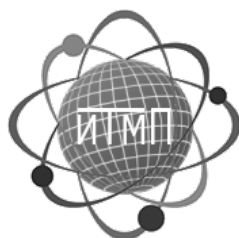


**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---



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

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

26–29 октября 2020 г.



**Инженерная школа  
ядерных технологий**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Томск 2020

УДК 621.039.8.002(063)

ББК 35.36л0

ИЗ8

**ИЗ8** **Изотопы: технологии, материалы и применение** : сборник тезисов докладов VI Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (26–29 октября 2020 г.) / Томский политехнический университет. – Томск : Томский политехнический университет, 2020. – 112 с.

Сборник содержит тезисы 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 621.039.8.002(063)**

**ББК 35.36л0**

**Мероприятие проводится при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований грант № 20-08-22056**

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2020

## **ПРИВЕТСТВИЕ УЧАСТНИКАМ КОНФЕРЕНЦИИ**

Инженерная школа ядерных технологий Томского политехнического университета, является одной из ведущих центров подготовки специалистов для атомной промышленности, проводит VI 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 изотопно-модифицированных 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, изотопно-модифицированных 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: Юсубов Мехман Сулейман оглы** – проректор по науке ТПУ, Россия

**Заместитель председателя: Шаманин И.В.** – зав. лаб. ИАТ ИЯТШ, руководитель ОЕН ТПУ, Россия

### Члены программного комитета

**Филимонов С.В.** – генеральный директор АО «ПО ЭХЗ», Россия

**Кенжин Е.А.** – генеральный директор, Институт ядерной физики Министерство энергетики Республики Казахстан, Казахстан

**Tichy M.** – Dr., Prof., full professor Charles University, Faculty of Mathematics and Physics, Department of Surface and Plasma Science, Czech

**Li Hongda** – Associate Professor Shenyang Ligong University, Equipment engineering college, China

**Вурим А.Д.** – заместитель директора, Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, Казахстан

**Plekhanov V.G.** – Dr., professor, Head of Fonoriton Sci. Lab., Gron Ltd, Tallinn, Estonia

**Крутых В.Н.** – главный специалист по техническому обеспечению производства АО «СХК»

**Углов В.В.** – заведующий кафедрой, Белорусский государственный университет, Республика Беларусь

**Власов В.А.** – профессор ректор ФГБОУ ВПО ТГАСУ, Россия

**Duisebayev V.O.** – Dr., Universal Design Technological Bureau LLP, Almaty, Kazakhstan

**Юхин Ю.М.** – профессор, главный научный сотрудник Института химии твердого тела и механохимии СО РАН, Россия

**Ильин С.А.** – директор ЗРИ АО «СХК», Россия

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ**

**Председатель:** Долматов О.Ю., директор Инженерной школы ядерных технологий ТПУ

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

### **Члены организационного комитета**

**Мышкин В.Ф.** (сопредседатель) – д.ф.-м.н., профессор ОЯТЦ ТПУ

**Вергун А.П.** – д.ф.-м.н., профессор ОЯТЦ ТПУ

**Видяев Д.Г.** – д.т.н., профессор ОЯТЦ ТПУ

**Дорофеева Л.И.** – к.ф.-м.н., доцент ОЯТЦ ТПУ

**Каренгин А.Г.** (зам. председателя) – к.ф.-м.н., доцент ОЯТЦ ТПУ

**Новоселов И.Ю.** – ассистент ОЯТЦ ТПУ

**Орлов А.А.** – д.т.н., профессор ОЯТЦ ТПУ

**Побережников А.Д.** - старший преподаватель ОЯТЦ ТПУ

**Рыжакова Н.К.** – к.ф.-м.н., доцент ОЯТЦ ТПУ

**Тимченко С.Н.** – к.т.н., доцент ОЯТЦ ТПУ

## Пленарное заседание

МИЛАН ТИХИ

Термоэмиссионная вакуумная дуга (ТВА), универсальная технология для осаждения тонких пленок и её применения

СМИРНОВ А.Ю.

Проблемы обогащения регенерированного урана в контексте многократного рецикла в легководных реакторах

СКОРЫНИН Г.М.

История разделения изотопов: мифы и факты

PLEKHANOV V.G.

Изотопический эффект – макроскопическое проявление сильного ядерного взаимодействия

КРУТЫХ В.Н.

Современные тенденции в РОСАТОМЕ

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция 1. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ

ПАЛКИН В.А., ЛУБНИН С.С., ТОКМАНЦЕВ В.И.	
Оптимальное концентрирование промежуточных изотопов молибдена в дополнительном отборе многопоточного каскада .....	1 7
ЛУБНИН С.С., ТОКМАНЦЕВ В.И.	
Моделирование течения в прямоточной газовой центрифуге .....	1 7
ВЕРЛИНСКИЙ М.В., МАЛЮГИН Р.В., ОРЛОВ А.А.	
Десублимация $UF_6$ в вертикальные погружные емкости с гладкими внутренними стенками, вертикальным и горизонтальным оребрением .....	1 8
АЗИЗОВ Т.Э., СМИРНОВ А.Ю., СУЛАБЕРИДЗЕ Г.А.	
Оптимизация двух- и трехкаскадных схем для эффективного разделения стабильных изотопов .....	1 8
УШАКОВ А.А., СОВАЧ В.П., ОРЛОВ А.А.	
Накопление компонентов изотопной смеси в разделительном каскаде.....	1 9
СМИРНОВ А.Ю., ГУСЕВ В.Е., СУЛАБЕРИДЗЕ Г.А., НЕВИНИЦА В.А.	
Проблемы обогащения регенерированного урана в контексте многократного рецикла в легководных реакторах .....	1 9
ВЕРЛИНСКИЙ М.В., МАЛЮГИН Р.В., ЦИМБАЛЮК А.Ф.	
Влияние толщины и материала стенок емкости на скорость десублимации гексафторида урана .....	2 0
ВЕРЛИНСКИЙ М.В., ШИНКЕВИЧ Р.А., МАЛЮГИН Р.В.	
Влияние размеров вертикальных ребер в вертикальных погружных емкостях на динамику десублимации гексафторида урана .....	2 1
USHAKOV A.A., SOVACH V.P.	
Modeling of filling gas centrifuge cascade for nickel isotope separation by feed flow input to different stages .....	2 1

