер различной высоты. Высота камер и ионитовых мембран уменьшается от катода к аноду.

В анодную камеру электродиализатора подавался раствор гидрата окиси лития в количестве необходимом для поддержания неизменного значения электрического тока в электродиализаторе и постоянного электроосмотического переноса в катодную камеру. Для 0,5N раствора гидрата окиси лития при токе 0,1; 0,2; 0,3(а) электроосмотический перенос растворителя составил соответственно 1,1; 1,95; 3(мл./час).

Получены результаты по распределению значений рН и изотопной концентрации по камерам ступенчатого электродиализатора.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В ЭЛЕКТРОИОНИТНЫХ И ОБМЕННЫХ СИСТЕМАХ

Беляков Д.М., Кабак В.Ю., Вергун А.П.

Научный руководитель Вергун А.П., д.ф.м.н., профессор  
Россия, г.Томск, пр.Ленина30.

Мембранные, электроионитные и обменные процессы являются перспективными в плане разработки новых технологий разделения изотопов и тонкой очистки веществ.

Предложен способ разделения изотопных и ионных смесей, основанный на совмещении обменных и электрохроматографических процессов в условиях применения ионообменных материалов. Для моделирования, определения оптимальных условий разделения изотопов различных элементов при изотопном обмене и электрохроматографии использовались методы планирования экстремальных экспериментов.

Использование методов планирования позволяет сократить объем экспериментальной работы, что существенно в связи с большой продолжительностью опытов по разделению изотопических ионов.

При разделении изотопов с применением ионитов в качестве функции отклика использовалась относительная концентрация выделяемого изотопа в продукте ( $y_1$ ) и относительный выход целевого компонента.

Факторами являются следующие величины: концентрация раствора в разделительной установке, скорости противотока в растворе и ионите, напряженность электрического поля.

Для первого параметра оптимизации получены значения коэффициентов уравнения регрессии:

$$b_0=0,56; b_1=0,01; b_2=0,14; b_3=0,05; b_4=-0,04;$$

Значения коэффициентов уравнения регрессии применительно ко второму параметру оптимизации следующие:

$$b_0=0,36; b_1=0,05; b_2=-0,09; b_3=-0,03; b_4=0,08;$$

При проверке полученных уравнений на адекватность по критерию Фишера установлено, что математические модели адекватно описывают разделительный процесс.

Математическое моделирование разделительных процессов методами планирования экстремальных экспериментов предусматривает использование различных критериев оптимизации. При этом существенным является требование равномерности изменения критерия и постоянство дисперсии. Например, изменение обогащения на 5% не равнозначно в интервале изотопных концентраций (50-55)% и (90-95)%. С увеличением обогащения процент прироста достигается с большими затратами.

С точки зрения адекватного описания процессов изотопного разделения целесообразно использовать обобщенные критерии оптимизации.

При разработке обобщенных критериев учитывается тот факт, что с повышением обогащения продукта его себестоимость и ценность увеличиваются не пропорционально приращению относительной концентрации, а по более сложной зависимости.

Вследствие этого величина, характеризующая содержание извлекаемого компонента в продукте входит в обобщенные критерии в виде степенной или логарифмической зависимости.

Остановимся на наиболее простом обобщенном критерии – критерии Мажумдара

$$G = \frac{H\mu^2}{\mu_0^2}$$

где  $\mu$  - относительная концентрация выделяемого изотопа;

$H$  – относительный выход продукта

Для случая изотопного разделения при электрохроматографии в условиях движения фаз ионита и раствора получены следующие значения коэффициентов уравнения регрессии:

$$b_0=10,36; b_1=1,36; b_2=2,21; b_3=0,76; b_4=0,56;$$

В качестве параметра оптимизации использовался критерий Мажумдара, а факторами являлись концентрация рабочего раствора, скорости движения фаз и напряженность электрического поля.

При компьютерном моделировании рассматриваемого процесса разработаны программы, позволяющие рассчитывать величины ВЭТТ процессов разделения, оценивать размеры электродиализного аппарата для обращения потоков фаз, определять требуемую скорость противотока в устройстве, рассчитывать распределение концентраций в аппаратах.

Компьютерные программы позволяют анализировать работу установок в стационарных и нестационарных условиях.

В случае каскадирования установок предложенные программы позволяют рассчитывать распределение потоков и концентраций выделяемого изотопа по ступеням.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОР В ПЛЕНКАХ ПЭТФ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ

Копцев М.О., Чинзориг С., Головков В.М.

Научный руководитель: Сохорева В.В. старший научный сотрудник ФТИ НИ ТПУ  
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: sokhoreva@tpu.ru

Процесс формирования трековой мембраны (ТМ) с четко регулируемыми порами происходит при ионной бомбардировке полимерных пленок с последующим химическим травлением поврежденной области. Как правило, пленки подвергаются облучению тяжелыми ионами такими как Ar, Kr, Xe в вакуум-ной камере [1-2]. При этом, существуют определенные ограничения пористости ТМ: площадь пор при диаметрах (0,2-0,4) мкм не должна превышать 20% от всей площади ТМ, так как от этого зависит её прочность и возможность эксплуатации. Кроме того из-за больших потерь энергии тяжелых ионов, даже при высоких  $>180$  МэВ, пробег ионов, а следовательно и толщина сформированной мембраны не превышает  $\sim 20$  мкм. Это, в свою очередь, ограничивает её применение.

Данная работа посвящена исследованию возможности увеличения пористости ТМ при уменьшении диаметров пор, а также увеличения её толщины. Целью работы является исследование возможности применения пучков высокоэнергетических альфа-частиц и протонов для получения прочной ТМ толщиной более 50 мкм и пористостью  $1 \cdot 10^{13}$  пор/см<sup>2</sup>, а также изучение физико-химических процессов формирования треков высокоэнергетических альфа-частиц и протонов, при облучении полимера на воздухе, разработка технологии синтеза ТМ.