УШАКОВ А.А., ОРЛОВ А.А.	
Свойства изотопной смеси и их изменение в разделительном процессе.....	2
	2
ШИНКЕВИЧ Р.А., ОРЛОВ А.А.	
Разделение изотопов германия в каскаде газовых центрифуг.....	2
	2
БАЛАЕВ Д.Б.	
Влияние диаметра отверстий в горизонтальных ребрах вертикальной погружной емкости на динамику ее заполнения десублимированным UF <sub>6</sub> .....	2
	3
ТУРБИНА И.А.	
Динамика заполнения вертикальной погружной емкости с горизонтальными ребрами десублимированным UF <sub>6</sub> .....	2
	3
ПРОЩЕНКО А.В.	
Расчет параметров Q-каскада для получения высокообогащенного молибдена-98 .....	2
	4
СКОРЫНИН Г.М., ОРЛОВ А.А.	
История разделения изотопов в СССР .....	2
	4
ЛЕОНТЬЕВА Д.А.	
Влияние диаметра центрального отверстия горизонтальных ребер емкости объемом 60 литров на ее среднюю производительность .....	2
	4

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

КИСЕЛЕВ С.С.	
Повышение разрешающей способности масс-спектрометрических измерений методом аппаратной функции .....	27
ХОРОХОРИН Д. М., ЕРЕМЕЕВ Р. С., ЛУКИН А. В.	
Лазерная абляция поверхности стали .....	28
ХОРОХОРИН Д. М., ЕРЕМЕЕВ Р. С.	
Лазерный нагрев частиц тугоплавких оксидов .....	29
ХОРОХОРИН Д. М., КУЗНЕЦОВ М. С., ЛУКИН А. В.	
Очитка поверхности металла от пылинок за счет лазерного	



нагрева .....	30
ИЖОЙКИН Д. А., ЛУКИН А. В.	
Современные достижения лазерного разделения изотопов .....	31
ТУКСОВ И. В., ХОРОХОРИН Д. М., ЛУКИН А. В.	
Отбор проб нанопорошка из очага лазерного пробоя .....	32

### **Секция 3. ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В ЯДЕРНО-ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ**

ТУКСОВ И. В., ВАН ЦАЙЛУНЬ, КАРГИНА П. С.	
Модель формирования наночастиц в магнитном поле .....	3
	4
ИЖОЙКИН Д.А., ТУКСОВ И.В., КЕЙНИХ Д. Д.	
Получение нанопорошка в низкотемпературной плазме, находящейся в слабом магнитном поле .....	3
	5
ШЕХОВЦОВ В.В., ГАФАРОВ Р.Е., ВОЛОКИТИН О.Г.	
Синтез муллитосодержащих продуктов в условиях термической плазмы .....	3
	6
ШЕХОВЦОВ В.В., ВОЛОКИТИН О.Г.	
Исследование структуры продуктов плавления, полученных с использованием электродугового разряда в плазмохимическом реак- торе .....	3
	7
ШИКЕРУН К. Т.	
Получение порошков жаропрочных сплавов методом газовой атомизации .....	3
	8
ШИКЕРУН К. Т.	
Формирование микроструктуры порошков жаропрочных сплавов, получаемых методом газовой атомизации .....	3
	9
PARIMALA RANGAN FIDEL CASTRO	
Thermal hydraulic calculation of the channels of a nuclear reactor (SCWR) .....	4
	0
ЗОРЬКИН А.И., УКРАИНЕЦ О.А.	
Эффективные топливные добавки для улучшения термодинамиче- ских свойств UO <sub>2</sub> в режимах работы реактора LWR .....	4
	1
ПРИМА А.И.	

Генерация импульсного нейтронного пучка при облучении дейтерированной мишени ускоренными атомами .....	4 1
АНДРЕЕВ Д.В.	
Синтез в воздушной плазме и исследование оксидных композиций «оксид неодима-оксид самария - оксид магния» .....	4 2
ИВАНОВ К.С., НОВОСЕЛОВ И.Ю., ТИХОНОВ А.Е.	
Плазмохимический синтез и исследование наноразмерных сложных оксидных композиций, моделирующих дисперсионное плутоний-ториевое ядерное топливо .....	4 3
КАРЕНГИН А.А., КУЗНЕЦОВ С.Ю., ИВАНОВ К.С.	
Плазмохимический синтез и исследование наноразмерных оксидных композиций, моделирующих дисперсионное REMIX-топливо .....	4 4
РАСТОРГУЕВ В.И., КАРЕНГИН А.А., ЕЛЬМИРОВ Д.В.	
Плазмохимический синтез и исследование наноразмерных сложных оксидных композиций, моделирующих дисперсионное уран-плутониевое ядерное топливо .....	4 5
ТИХОНОВ А.Е., РАСТОРГУЕВ В.И., КАРЕНГИН А.А.	
Плазмохимический синтез и исследование наноразмерных сложных оксидных композиций, моделирующих дисперсионное уран-ториевое ядерное топливо .....	4 6
БАСС В.И., ИВАНОВ К.С., ЗУБОВ В.В.	
Плазмохимический синтез и исследование оксидных композиций «оксид самария–оксид церия–оксид магния» .....	4 7
ШЕСТАКОВА Л.А.	
Плазмохимическая переработка иловых отложений бассейнов-хранилищ жидких радиоактивных отходов .....	4 7
ХОЦЕЛОВСКИЙ Н.С., КАРЕНГИН А.А., ПОБЕРЕЖНИКОВ А.Д.	
Плазмохимический синтез и исследование наноразмерных сложных оксидных композиций, моделирующих дисперсионное уран-ториевое ядерное топливо .....	4 8
TIKHONOV A.E, NOVOSELOV I.YU.	
Synthesis of oxide powders for nuclear fuel in plasma of torch	

discharge.....	4 9
TIKHONOV A.E. Comparison of $Y_2O_3$ and $ZrO_2$ synthesized from water nitrate solutions and water-organic nitrate solutions .....	5 0
<b><u>Секция 4. ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОТОПОВ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ, ПРИКЛАДНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И МЕДИЦИНЕ. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОТОПНО- МОДИФИЦИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ</u></b>	
ДМИТРИЕВ В.В., ВИДЯЕВ Д.Г. Моделирование движения фаз в ректификационной колонне для систем газ-жидкость .....	5 3
ДМИТРИЕВ В.В., ВИДЯЕВ Д.Г. Термический анализ работы ректификационной колонны .....	5 3
ЦВЕТКОВ А.Д., СУКОТНОВА В.В. Развитие адсорбционной способности углеродных материалов .....	5 4
БОРЕЦКИЙ Е.А. Определение оптимального давления прессования при фабрикации углеродных материалов.....	5 5
БОРЕЦКИЙ Е.А. Разработка процесса нагрева образцов технического углерода подверженного фабрикации .....	5 5
АКИМОВ В.Н., СУКОТНОВА В.В. Улучшение сорбционной способности углеродных материалов методом плазменной обработки .....	5 6
ГУСЕВ Н.В. Получение металлического вольфрама-186 из его гексафторида .....	5 7
XU Y.B., BEDENKO S.V., SHAMANIN I.V. Features of the formation of radiation in a new-generation of fuel with a complex internal heterogeneous structure .....	5 8

ПОБЕРЕЖНИКОВ А.Д., УШАКОВ И.А., ТИМЧЕНКО С.Н., ЗУКАУ В.В., КУЗЬМЕНКО А.С.	
Автоматизированная система хранения и обработки экспериментальных данных процесса селективного дрейфа радиоактивных изотопов .....	5 9
БУТОВ В.Г., ГОЛЫЦМАН А.И., ТИМЧЕНКО С.Н.	
Расчет каскадов газовых центрифуг с произвольной схемой соединения ступеней с использованием программы SIMULINK .....	6 0
PLEKHANOV V.G.	
Prospects for isotope materials science .....	6 0
ШИКЕРУН К. Т.	
Исследование альтернативных методов получения легированных порошков титана для аддитивных технологий.....	6 1
КАБАНОВ Д.В., ТИМЧЕНКО С.Н., УШАКОВ И.А., КУЗЬМЕНКО А.С.	
Наработка радиоактивного изотопа $^{85}\text{Sr}$ на исследовательском реакторе ИРТ-Т для изучения процесса селективного дрейфа в электрическом поле .....	6 2
КОЛЕСНИКОВ Е.В.	
Проведение анализа на пористость графитовых пресс-композиций .....	6 3
КОЛЕСНИКОВ Е.В.	
Проведение термического анализа углеродных-композиций с помощью программного обеспечения WORKS .....	6 4
КНЬШЕВ В.В., ЛУЦИК И.О., ЗОРЬКИН А.И.	
Применения $\text{VF}_3$ в качестве компенсирующего материала и дополнительной аварийной защиты в ВТГР .....	6 5
УКРАИНЕЦ О.А	
Процесс дефектообразования в модифицированных фторопластах и других материалах ядерной промышленности под действием гамма-излучения .....	6 6
КУЗЬМЕНКО А.С., САВОСТИКОВ Д.В.	
Моделирование колонного обменного процесса для двухфазных	

систем жидкость–жидкость .....	6
	7

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

ЦХЕ А.А., СОСНОВСКИЙ С.А. Очистка техногенных отходов гуминовыми кислотами, полученными в условиях электроимпульсной обработки торфа ....	69
ЦХЕ А.А., ИЛЬИН А.П., СОСНОВСКИЙ С.А. Очистка жидких сред от органических соединений в условиях воз- действия радикалов, образующихся в плазме СВЧ-разряда .....	70
БАЛАШКОВ В.С., ВЕРГУН А.П., БЕЛЯКОВ Д.М. Исследование процессов изотопных разделений в обменных колоннах с движущейся фазой ионита .....	71
БАЛАШКОВ В.С., ВЕРГУН А.П. БЕЛЯКОВ Д.М. Моделирование электрохроматографических процессов изотопного разделения в системе ионит-раствор .....	72
ГУСЕВ Н.В. Очистка изотопно-обогащенного металлического свинца .....	73
РАСПУТИН И.В., ГУБСКАЯ М.Л. Применение флокулянтов besfloc в технологии переработки облученного ядерного топлива .....	74
ЛЕ Ш.Х., КАРЕЛИН В.А., КАРЕЛИНА Н.В. Флотационное обогащение титансодержащих песков из Вьетнама ..	75
ЖУРАВЛЕВ Н.А., РАСПУТИН И.В., КАРЕЛИН В.А. Особенности применения нитрата алюминия при переработке ОЯТ	76
ЛЕ ШОН ХАЙ, КАРЕЛИНА Н.В., КАРЕЛИН В.А. Исследование процесса фторирования ильменитовых концентратов	77
РАСПУТИН И.В., ЖУРАВЛЕВ Н.А., КАРЕЛИН В.А. Переработка облученного ядерного топлива с применением флокулянтов .....	78
ГОЛОВКОВ Н.И., СОСНОВСКИЙ С.А. Очистка техногенных растворов в условиях высокотемпературного распылительного реактора .....	79
ГОЛОВКОВ Н.И., СОСНОВСКИЙ С.А., КУДАБАЕВ Б.Б. Исследование процесса очистки руд при воздействии высоковольтного импульсного разряда .....	80
ГОЛОВКОВ Н.И., СОСНОВСКИЙ С.А., САЧКОВ В.И. Электроэкстракционно - плазменная технология очистки и переработки руд содержащих редкоземельные элементы .....	81
КОПЦЕВ М.О., МУХАМБЕТАЛИН Д.Б.	