Авторами были проведены исследования процессов формирования пористой структуры ТМ, при облучении различных полимерных пленок ионами  ${}^4\text{He}$  с энергией  $-28$  МэВ и ионами  ${}^1\text{H}^1$  с энергией  $-6, 7$  МэВ [3]. Для этого двухосно-ориентированные пленки ПЭТФ и полипропилена высокого давления (ПП) толщиной 50 мкм помещали в специальный контейнер и закрепляли на валу перед выходным окном ускорителя, практически вплотную. Облучение проходило на выведенном в воздух пучке ионов, образец при облучении вращался со скоростью 60 об/мин. Между поверхностью облучаемого образца и выходным окном ускорителя ( $T_i - 40$  мкм) было расстояние в 1см воздуха. Потери энергии  $dE/dx$  и проецированные пробеги  $R$  в  $T_i$  и в воздухе для ионов гелия и протонов рассчитывались по формуле Бете – Блоха [4]; Для уточнения правильности расчетов пробегов и потерь энергии использовалась программа SRIM [5].

Травление облученных образцов полимеров, для создания сквозных пор, проводилось при воздействии электрического поля в ультразвуковой ванне в щелочных и кислотных растворах с добавлением катализаторов. Концентрация растворов контролировалась автоматическим титратором Mettler Toledo T50. Измерение электрического сопротивления пленок до и после облучения проводилось с помощью импедансметра –ZIVE sp2, изменение оптической плотности определялось при помощи спектрофотометра ССП-310. Состояние поверхности и определение числа и размера пор осуществлялось с помощью атомно-силового микроскопа NT-МДТ и растрового электронного микроскопа Hitachi -1000 .

Измерение проницаемости ТМ по азоту показали следующие результаты: (75,7 -120,2)  $\pm 5\%$  для ТМ, облученных ионами He и (97,5-157,4) дм<sup>3</sup>/мин·см<sup>2</sup>.

Был проведен эксперимент по обессоливанию модельного раствора морской воды « Красного моря» на экспериментальном стенде с синтезированной ТМ, облученной ионами  ${}^1\text{H}^1$ . Из- за большой толщины исходного полимера, после травления поры, как показали микроскопические исследования, имеют разные диаметры на входе и выходе ионов в полимере, т.е. возникает асимметрия пор, коэффициент разделения ионов Na и Cl в этом случае был 2,35.

Исследование финансируется за счет гранта ГЗ “Наука” 3.8173. 2017/Б4.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Apel P. Track etching technique in membrane technology //Radiation Measurements. – 2001. – Т. 34. – No. 1. – С. 559-566.
2. Ярославцев А. Б. Мембраны и мембранные технологии //М.: Научный мир. – 2013. – С. 126-163.
3. Головков В.М., Сохорева В. В. // Мембраны и мембранные технологии. 2012. Т. 2. № 2. С. 119.
4. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. // Киев:”Наукова Думка”.1975 .413 с.
5. J.F. Zigler, M.D. Zigler, J.P. Biersack //Inst. Meth. Phys. Res. B. 2010. V. 268. P. 1818.



# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И СТРУКТУРЫ РАДИАЦИОННО - ПРИВИТЫХ ПЛЕНОК ПВДФ ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ

Сохорева В.В., Дюсембекова А.А., Головков В.М.

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

E-mail: sokhoreva@tpu.ru

В настоящее время развитие производства протонообменных мембран (ПОМ) для топливных элементов представляет огромный интерес, они просто в скором времени станут незаменимыми в устройствах для стационарных и переносных потенциальных источников энергии[1]. Усилия разработчиков направлены на создание мембран, аналогичных по свойствам с коммерческими мембранами «Нафийон», но способных работать при повышенных температурах. Топливный элемент с ПОМ должен иметь высокую механическую прочность, химическую и термическую стабильность, в тоже время он должен быть доступен по цене. Ранее, большое количество исследований было направлено на разработку протоннообменных мембран путем термо - химического введения ионных групп в различные полимеры. Радиационная прививка стирола и его производных к широко распространенным и дешевым полимерам при последующем сульфировании формирует в них протон-проводящие свойства сравнимые со свойствами «Нафийона». Возможность регулирования процессов облучения, прививки и сульфирования полимеров позволяет создать протонопроводящий полимер с заранее заданными свойствами.

Авторами данной работы была проделана большая работа по радиационно - химической модификации фторсодержащего полимера ПВДФ.

В настоящей работе приводятся результаты исследований процессов модификации тонких пленок ПВДФ, облученных пучками высокоэнергетических ионов гелия и водорода, с последующей химической прививкой стирола и сульфированием кислотой  $H_2SO_4$ . Также приводятся результаты исследований влияния на степень прививки сшивающих агентов, таких как дивинилбензол. Радиационно-индуцированная прививка представляет собой процесс, когда на первом этапе при облучении в полимере образуются свободные радикалы, к ним в последствии через неспаренный электрон присоединяется мономер, образуя боковые цепи, к которым при сульфировании, даже при низких температурах, присоединяются группы  $SO_3$ , определяющие проводимость ПОМ. Прививка мономера стирола проводилась на пост - эффекте. При этом исследуемые образцы ПВДФ помещались в специальные контейнеры и облучались на выведенном в воздух пучке ионов гелия с энергией 28 МэВ и пучке ионов водорода с энергией 6,7 МэВ. Доза ионов при облучении варьировалась, но не превышала не превышала 1 МГр. Далее, прививка мономера и сульфирование, происходили по схеме, представленной в ранее опубликованной работе [2]. В таблице 1 представлены результаты измерений степени прививки, обменной емкости, проводимости для полимера «Нафийона» и образцов радиационно-модифицированных пленок ПВДФ.

**Таблица 1.- Рабочие характеристики ПОМ**

№ образца	Степень прививки, %	Степень сульфирования, %	Обменная емкость, Мг-экв/г	Доза облучения, МГр	Проводимость, См/см
Нафийон			2,1		0.019
ПВДФ №1	50.1	47	2.95	0.548	0.023
ПВДФ №2	81.6	75	3.1	0.731	0.024
ПВДФ №3	100	84	3.5	1.096	0.027

Исследование финансируется за счет гранта ГЗ “Наука” 3.8173. 2017/Б4.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Makharia R, Kocha SS, Yu PT, Gittleman C, Miller D, Lewis C, Wagner RT, Gasteiger HA (2006) Abstracts of the 208th meeting of the Electrochemical Society, Los Angeles, 16–21 Oct 2005. 502:1165.
2. A.A. Dyussebekova, V. V. Sokhoreva // Key Engineering Materials : Scientific Journal. — 2017. — Vol. 743 : High Technology:— P. 297-302.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ТВЕРДОФАЗНЫХ ИОНООБМЕННИКАХ

Нгуен Ань Куан<sup>1</sup>, Дорофеева Л.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Вьетнам; <sup>2</sup>НИ ТПУ, г. Томск

E-mail: quan1390@gmail.com

Ионообменные процессы в настоящее время эффективно применяются в промышленной водоподготовке при очистке сточных вод и технологических растворов, для извлечения урана, золота и других ценных металлов, а также в технологии неорганических и органических веществ.