Электро-мембранное разделение ионов редкоземельных металлов...	82
<b>ШАВАЛЖЕЕВ М.Р., БАРБИН Н.М., ТЕРЕНТЬЕВ Д.И.</b>	
Способ переработки реакторного графита в оксидно-карбонатных расплавах .....	83
<b>СУХАРЬ П.А.</b>	
Компьютерная программа для проектирования и расчета ректификационных лонн .....	84
<b>БЕРЕЖНАЯ А.Р.</b>	
Поиск эффективной комбинации методов промышленного получения тяжелой воды.....	84
<b>МУКНАМБЕТАЛИН Д.В., КОПТСЕВ М.О.</b>	
Obtaining and characteristics of radiation-modified proton-exchange polypropylene membranes.....	85
<b>ДОРОФЕЕВА Л.И., БАСС В.И.</b>	
Моделирование процесса электрохимического обращения потоков фаз при изотопном обмене .....	86
<b><u>Секция 6. ИЗОТОПЫ В БИОЛОГИИ, МЕДИЦИНЕ И ЭКОЛОГИИ</u></b>	
<b>БЕЖИН Н.А., ДОВГИЙ И.И.</b>	
Сорбционное концентрирование $^{137}\text{Cs}$ из морской воды .....	88
<b>ВАН ЦАЙЛУНЬ</b>	
Пути диффузии радионуклидов в глинистых минералах .....	89
<b>ВАН ЦАЙЛУНЬ</b>	
Оценка коэффициента диффузии РАО в минерале иллита .....	90
<b>ВАН ЦАЙЛУНЬ, ЕРЕМЕЕВ Р.С.</b>	
Влияние радиации на барьерные свойства минерала иллита .....	91
<b>ИСАЕВА Е.А.</b>	
Исследование кинетики накопления коллоидного гептасульфида рения .....	92
<b>МАСЕНКО С.А.</b>	
Модель флуктуации нейтронного фона в геосистемах .....	93
<b>ЕРЕМЕЕВ Р. С., ХОРОХОРИ Д. М., ВАН ЦАЙЛУНЬ</b>	
Изотопы в геологии и геохимии .....	94
<b>LETUTA U.G.</b>	
Improving fluoroquinolones effectiveness with magnesium isotope $^{25}\text{Mg}$ .....	95

ТАЙЛАШЕВА К.А., РОГОВА Н.С., ЯКОВЛЕВА Ю.А.	
Зависимость скорости оседания мелкодисперсных частиц выбросов промышленных предприятий от природно-климатических условий .....	95
ТАЙЛАШЕВА К.А., РОГОВА Н.С., ЯКОВЛЕВА Ю.А.	
Влияние природно-климатических условий на средние значения вертикального коэффициента турбулентной диффузии .....	96
РОГОВА Н.С., БИРЮКОВ К.П., ТАЙЛАШЕВА К.А.	
Биомониторинг пространственных распределений выбросов крупных предприятий .....	97
ЛОЖНИКОВ Ф.И., СТАВИЦКАЯ К.О., АЛЬМЯКОВ П.Э.	
Анализ результатов измерения плотности потока радона в зависимости от физических свойств некоторых типов осадочных пород .....	98
МАТИНА П.Н.	
Содержание естественных радионуклидов (К, U, Th) в почвах Томского района .....	99
КАЕПКУЛОВА Э.И.	
Сверхтонкие взаимодействия ядер магнитных изотопов в молекулах и молекулярных комплексах .....	99
БУШМИНА Е., ЗУБКОВА Ю., МИЛОЙЧИКОВА И.А.	
Исследование зависимости индексов Хаунсфилда от параметров трехмерной печати пластиковых образцов .....	100
ЗУБКОВА Ю., БУШМИНА Е., ЧЕРЕПЕННИКОВ Ю.М.	
Создание фантома для верификации процедуры облучения с помощью медицинского пучка гамма-излучения источника <sup>60</sup> Со ...	101
РОГОВА Н. С., ЯКОВЛЕВА Ю.А., БИРЮКОВ К. П.	
Изучение сезонной зависимости уровня загрязнения атмосферного воздуха г. Томска тяжелыми металлами .....	102
САБИТОВА Р.Р.	
Определение выхода и энергетического спектра радиоизотопного источника нейтронов с зернистой структурой .....	103
ЗДЕРЕВА М.А., НГУЕН ТУАН АНЬ, ТУРГУНОВА Н.Д.	
Оптимизация проведения послеоперационного сочетанного курса лучевой терапии рака тела матки .....	103
РАЗУМОВА А.С., БУЛАВСКАЯ А.А., ГРИГОРЬЕВА А.А.	