Важным фактором является при этом способность твердофазного ионообменника существенно накапливать извлекаемый компонент с учётом его низкой концентрации в исходном растворе. При этом ионообменные процессы разделения и очистки веществ обладают высокой избирательной способностью и обеспечивают необходимую степень концентрирования [1]. Таким образом, проблема очистки технологических растворов, а также промышленных сточных вод от растворённых в них соединений щелочных и щелочноземельных металлов актуальна и имеет важное значение для многих отраслей промышленности. Работы, проводимые в данном направлении, основаны на изучении эффективных способов разделения, применении ионообменных материалов, отвечающих требованиям по экологической безопасности производства.

Наибольший интерес вызывают селективные ионообменники [2] применяемые для очистки сточных вод промышленных производств различного типа. Их применение обусловлено высокой сорбционной активностью, низкой стоимостью, доступностью, избирательностью. Основным преимуществом сорбентов данного типа является большая удельная поверхность.

В данной работе проводились исследования по моделированию сорбционных процессов на твердофазных ионообменниках, при этом были определены: коэффициенты селективности при разделении ионов щелочных элементов на селективных ионообменниках, высота эквивалентной теоретической ступени для непрерывной и ступенчатой подачи ионита в колонну [3], составлены параметрические модели, адекватно описывающие зависимость перепада давления через слой ионообменного материала, и величины расширения ионообменного слоя от скорости потока и температуры. Моделирование процесса ионообменного поглощения проводили с помощью уравнения, наиболее адекватно описывающего зависимость гидравлических характеристик от скорости потока с учётом температуры. В качестве аппроксимационной кривой выбрана полиномиальная. Вывод уравнений регрессии производился методом наименьших квадратов, так как экспериментальные точки в этом случае максимально приближены к аппроксимационной кривой.

В результате математической обработки результатов была получена параметрическая модель, которая показывает, что перепад давления через слой ионообменного материала зависит от гранулометрического состава зернистого слоя, объема пустот твердофазного ионообменника, высоты фильтрующего слоя, скорости потока, вязкости среды и температуры поступающего в колонну потока раствора:

$$\Delta P=f(\vartheta,T)=(\alpha_0+\alpha_1T+\alpha_2T^2)+(\beta_0+\beta_1T+\beta_2T^2)\cdot\vartheta+(\gamma_0+\gamma_1T+\gamma_2T^2)\cdot\vartheta^2$$

Расширение слоя возрастает с ростом скорости потока и с увеличением температуры уменьшается:

$$[h/h_0]-1=f(J,T)=(\alpha_0+\alpha_1T+\alpha_2T^2)+(\beta_0+\beta_1T+\beta_2T^2)\cdot J+(\gamma_0+\gamma_1T+\gamma_2T^2)\cdot J^2$$

Здесь граничные условия:  $\vartheta = 0 \div 84$  м/ч,  $T = 278 \div 298$  К,  $J = 0 \div 10$  м/ч .

Для расчета параметров использовали коэффициенты систем уравнений, расположенных с учётом увеличения температуры. Критерии, показывающие достоверность статистической обработки данных находятся в диапазоне  $0,95 \div 0,98$ , таким образом, установлено, что регрессионные уравнения процесса ионообменного поглощения соответствуют экспериментальным данным. Применение ионообменного материала с привитыми селективными свойствами более эффективно, как для процессов сорбции и ионообменного поглощения, так и изотопного обогащения, поэтому результаты могут быть использованы в различных областях, где требуется разделение, глубокая очистка и селективное извлечение ценных компонентов из технологических растворов, а также изотопное обогащение на селективном ионообменном материале.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярославцев А.Б. Ионный обмен на неорганических сорбентах// Успехи химии, 1997, Т.66, №7, С.641-660.
2. Тихомиров И.А., Вергун А.П., Дорофеева Л.И. Исследование селективных свойств неорганических ионообменников/ Томск, 2001. - 14 с. - Деп. В ВИНТИ 28.03.01, № 759 - В2001.
3. Тихомиров И.А., Вергун А.П., Дорофеева Л.И. Моделирование разделительного процесса на обменной противоточной колонне / Томск, 2001. - 8 с. - Деп. В ВИНТИ 28.03.01, № 758 - В2001.

# ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ БЕЗОПАСНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В КЕРАМИЧЕСКУЮ МАТРИЦУ

Орехов Д.В., Дорофеева Л.И.

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

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

Безопасное обращение с жидкими радиоактивными отходами, их изоляция от окружающей среды являются ключевыми вопросами атомной энергетики, решение которых способствует ее дальнейшему развитию [1]. Основная сложность в обращении с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО) состоит в постоянном ужесточении требований к их хранению и переработке. Увеличение объемов ЖРО, их передержка на промышленных площадках в неотвержденном виде негативно сказываются на радиационной безопасности атомной станции [2]. Таким образом, задача по рассмотрению комплекса вопросов, связанных с обращением с жидкими радиоактивными отходами и увеличением безопасности АЭС, является актуальной.

Жидкие радиоактивные отходы в обязательном порядке необходимо переводить в твердую форму в целях удобства хранения, транспортировки, переработки, захоронения и с точки зрения безопасности. На поглощении радионуклидов в твердой фазе основаны сорбционные методы, которые осуществляют с помощью ионного обмена, кристаллизации, сорбции и других процессов [3]. Для получения высокой степени очистки ионный обмен проводят в два этапа. На первом из ЖРО производят обессоливание, а на втором проводят непосредственное удаление радионуклидов из обессоленных отходов. Регенерация сорбента проводится путем противотока. В целях увеличения производительности фильтров скорость в начале цикла составляет 90-100 м/ч, а в конце цикла понижается до 10-20 м/ч. Для удаления из отходов цезия, стронция и кобальта, используют добавление селективных сорбентов, чаще всего монтмориллонита (наноглина), что позволяет на 98% очистить отходы от данных компонентов.

Процесс отверждения жидких радиоактивных отходов осуществляется множеством методов, такие как сушка, упаривание, прокаливание, отжиг, плавление, заключение в металлическую матрицу и другие. Наиболее перспективными с точки зрения обращения с жидкими радиоактивными отходами являются технологии включения в керамическую матрицу, которые рассмотрены в данной работе. Были проведены исследования по безопасному включению жидких отходов в керамическую матрицу и получены образцы глиняной керамики с включенными в них ЖРО, исследованы параметры разных видов глины на соответствие их требованиям, представленным в ГОСТ для РАО, отвержденных методом цементирования, а также определены оптимальные условия подготовки керамических компаундов. Возможность безопасного включения жидких радиоактивных отходов в керамическую матрицу исследовалась на основе подбор состава керамической матрицы и определения предела прочности образцов, также были произведены испытания образцов глиняных материалов на запесоченность, пластичность, водную усадку, чувствительность к сушке, спекаемость и водопоглощение. Изучены водостойкие свойства образцов, покрытых силикатом натрия. Для образцов, покрытых силикатом натрия и подвергшихся выдержке на воздухе, определена скорость выщелачивания радионуклидов. В результате экспериментов установлены рецепты, которые удовлетворяют требованиям, предъявляемым к качеству цементного компаунда.

Исследованы зависимости механической прочности от плотности и пористости материала и показано, что при увеличении плотности прочность материала увеличивается, а при увеличении пористости механическая прочность понижается. С учётом проведённых исследований произведён подбор состава матрицы с определением предела прочности керамических образцов и исследовано влияние добавок, уменьшающих водопоглощение, на прочность образцов.

В работе также определён оптимальный режим спекания, при котором достигается высокая прочность компаундов и не происходит обильного выброса радиоактивного газа.

Сравнительный анализ проведённого исследования, направленного на доработку существующего метода отверждения радиоактивных отходов путем включения в керамическую матрицу, показывает превосходство выполненной разработки над аналогами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подход к оценке безопасности способов обращения с жидкими радиоактивными отходами предприятий ядерного топливного цикла / С.А. Кабакчи, О.М. Ковалевич, Р.Б. Шарафутдинов и др. / Атомная энергия. 2002. Т. 92. Вып. 3.
2. Дмитриев С.А. Пути разрешения проблемы хранения кубовых остатков на АЭС / С.А. Дмитриев, Ф.А. Лифанов, А.Е. Савкин // Обращение с радиоактивными отходами. М.: ЭНИЦ ВНИИ АЭС, 2002.
3. Лукин В. Д. «Адсорбционные процессы в химической промышленности», Химия, 1973 - 61 стр.

## РАЗДЕЛЕНИЕ КАТИОНОВ МАГНИЯ И СТРОНЦИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Ушаков И.А., Вавилов А.Д., Головков Н.И.

Научный руководитель: Тимченко С.Н. к.т.н., доцент

Томский Политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: [mamay2008@bk.ru](mailto:mamay2008@bk.ru)

Ранее обнаруженное явление селективного дрейфа сольватированных ионов под действием внешнего асимметричного электрического поля на сегодня нашло незначительное практическое приложение. Основной причиной небольшого количества практических использований обнаруженного явления является недостаток экспериментальной информации о влиянии частот электрического поля на эффективность процессов разделения сольватированных ионов в движущихся растворах [1]. В данной работе проведен ряд экспериментов по возбуждению явления селективного дрейфа сольватированных ионов под действием внешнего “асимметричного” электрического поля на движущийся раствор солей хлоридов магния и кальция в полярном жидком диэлектрике – в воде [2].

Цель работы – исследование процессов электроиндуцированного переноса сольватированных ионов в растворе под действием асимметричного поля. Исследование частотной зависимости эффекта разделения ионов кальция и магния.

Проведено экспериментальное изучение явления электроиндуцированного селективного дрейфа сольватированных ионов в растворах электролитов под действием асимметричного электромагнитного поля на примере разделения бинарных ионных смесей хлоридов магния и кальция. Так же показано, что эффект селективного дрейфа наблюдается для каждого из присутствующих в растворе ионов в определенном диапазоне частот переменного асимметричного поля. Изучены качественные и количественные закономерности частотной зависимости содержания ионов кальция и магния в смеси их хлоридных растворов. И проведена количественная оценка эффекта разделения, характеризуемого эффектом разделения. Коэффициент разделения по кальцию при резонансной частоте в 20 Гц и напряжению 2000 В составил значение 1,12.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казарян М.А., Ломов И.В., Шаманин И.В. Электрофизика структурированных растворов солей в жидких полярных диэлектриках. -М.:Физматлит, 2011. –190с.
2. Shamanin I.V., Kazaryan M. A. Clusters Formation in Salts Solution in Polar Dielectric Liquids and Electrically-induced Separation of Solvated Ions // British Journal of Applied Science and Technology. -2014 - Vol. 4 -No. 18, p.p. 2538-2550.

## ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОМЕРОВ ОРГАНИЧЕСКИХ КИСЛОТ В ВНЕШНЕМ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Головков Н.И., Ушаков И.А., Тимченко С.Н.

Научный руководитель: Тимченко С.Н. к.т.н., доцент

Томский Политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: [mamay2008@bk.ru](mailto:mamay2008@bk.ru)

Для селекции изомеров органических кислот, находящихся в полярных растворах могут быть использованы внешние периодические электрические поля высокой частоты [1]. В настоящее время подавляющее число методов по разделению изомеров органических кислот являются химическими. Такие методы требуют значительных денежных затрат, поэтому актуальна разработка новых безреагентных методов разделения изомеров органических кислот.

В данной работе была проведена попытка разделения D- и L-энантиомеров винной кислоты под действием внешнего “асимметричного” электрического поля в полярной жидкости методом селективного дрейфа [2].

Цель работы – исследование процессов электроиндуцированного переноса различных изомеров винной кислоты  $\text{HOOC} - \text{CHON} - \text{CHON} - \text{COOH}$  марки «ч.д.а.» под действием асимметричного поля.