Разработка способа определения уровня нагрева новообразования при проведении сеансов емкостной локальной гипертермии .....	10
	4
FILATOV N.A., GOGOLEV A.S., CHISTYAKOV S.G., ALEKSEEV N.V.	
Development of the statistical methods for x-ray detector characterization to use in CT .....	10
	5
ЧИСТЯКОВ С.Г., ФИЛАТОВ Н.А., ГОГОЛЕВ А.С., АЛЕКСЕЕВ Н.В.	
Разработка способа определения хлорорганических соединений в потоке нефти .....	10
	6
АЛЬМЯКОВ П. Э., ЧЕРЕПНЕВ М. С., ЕПАНЧИНЦЕВ Д. П.	
Влияние глубины залегания и температуры высушивания образцов некоторых типов осадочных пород на результаты измерения Ra-226 .....	10
	7
СЕДЕЛЬНИКОВА Т., МИЛОЙЧИКОВА И.А., ГРИГОРЬЕВА А.А.	
Разработка методики проведения in-vivo термометрии сеансов локальной гипертермии в рамках комбинированного лечения .....	10
	8
ГРИГОРЬЕВА А.А., БУЛАВСКАЯ А.А., МИЛОЙЧИКОВА И.А.	
Создание индивидуальных коллиматоров для формирования медицинских пучков гамма-излучения источника <sup>60</sup> Со .....	10
	8
МИЛОЙЧИКОВА И.А., БУЛАВСКАЯ А.А., ЧЕРЕПЕННИКОВ Ю.М.	
Численная модель системы вывода электронного пучка медицинского ускорителя.....	10
	9
ЧЕРНОВА О.С., ГРИГОРЬЕВА А.А., ЧЕРЕПЕННИКОВ Ю.М.	
Определение состава и плотности различных материалов с помощью томографических методов .....	11
	0
БУЛАВСКАЯ А.А., ГРИГОРЬЕВА А.А., СТУЧЕБРОВ С.Г.	
Измерение распределения интенсивности излучения в поперечном сечении рентгеновского пучка с помощью сцинтилляционного детектора.....	11
	0



*Секция 1*

**МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗО-  
ТОПОВ**

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

## ОПТИМАЛЬНОЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ИЗОТОПОВ МОЛИБДЕНА В ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ОТБОРЕ МНОГОПОТОЧНОГО КАСКАДА

Палкин В.А., Лубнин С.С., Токманцев В.И.

Научный руководитель: Палкин В.А., д.т.н., профессор  
Уральский федеральный университет, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19  
E-mail: stepalubnin@gmail.com

Обогащение по изотопам с промежуточными массовыми числами затруднено в ординарном каскаде и ограничено предельными значениями [1]. Для преодоления данных ограничений используют систему из двух или более связанных каскадов. Другой метод заключается в получении высококонцентрированного изотопа в дополнительном отборе длинного многопоточного каскада. Предложен метод оптимизации многопоточного каскада с дополнительным отбором, в котором концентрируется промежуточный по массе компонент. В качестве критерия оптимизации был выбран минимум суммарного потока при обеспечении заданной концентрации целевого изотопа. Оптимизация проводилась в два этапа. На первом этапе каскад делился на две части с одинаковыми параметрами  $\sigma_i$ , что обеспечивало получение концентрации целевого изотопа с некоторым запасом относительно предельных значений. Выбор  $\sigma_i$  осуществлялся с учетом их связи с массовыми числами через коэффициент разделения. На втором этапе оптимизации проводилось уточнение параметров  $\sigma_i$  с помощью численного метода Хука-Дживса [2].

Целью данной работы является исследование концентрационных характеристик промежуточных изотопов в каскадах с большими коэффициентами разделения, которые соответствуют газовым центрифугам. Вычислительный эксперимент проведен по разделению смеси гексафторида молибдена.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minenko V.P. Limiting enrichment of intermediate isotopes in the output material at the ends of a cascade. *Atomic Energy*. 1972. Vol. 33, № 2, 814–816.
2. Hooke R., Jeeves T.A. Direct search solution of numerical and statistical problems. *Assoc. Comput. Mach.* 1961. Vol. 8, 212–229.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОТОЧНОЙ ГАЗОВОЙ ЦЕНТРИФУГЕ

Лубнин С.С., Токманцев В.И.

Научный руководитель: Токманцев В.И., д.т.н.  
Уральский федеральный университет, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19  
E-mail: stepalubnin@gmail.com

Для обогащения легких изотопов представляет интерес рассмотрение возможностей применения более простых и дешевых прямоточных ГЦ, с одной стороны, оптимизированных по разделительной мощности, а, с другой стороны, не содержащих усложняющих конструкцию элементов. Классическая теория разделения бинарной смеси в прямоточной ГЦ основана на решении уравнения сохранения целевого компонента в оптимизированном гидродинамическом поле, которое представляет собой два обособленных коаксиальных потока. Несмотря на то, что ранее теоретически и экспериментально было показано, что во вращающихся системах может быть реализовано довольно близкое к такой модели течение [1], в некоторых современных работах высказываются сомнения в возможности практической реализации такого течения. В данной работе проведено численное моделирование течения в прямоточной газовой центрифуге. Исследована зависимость характера течения от параметра разреженности. Подтверждена возможность реализации на практике модели обособленных потоков в континуальном режиме. Разработанный подход на основе решения кинетического уравнения методом дискретных скоростей может быть использован в более общем случае произвольного режима течения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cohen K. The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large-Scale Production of  $^{235}\text{U}$ . NY: McGraw-Hill, 1951.

## ДЕСУБЛИМАЦИЯ UF<sub>6</sub> В ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОГРУЖНЫЕ ЕМКОСТИ С ГЛАДКИМИ ВНУТРЕННИМИ СТЕНКАМИ, ВЕРТИКАЛЬНЫМ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

Верлинский М.В.<sup>1</sup>, Орлов А.А.<sup>1</sup>, Малюгин Р.В.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Тюменское отделение СургутНИПИнефть Публичное акционерное общество Сургутнефтегаз, 625003, г.

Тюмень, ул. Розы Люксембург, 12

E-mail: malyugin@tpu.ru

Для определения влияния оребрения вертикальных погружных емкостей для десублимации UF<sub>6</sub> на среднюю производительность и время заполнения использовалась математическая модель [1].