Проведено экспериментальное изучение явления электроиндуцированного селективного дрейфа сольватированных ионов в растворах электролитов под действием асимметричного электромагнитного поля на примере разделения D- и L-энантиомеров винной кислоты. Показано, что эффект селективного дрейфа наблюдается для каждого из присутствующих в растворе изомеров винной кислоты в определенном диапазоне частот переменного асимметричного поля. Изучены качественные закономерности частотной зависимости содержания D- и L-энантиомеров винной кислоты. Проведена количественная оценка эффекта разделения, характеризуемого эффектом разделения. Коэффициент разделения по кальцию при резонансной частоте в 250 Гц и напряжению 1000 В составил значение 1,01.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казарян М.А., Ломов И.В., Шаманин И.В. Электрофизика структурированных растворов солей в жидких полярных диэлектриках. -М.:Физматлит, 2011. –190с.
2. Shamanin I.V., Kazaryan M. A. Clusters Formation in Salts Solution in Polar Dielectric Liquids and Electrically-induced Separation of Solvated Ions // British Journal of Applied Science and Technology. -2014 - Vol. 4 -No. 18, p.p. 2538-2550.

# ОДНОМЕРНЫЙ РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ДВУХВАЛЕНТНЫХ СОЛЬВАТИРОВАННЫХ ИОНОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Ушаков И.А., Бутов В.Г., Шаманин И.В.

Научный руководитель: Тимченко С.Н. к.т.н., доцент

Томский Политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: mamay2008@bk.ru

Математическое моделирование процесса селективного дрейфа сольватированных ионов [1] различных металлов в полярном растворе под действием внешнего периодического электрического поля является одним из важных аспектов его практического применения, так как позволяет существенно сократить объем необходимых экспериментальных исследований для нахождения оптимальных параметров процесса.

Разработана одномерная модель движения сольватированных ионов под действием внешнего периодического электрического поля. В основу модели положено предположение о возможности разделения вращательной и поступательной компонент движения поляризованного аквакомплекса. Поляризация и следовательно, деформация сольватной оболочки приводит к образованию системы, подобной системе двух связанных разноименно заряженных частиц различной массы. Поляризованный аквакомплекс может образовать две системы, отличающиеся массами положительной части и следовательно, точкой расположения центра инерции диполя. Система ион-сольватная оболочка представлена в виде диполя [2], где ион представляет собой сплошной шар. Основу модели составляет уравнение движения центра масс системы ион-сольватная оболочка:

$$M \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = p \cdot \frac{\partial E}{\partial x} \cdot \cos\alpha,$$

где  $M$  – масса системы,  $x$  – координата движения системы,  $t$  – время,  $p$  – дипольный момент,  $E$  – напряженность поля.

$$I \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} = r \cdot p \cdot \frac{\partial E}{\partial x} \cdot \cos\alpha,$$

где  $I$  – момент инерции,  $\alpha$  – угол поворота диполя,  $t$  – время,  $r$  – расстояние между центром масс системы и сольватной оболочкой,  $p$  – дипольный момент,  $E$  – напряженность поля.

При помощи разработанной модели движения ион-сольватная оболочка под действием ассиметричного электрического поля получены результаты расчетов траекторий движения двухвалентных сольватированных ионов под действием внешнего периодического электрического поля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. V. Shamanin [et al.] // Excitation Frequencies of the Effects of Selective Drift of Solvated Cations in Moving Salts Solution [Electronic resource] / MATEC Web of Conferences. — 2017. — Vol. 96 : Fundamental Aspects of Rare-Earth Elements Exploration, Mining and Separation and Modern Materials Engineering (REE-2016).
2. I. V. Shamanin [et al.] // Separation of calcium and magnesium solvated cations under the action of external periodic electric field on moving solution [Electronic resource] / Bulletin of the Lebedev Physics Institute. — 2017. — Vol. 44, iss. 5. — P. 137-142.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИОНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ

Дорофеева Л.И., Орехов Д.В.

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

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

Разделение изотопных и ионных смесей посредством электромиграции используется в процессах очистки и селективного извлечения ценных компонентов [1] отработанных технологических растворов, получения моноизотопной продукции и актуально для многих отраслей промышленности. Нами рассмотрены особенности применения электроионитных процессов для электрорегенерации [2] отработанных технологических растворов.

В работе рассмотрены процессы электромиграции при электродиализе с межмембранным заполнением органическими и неорганическими катионитами. Определено время диффузии ионов через рабочую камеру электродиализатора, работающего в динамическом режиме подачи раствора, а также условия переноса ионов в вертикальном и горизонтальном направлениях [3]. Изменение удельного сопротивления раствора, выходящего из средней камеры электродиализатора, показано на рис. 1.

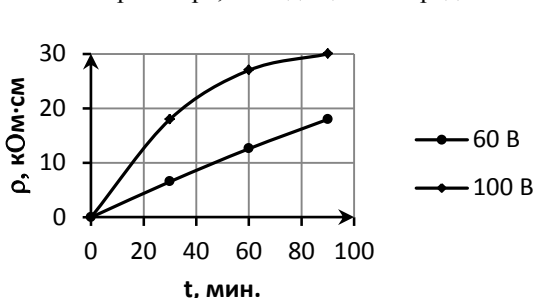


Рис. 1. Изменение удельного сопротивления раствора.

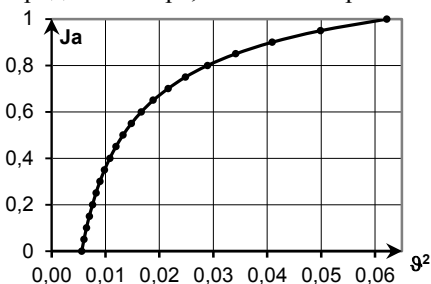


Рис. 2. Скорость перемещения фронта концентрационной волны.

Анализ кинетических характеристик процесса транспорта ионов показывает, что при электродиализе с заполнением межмембранного пространства интенсивность массопереноса возрастает. Скорость перемещения точки фронта концентрационной волны по средней камере электродиализного аппарата зависит как от ионообменной ёмкости ионообменника, так и от pH раствора.

Проведённые исследования показывают, что при электродиализе в смешанном слое ионитов происходит эффективное удержание ионов в ионообменной насадке с последующим перемещением их в катодную камеру электродиализатора, поскольку поглощаемые катионитом ионы металла перемещаются по зёрнам ионита под действием постоянного электрического поля. Одновременно с этим происходит перенос тех же ионов по свободному пространству между зёрнами ионита из раствора, проходящего через это пространство в процессе перемещения через слой ионообменной насадки.

В ходе последующего моделирования процесса регенерации ионообменника была рассчитана скорость перемещения фронта концентрационной волны по межкамерному пространству электродиализатора с межмембранным заполнением ионообменным материалом и установлена взаимосвязь скорости движения фронта концентрационной волны с ионообменной ёмкостью ионита (рис. 2), а также определены затраты энергии и условия электропитания электродиализного аппарата.

Из полученных результатов следует, что двухфазная ионообменная система может быть использована как среда для электромиграционного разделения, так и эффективное средство обращения потоков фаз, что расширяет области практического применения электроионитных процессов. Применение динамического режима подачи ионообменника в среднюю камеру электродиализатора эффективно с точки зрения осуществления замкнутых непрерывных процессов регенерации ионообменников, результаты работы могут быть использованы на предприятиях для процессов очистки технологических растворов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярославцев А.Б. Ионный обмен на неорганических сорбентах// Успехи химии, 1997, Т.66, №7, С.641-660.
2. Измайлов Н.А. Электрохимия растворов. Москва: Химия, 1976. - 488 стр.
3. Вергун А.П., Тихонов Г.С., Дорофеева Л.И. Деионизация никельсодержащих растворов гальванического производства. // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т.306, № 2.– С. 38 - 39. - ISBN 60579582.

# ВЛИЯНИЕ РАЗБАВИТЕЛЯ КРАУН-ЭФИРА НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЗОЛОТА(III) ИЗ СОЛЯНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ СОРБЕНТАМИ НА ОСНОВЕ БЕНЗО-15-КРАУН-5

Выдыш А.А.<sup>1</sup>, Бежин Н.А.<sup>1</sup>

Научный руководитель: Довгий И.И.<sup>2</sup>, к.х.н., доц.

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053, Россия,  
г. Севастополь, ул. Университетская, 33

<sup>2</sup> ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН», 299011, Россия, г. Севастополь,  
ул. Капитанская, 2

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

Селективное сорбционное выделение металлов широко используется в радиоаналитической химии и радиохимических технологиях. В настоящее время разработаны и коммерчески доступны селективные сорбенты для выделения многих элементов. Наиболее известные производители за рубежом – Eichrom Technologies, США; Triskem International, Франция; IBC Advanced Technologies, Inc., в России «Сорбент-технологии», г. Москва; Аксион-РДМ, г. Пермь.

Высокая эффективность и селективность в извлечении золота из солянокислых растворов ранее была показана для кристаллических цис- (4,4'-) и транс- (4,5'-) изомеров динитро-дibenзо-18-краун-6 (ДНДБ18К6) [1], а также бензо-15-краун-5 (Б15К5) и бромпроизводных ряда краун-эфиров [2].

Сорбция металлов кристаллическими краун-эфиром нецелесообразна ввиду их большого расхода как достаточно дорогих реактивов. Поэтому нами был получен ряд сорбентов на основе неионогенного носителя LPS-500 (100-250 мкм), бензо-15-краун-5, различных разбавителей краун-эфира (октанол-1, нитробензол, ионная жидкость  $C_4mim^+Tf_2N^-$ , спирт-теломер n3), а также без разбавителей. Изучено извлечение золота(III) из растворов с концентрацией соляной кислоты 0,1; 1 и 3 М, а также нейтральных растворов. Методика получения сорбентов описана нами ранее [3]. Наиболее высокие значения коэффициента распределения золота показали сорбенты, в которых разбавителем краун-эфира является нитробензол. Для большинства сорбентов максимальные значения извлечения наблюдались в 1 М соляной кислоте.

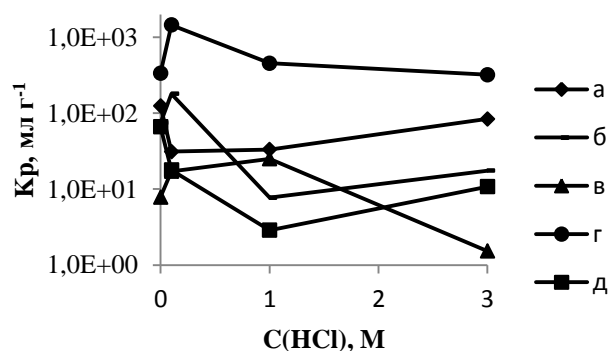


Рис. 1. Зависимость коэффициента распределения Au(III) от концентрации соляной кислоты для сорбентов на основе бензо-15-краун-5 и различных разбавителей: а) без разбавителя, б) ионная жидкость  $C_4mim^+Tf_2N^-$ , в) спирт-теломер n3, г) нитробензол, д) октанол-1.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развития малых форм предприятий в научно-технической сфере (программа Старт-1, проект №26888) и государственного задания ФАНО Российской Федерации (тема «Фундаментальная океанография» № 0827-2014-0010).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якшин В.В., Вилкова О.М., Царенко Н.А., Цивадзе А.Ю. Реакционная способность цис- и транс-изомеров динитро- и диаминозамещенных дибензо-18-краун-6 в процессах сорбции солей металлов // Доклады Академии Наук. – 2010. – Т. 430, №3. – С. 342-344.
2. Якшин В.В., Вилкова О.М., Плужник-Гладырь С.М., Котляр С.А. Краун-эфир в экстракции и сорбции. I. Бромпроизводные бензо- и дибензокраун-эфиров в процессах сорбции элементов из кислых водных растворов // Макрогетероциклы. – 2010. – Т. 3, №2-3. – С. 114-120.
3. Bezhin N.A., Dovhyi I.I., Lyapunov A.Yu. Sorption of strontium by sorbents on the base of di-(tertbutylcyclohexano)-18-crown-6 with use of various diluents // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2017. – Vol. 311. – No. 1. – P. 317-322. DOI: 10.1007/s10967-016-4983-2.



# TITANIUM POWDER SEGREGATION OUT OF CATHODE DEPOSIT OF TITANIUM ELECTROLYZERS

Karelin<sup>1,a</sup> V.A., Strashko<sup>1,b</sup> A.N., Sazonov<sup>1,c</sup> A.V., Karelina<sup>2,d</sup> N.V.