В емкости объемом 1,0 м<sup>3</sup>, 1,5 м<sup>3</sup>, 2,0 м<sup>3</sup>, 2,5 м<sup>3</sup> с гладкими внутренними стенками были добавлены 12 вертикальных ребер или 6 горизонтальных ребер. Их размеры подбирались таким образом, чтобы общая площадь теплообменной поверхности была одинакова. При этом соблюдались ограничения, исключающие перемерзание десублимата во входном клапане и на ребрах емкости.

Результаты расчетов площади теплообменной поверхности, площади контакта ребер со стенкой, объема ребер, конечной массы десублимата и их средней производительности представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетов

V <sub>емк</sub> , м <sup>3</sup>		S <sub>тп</sub> , м <sup>2</sup>	S <sub>кк</sub> , 10 <sup>-2</sup> м <sup>2</sup>	V <sub>р</sub> , 10 <sup>-2</sup> м <sup>3</sup>	q, кг/ч	Δq, кг/ч
1	БО	4,67			9,23	
	ВО	10,39	6,078	1,422	12,72	3,49
	ГО	10,39	9,312	1,452	43,59	34,36
1,5	БО	6,15			11,98	
	ВО	15,97	6,522	2,446	20,39	8,41
	ГО	15,97	11,2	2,483	74,82	62,85
2	БО	7,52			14,11	
	ВО	18,58	7,368	2,756	22,87	8,76
	ГО	18,58	12,14	2,794	79,89	65,78
2,5	БО	8,72			16,14	
	ВО	23,46	7,818	3,674	28,74	12,6
	ГО	23,46	13,08	3,719	100,86	84,72

S<sub>тп</sub> – площадь теплообменной поверхности; S<sub>кк</sub> – площадь контакта ребер со стенкой; V<sub>р</sub> – объем ребер; M<sub>к</sub> – конечная масса десублимата; q – средняя производительность; БО – без оребрения (с гладкими стенками); ВО – с вертикальным оребрением; ГО – с горизонтальным оребрением.

Из таблицы 1 видно, что с увеличением объема емкостей и пропорциональным увеличением площади поверхности ребер в них происходит существенное увеличение средней производительности. Причем у емкостей с горизонтальным оребрением оно больше, чем у емкостей с вертикальными ребрами (это объясняется различием в площадях контакта и объема горизонтальных и вертикальных ребер со стенкой емкости), и значительно больше, чем у емкостей с гладкими внутренними стенками. Следовательно, емкости с горизонтальным оребрением работают намного эффективнее.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДВУХ- И ТРЕХКАСКАДНЫХ СХЕМ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ

Азизов Т.Э., Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, г. Москва, Каширское ш., 31

E-mail: t.e.azizov@gmail.com

Рассмотрены системы прямоугольных каскадов (ПК), построенных из двух и трех каскадов. Подобные схемы могут быть применены для одновременного концентрирования изотопов промежуточных масс в различных выходящих потоках каскадов. Предложена методика оптимизации параметров подобных систем по критерию минимума относительного суммарного потока при заданных концентрациях целевых компонентов. Проведена апробация разработанной методики на примере разделения смесей с различным числом компонентов.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-00152).

## НАКОПЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ИЗОТОПНОЙ СМЕСИ В РАЗДЕЛИТЕЛЬНОМ КАСКАДЕ

Ушаков А.А.<sup>1</sup>, Совач В.П.<sup>1</sup>

Научный руководитель: Орлов А.А.<sup>2</sup>, д.т.н., профессор

<sup>1</sup>Акционерное общество «Производственное объединение «Электрохимический завод»,  
663690, г. Зеленогорск Красноярского края, ул. Первая промышленная, 1

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

E-mail: ushakovaa2015@sibmail.com

В последние десятилетия расширяется применение в различных областях изотопномодифицированных материалов, в которых содержание изотопов химических элементов отличается от природных значений или обогащенных по одному из изотопов. Значительную сложность представляет получение изотопов, имеющих промежуточное массовое число в ряду массовых чисел изотопов разделяемой смеси. Эти изотопы оказываются наиболее востребованными в различных областях. Например, в фундаментальных исследованиях применяются изотопы германия (<sup>73</sup>Ge) и молибдена (<sup>97</sup>Mo), в медицине – изотопы ксенона (<sup>129</sup>Xe), в ядерной энергетике – изотоп свинца (<sup>206</sup>Pb), в материаловедении и металлургии – изотоп вольфрама (<sup>184</sup>W), в полупроводниковой технике – изотоп германия (<sup>72</sup>Ge). Помимо этого изотопы промежуточных масс являются стартовым материалом для получения радиоактивных изотопов (<sup>62</sup>Ni, <sup>98</sup>Mo) [8, 9]. В связи с вышесказанным одной из актуальных задач является получение высокообогащенных изотопов с промежуточным массовым числом. Одним из нестационарных способов получения обогащенного промежуточного компонента является накопление его в средней части каскада, после чего осуществляется удаление рабочего газа из ступеней, где концентрация целевого изотопа превышает требуемое значение. Однако до настоящего времени не уделялось должное внимание исследованиям по определению методов или режимов работы каскада для интенсификации процесса накопления в нем целевого промежуточного изотопа.

В данной работе рассмотрены особенности накопления изотопов в трехпоточном каскаде, а также определен характер влияния параметров каскада на этот процесс. Проведены численные исследования процессов разделения многокомпонентной изотопной смеси в каскаде. Установлены закономерности влияния параметров каскада на величину концентрации компонента в газосодержании каскада. Наибольшее влияние оказывает соотношение величин выходящих потоков каскада и положение подачи потока питания в каскад. Показано, что максимальная концентрация крайнего компонента в газосодержании каскада устанавливается при отключенном соответствующем целевом выходящем потоке. Увеличение количества промежуточного компонента в каскаде достигается при подаче потока питания в концевую ступень каскада и значительном уменьшении потока, выходящего из каскада из противоположной концевой ступени. Определены условия, при которых достигается накопление в каскаде максимального количества целевого компонента. Чем больше разница между массовым числом компонента и средним массовым числом исходной изотопной смеси, тем выше его концентрация в газосодержании каскада. Результаты исследования могут быть использованы для дальнейшего изучения нестационарных процессов накопления компонентов изотопной смеси в разделительном каскаде.