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

<sup>2</sup>St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

<sup>a</sup>vakarelin@tpu.ru, <sup>b</sup>strashkoan@tpu.ru, <sup>c</sup>alexsaznv@gmail.com, <sup>d</sup>nvkarelina@yandex.ru

Processes of fluorination and electrolytic reduction of  $TiF_4$  in a fluoride salt melt are key processes of fluoride technology for producing titanium powders [1]. The present work is devoted to the development of one of the most important stages of the proposed fluoride titanium technology - the process of washing off the cathode deposit from electrolyte salts. This deposit forms in the course of electrolytic recovery of titanium from fluoride melts.

In order to wash off impurities of titan-containing cathode deposit, two techniques were proposed - in a mixture of inorganic acids and anhydrous HF; advantages of washing off with HF are shown; the impurity content in the titanium powder obtained by washing off in anhydrous HF is slightly lower than at "acid" washing off. This happens due the dissolution of these impurities in anhydrous HF in the course of washing off. In the industrial implementation of washing off the cathode deposit in anhydrous HF, this reagent recycles tin a circuit that ensures environmental safety of production and low production cost of the obtained titanium powder.

When carrying out washing off, the cathode deposits of 50 g weight. Ti content in sediments was 30-35% by weight (17.5 g), and the content of fluoride salts of electrolyte LiF-KF-NaF – 70-65 % by weight (32.5 g) accordingly. Results cathode deposit change studies in dependence on the temperature are shown in Fig. 1. Obtained results show that at  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  the decrease in the cathode deposit weight occurs in the minimum time – 20-22 minutes. With increasing washing off temperature sharply increases the number of HF, being in a gas phase, and the washing off process becomes ineffective.

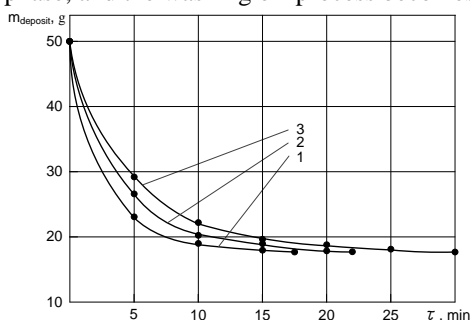


Fig. 1. Effect of washing off temperature on the change in the cathode deposit weight. Temperature of the washing off process: 1 –  $-50\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $-30\text{ }^\circ\text{C}$ .

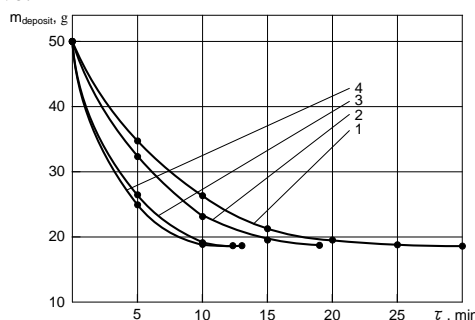


Fig. 2. Effect of HF excess on the dissolution rate of fluoride salts of the cathode deposit. Temperature of the washing off process  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ ; HF excess: 1 – 5 % vol.; 2 – 10 % vol.; 3 – 20 % vol.; 4 – 30 % vol.

The effect of HF excess on the dissolution rate of fluoride salts contained the cathode deposit at  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ . The research results are presented in Fig. 2. It is shown that when increase of HF excess from 5 up to 20% by volume, the dissolution time of fluoride salts, contained in the cathode deposit, is reduced. These salts dissolve almost completely in 20% by volume. HF excess in the course of 10-12 minutes. Increase of HF excess of HF up to 30% by volume does not lead to reducing dissolution time of the cathode deposit. Therefore, the deposit dissolution process should be performed at 20% HF excess.

## BIBLIOGRAPHY

1. Cardarelli F. "Materials Handbook. A Concise Desktop Reference." 2<sup>nd</sup> edition. Springer, New York. – 2008. – P. 288-296.

## ПЛАЗМЕННАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ПОСЛЕ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Шестакова Л.А.<sup>1,2</sup>, Ефремов И.Г.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>ФГУП «Горно-химический комбинат», 662972, г. Железногорск, Красноярского края, ул. Ленина, д. 53

E-mail: shestakova\_lyu@mail.ru

Госкорпорация «Росатом» первой в мире реализует создание российского замкнутого ядерного топливного цикла, который предусматривает поставку с АЭС отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), его выдержку и переработку с извлечением изотопов уран-238 и плутоний-239, производство на их основе МОКС-топлива и последующую его поставку на АЭС, использующих реактора на быстрых нейтронах.

Основой технологии переработки ОЯТ радиохимических заводов является ПУРЕКС-процесс, обеспечивающий высокую степень извлечения урана и плутония с высокой степенью их очистки от продуктов деления. При этом в качестве экстрагента для извлечения урана и плутония применяют трибутилфосфат (ТБФ) с различными разбавителями (очищенные углеводороды, четыреххлористый углерод, гексахлорбутадиен, керосин и др.) [1,2].

Под действием радиоактивного облучения, обусловленного высоким содержанием в водно-Охвостовых растворах продуктов деления, плутония и транс-плутониевых элементов, экстрагент с течением времени теряет свою эффективность и превращается в горючие отходы переработки ОЯТ (ГОП ОЯТ). Концепция замкнутого ЯТЦ предусматривает утилизацию образующихся жидких радиоактивных отходов, обеспечивающую их длительное хранение или последующее использование.

Для переработки таких отходов перспективным является применение плазмы электрических разрядов [3,4].

В данной работе представлены результаты термодинамического моделирования процесса плазменной утилизации ГОП ОЯТ в воздушной плазме в виде оптимальных по составу горючих водно-органических композиций (ВОК).

По результатам расчетов показателей горючести различных по составу водно-органических композиций на основе ГОП ОЯТ определены составы ВОК, имеющие низшую теплотворную способность не менее 8,4 МДж/кг и адиабатическую температуру горения не менее 1200 °С, обеспечивающие не только существенное снижение затрат электрической энергии на плазменную обработку ГОП ОЯТ (до 0,1 МВт·ч/т), но и дополнительное получение тепловой энергии (до 2,0 МВт·ч/т).

Термодинамические расчеты проведены при атмосферном давлении (0,1 МПа), в широком интервале температур (300-5000 К) и массовых долях воздушного плазменного теплоносителя (0,1-0,9), для различных по составу разбавителей. Для расчетов был использован программный комплекс «TERRA».

С учётом полученных результатов определены следующие режимы для процесса плазменной утилизации ГОП ОЯТ в воздушной плазме:

- интервал рабочих температур (1200±100) К;
- состав ВОК (50 % Вода : 17,5 % ТБФ : 32,5 ГХБД);
- массовое отношение фаз (65 % воздух : 35 % ВОК).

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании промышленных установок для плазменной утилизации отходов переработки ОЯТ и других жидких радиоактивных отходов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скачек М.А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС. М.: Изд. дом МЭИ, 2007.-448 с.
2. Рябчиков Б.Е. Очистка жидких радиоактивных отходов. – М.: ДеЛи принт, 2008. – 512 с.
3. Туманов Ю. Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. – М.: «Физматлит», 2003. – 759 с.
4. Karengin A. G., Karengin A. A., Podgornaya O. D., Shlotgauer E. E. Complex utilization of processing wastes in air plasma of high-frequency torch discharge // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. - № Article number 012034. - P. 1-6.

**ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ**

- А -

Акимов Д.В. 68  
Акылтаева А.А. 61  
Алюков Е.С. 43  
Антипин В.А. 60  
Антоненко М. В. 47

- Б -

Бабаев Р. Г. 40  
Балашков В.С. 69, 70  
Bedenko S. V. 34, 49, 66  
Бежин Н.А. 80  
Беляков Д.М. 69, 71  
Беспала Е.В. 44, 45  
Беспала Ю.Р. 31  
Болгов С.Ю. 16, 19  
Bonarev A.K. 20  
Борецкий Е.А. 57  
Бутов В.Г. 78

- В -

Вавилов А.Д. 76  
Варламов И.А. 61  
Вергун А.П. 69, 70, 71  
Верхорубов Д.Л. 56, 57  
Видяев Д.Г. 58, 59  
Voronina T.V. 28  
Выдыш А.А. 80

- Г -

Гамов Д.Л., 23, 24, 26, 27  
Головацкий А.В. 55  
Головков Н.И. 76, 77  
Головков В.М. 72, 73  
Grigoryev A.S. 23, 24, 45, 46, 51

- Д -

Довгий И.И. 80  
Дорофеева Л.И. 74, 75, 79  
Дюсембекова А.А. 73

- Е -

Егоров Н.Б. 53, 68  
Емец Е.Г. 55

Еремеев Р.С. 25, 26  
Ефремов И.Г. 82

- З -

Загузин И.Ю. 23, 51, 52  
Зайцева А.С. 53  
Zor'kin A. I. 46

- Ж -

Ижойкин Д.А. 24, 27

- К -

Кабанов Д.В. 54  
Кабак В.Ю. 70, 71  
Калиновский Ю.А. 61  
Karelin V.A. 81  
Karelina N.V. 81  
Каренгин А.А. 36, 38  
Каренгин А.Г. 35  
Карпунин С.М. 64  
Кньшев В.В. 44  
Колточник С.Н. 60  
Kozhakhmet B.K. 62  
Копцев М.О. 72  
Kostromin V. V. 34  
Котельникова А.А. 15, 48  
Котляревский С.Г. 44  
Кузеро В.Б. 41  
Кулиев Р.У. 35  
Куценко Б.Д. 60

- Л -

Ларионов В. В. 63  
Лемякин А.Э. 58  
Леонтьева Д.А. 16, 17, 24, 52  
Луценко Ю.Ю. 19, 30

- М -

Макаревич С.В. 23, 45, 51  
Малюгин Р.В. 15, 17  
Мендоса О. 37  
Меркулов В.Г. 54  
Мударисов О.В. 44, 45  
Mukhnurov I. A. 34

Мышкин В.Ф. 45

- Н -

Нгуен Ань Куан 74

Неклюдов А.А. 19

Нестерова Ю.В. 33

Никишкин И.Ю. 42

Новоселов И.Ю. 41, 44

- О -

Орлов А.А. 14, 15, 17

Орехов Д. В. 75, 79

- П -

Павленко А.П. 36

Павлюк А.О. 44, 45

- Р -

Родионов А.В. 56, 58, 59

Роздольский В.Г. 22, 23, 25

Romanov B. S. 34

Román Matías R. 34

Рычков Ю.В. 64

- С -

Савостиков Д.В. 57

Sazonov A.V. 81

Селехова Е.А. 39

Сидоренко В.С. 16

Скорынин Г.М. 18

Smirnov A.Yu. 20

Сопыряев В.В. 30

Сохорева В.В. 73

Сосновский А.С. 25

Strashko A.N. 81

Сыртанов М.С. 63

- Т -

Тимченко С.Н. 16, 77

Тундешев Н.В. 43

Tugusheva D.Yu. 28

Тюделеков Е.А. 50

- У -

Ukrainets O. A. 49

Ушаков А.А. 14, 18

Ушаков И.А. 16, 19, 76, 77, 78

- Ф -

Федоренков С.В. 64

- Х -

Хорохорин Д.М. 22, 52

Худолеев П.Н. 55

- Ц -

Цимбалюк А.Ф. 15, 17

- Ч -

Chubreev D.O. 45, 46

Чинзориг С. 72

- Ш -

Шаймерденов А.А. 60

Шаманин И.В. 49, 60, 61, 78

Шестаков Р.Г. 66

Шестакова Л.А. 82

Шикерун К.Т. 22

- Ю -

Юрьев П.А. 51, 52

- Я -

Yan J. 60

Научное издание

# **ИЗОТОПЫ: ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ И ПРИМЕНЕНИЕ**

Сборник тезисов докладов  
IV Международной научной конференции  
молодых ученых, аспирантов и студентов

**Издано в авторской редакции**

**Отпечатано в ООО «Графика» в полном соответствии с  
качеством представленного оригинал-макета**

Подписано к печати 12.09.2016. Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 3,96.

Заказ 2667. Тираж 50 экз.

ООО «Графика». 634050, г. Томск, ул. Беленца, 17