## ПРОБЛЕМЫ ОБОГАЩЕНИЯ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО УРАНА В КОНТЕКСТЕ МНОГОКРАТНОГО РЕЦИКЛА В ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРАХ

Смирнов А.Ю.<sup>1</sup>, Гусев В.Е.<sup>1</sup>, Сулаберидзе Г.А.<sup>1</sup>, Невиница В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, г. Москва,  
Каширское ш., 31

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, г. Москва, пл.  
Академика Курчатова, 1

E-mail: a.y.smirnoff@rambler.ru

Непрерывная эксплуатация энергетических реакторов на тепловых нейтронах, составляющих основу современной ядерной энергетики, обуславливает как непрерывное накопление отработавшего топлива (ОЯТ), так и потребление природного урана. При этом в урановой фракции ОЯТ содержание делящегося изотопа <sup>235</sup>U, как правило, выше, чем в природной смеси урана. Это позволяет говорить о возможности использования выделенного из ОЯТ регенерированного урана для производства свежего низкообогащенного урана (НОУ) реакторов на тепловых нейтронах. Кроме того, отработавшее топливо содержит плутоний, который также может быть использован в качестве топливного материала, призванного частично заменить собой природное урановое сырье.

Переработка ОЯТ и последующее использование выделенных из него делящихся материалов является важным шагом на пути замыкания ядерного топливного цикла. Однако существуют серьезные помехи, затрудняющие достижение указанной цели. Во-первых, переработка ОЯТ является технологически сложной процедурой, экономически затратной и потенциально представляющей собой экологическую опасность. Во-вторых, регенерированный уран содержит в своем составе искусственные изотопы <sup>232</sup>U,

$^{236}\text{U}$ , а также имеют более высокую по отношению к природной смеси концентрацию  $^{234}\text{U}$ . Данные факторы осложняют процесс обогащения регенерата ввиду необходимости соблюдения требований к изотопному составу товарного НОУ.

В работе проведен критический анализ путей использования регенерированного урана в топливе реакторов на тепловых нейтронах в условиях многократного рецикла. Рассмотрены возможности его использования как в составе уранового топлива, так и в составе различных видов смешанного (уран-плутониевого) топлива. Для каждого из вариантов выявлена роль технологий обогащения урана в повышении эффективности использования регенерата.

## **ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ И МАТЕРИАЛА СТенок ЕМКОСТИ НА СКОРОСТЬ ДЕСУБЛИМАЦИИ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА**

Верлинский М.В.<sup>1</sup>, Цимбалюк А.Ф.<sup>1</sup>, Малюгин Р.В.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Орлов А.А.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор

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

<sup>2</sup>Тюменское отделение СургутНИПИнефть Публичное акционерное общество Сургутнефтегаз, 625003, г. Тюмень, ул. Розы Люксембург, 12

E-mail: orlova@tpru.ru

Проведено численное моделирование процесса десублимации  $\text{UF}_6$  в вертикальную погружную емкость без оребрения объемом  $1 \text{ м}^3$ , определено влияния толщины и материала стенки емкости на ее среднюю производительность.

В процессе исследования проводился расчет динамики заполнения десублимированным  $\text{UF}_6$  вертикальной погружной емкости без оребрения объемом  $1 \text{ м}^3$  при изменении толщины стенок емкости от  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  до  $20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , и коэффициента температуропроводности материала стенок емкости от  $2,58 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  до  $12,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Определен характер зависимости скорости десублимации  $\text{UF}_6$  от времени, толщины стенки емкости и коэффициента ее температуропроводности. В результате проведенного численного моделирования показано, что увеличение толщины стенки емкости с  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  до  $20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  приводит к снижению средней производительности емкости на 0,2%; увеличение коэффициента температуропроводности материала стенки емкости с  $2,58 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  до  $12,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  приводит к увеличению средней производительности емкости на 0,1%. Получена аппроксимирующая формула зависимости скорости десублимации  $\text{UF}_6$  от времени, толщины стенки емкости и коэффициента ее температуропроводности:

$$v(h, a, t) = (138 \cdot t^{-0,60717} + 5,66 \cdot a^{-0,0046} - 1,28473 \cdot h + 1,84) \cdot 10^{-6}$$

Показано, что при выборе материала и толщины стенки емкости, главными критериями являются прочностные и конструкционные параметры, т.к. влияние, оказываемое на скорость десублимации стенкой емкости, проявляется только на начальных этапах процесса, и практически не сказывается на средней производительности.

Полученные в ходе работы данные вносят определенный вклад в теоретическое исследование процесса десублимации  $\text{UF}_6$ ; полученная аппроксимирующая формула скорости десублимации  $\text{UF}_6$  от времени, толщины стенки емкости и ее теплофизических свойств в дальнейшем может быть использована при проведении расчетов динамики заполнения вертикальных погружных емкостей [1–3].

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Малюгин Р.В., Орлов А.А., Цимбалюк А.Ф. Математическое моделирование процесса десублимации гексафторида урана // Современные проблемы физики и технологий. Тезисы докладов. IV Международная молодежная научная школа-конференция. 2015. С. 202-203.
2. Малюгин Р.В., Цимбалюк А.Ф. Математическое моделирование процесса десублимации гексафторида урана // Перспективы развития фундаментальных наук. Сборник научных трудов XII Международной конференции студентов и молодых ученых. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2015. С. 175-177.
3. Верлинский М.В., Малюгин Р.В., Орлов А.А. Десублимация  $\text{UF}_6$  в вертикальные погружные емкости с гладкими внутренними стенками, вертикальным и горизонтальным оребрением // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2019. С. 117.

# ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕБЕР В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПОГРУЖНЫХ ЕМКОСТЯХ НА ДИНАМИКУ ДЕСУБЛИМАЦИИ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

Верлинский М.В.<sup>1</sup>, Шинкевич Р.А.<sup>1</sup>, Малюгин Р.В.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Орлов А.А.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор

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

<sup>2</sup>Тюменское отделение СургутНИПИнефть Публичное акционерное общество Сургутнефтегаз, 625003, г.

Тюмень, ул. Розы Люксембург, 12

E-mail: orlovaa@tpu.ru

Процесс десублимации UF<sub>6</sub> является неотъемлемой частью технологии обогащения урана. На разделительных производствах выходящие потоки UF<sub>6</sub>, обедненные и обогащенные по изотопу <sup>235</sup>U, подаются на участок конденсационно-испарительных установок, где десублимируются в вертикальные погружные емкости без оребрения, с вертикальным или горизонтальным оребрением. На практике наибольшее распространение получил способ десублимации UF<sub>6</sub> в вертикальные погружные емкости с вертикальным оребрением.

Внутреннее оребрение увеличивает площадь теплообменной поверхности, как следствие увеличивает производительность емкости. Для исследования влияния размеров вертикальных ребер на динамику десублимации UF<sub>6</sub> в вертикальных погружных емкостях использовалась математическая модель [1].

Расчеты проводились для вертикальных погружных емкостей объемом 1,0...4,0 м<sup>3</sup> с шагом 0,5 м<sup>3</sup>. Все емкости имели по 12 осесимметрично расположенных ребер. Толщина стенок емкости 8·10<sup>-3</sup> м, толщина ребер 4·10<sup>-3</sup> м. Определение оптимальной ширины и максимальной длины ребер проводили на основе критерия обеспечения максимальной средней производительности емкости при ее заполнении до 70% свободного объема. Найденные оптимальные значения размеров вертикальных ребер представлены в таблице 1.

Таблица 1. Оптимальные значения ширины и длины вертикальных ребер емкостей различных объемов

V, м <sup>3</sup>	L <sub>опт</sub> , м	d <sub>опт</sub> , м	d <sub>опт</sub> /R	q, кг/час
1,0	1,132	0,317	0,7044	19,363
1,5	1,412	0,355	0,7100	25,565
2,0	1,564	0,391	0,7109	30,286
2,5	1,604	0,427	0,7117	33,627
3,0	1,622	0,462	0,7108	36,643
3,5	1,582	0,497	0,7100	38,806
4,0	1,542	0,532	0,7093	40,925

где V – объем емкости, L<sub>опт</sub> – оптимальная длина вертикальных ребер, d<sub>опт</sub> – оптимальная ширина вертикальных ребер, R – внутренний радиус емкости, q – средняя производительность емкости.

Показано, что при увеличении объема емкостей от 1,0 до 4,0 м<sup>3</sup> средняя производительность увеличивается примерно в 2 раза, оптимальная ширина ребер увеличивается на 68%. Наибольшая средняя производительность наблюдается при максимальной длине ребер.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов А.А., Цимбалюк А.Ф., Малюгин Р.В. Десублимация UF<sub>6</sub> в емкостях с вертикальным оребрением // Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Т. 54. - № 1. – С. 52-61.

## MODELING OF FILLING GAS CENTRIFUGE CASCADE FOR NICKEL ISOTOPE SEPARATION BY FEED FLOW INPUT TO DIFFERENT STAGES

Ushakov A.A.<sup>1</sup>, Sovach V.P.<sup>1</sup>

Scientific supervisor : Orlov A.A.<sup>2</sup>, DTSc., Professor

<sup>1</sup>Joint Stock Company "Production Association Electrochemical Plant", Zelenogorsk, st. First industrial, 1, 663690

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050

E-mail: ushakovaa2015@sibmail.com

During the operation of gas centrifuge (GC) cascade for the multicomponent isotope mixture (MCIM) separation there are nonstationary hydraulic and separation processes. It is necessary to ensure safety of the equipment and to minimize losses of cascade productivity during nonstationary processes. In this regard, actual task is full-scale research of nonstationary processes. It is advisable to study the nonstationary processes by mathematical modeling. Known mathematical models describe nonstationary hydraulic processes for only long cascade and nonstationary separation processes in the case of stationary hydraulic parameters of cascade. For elimination of these disadvantages we had developed the mathematical model of nonstationary hydraulic and

separation processes occurring in GC cascade for the MCIM separation. Earlier we had done verification of developed mathematical model as an example silicon and germanium isotope separation. Isotope separation mode in GC cascade is preceded by its filling with process gas. So far a modeling of filling cascade was not carried out.

The results of research filling GC cascade for nickel isotope separation by feed flow input to different stages is shown in this article. According to analysis of research results nickel isotope concentrations on light and heavy fraction flows after filling cascade depend on feed stage number. The research have indicated that there is optimal feed stage number for each nickel isotope when isotope concentration in light or heavy fraction flows of cascade takes on maximal value after filling cascade with process gas. Feed stage number optimization lets to decrease duration of further nonstationary process of cascade start-up (establishment of stationary isotope concentrations).

## **СВОЙСТВА ИЗОТОПНОЙ СМЕСИ И ИХ ИЗМЕНЕНИЕ В РАЗДЕЛИТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ**

Ушаков А.А.<sup>1</sup>

Научный руководитель: Орлов А.А.<sup>2</sup>, д.т.н., профессор

<sup>1</sup>Акционерное общество «Производственное объединение «Электрохимический завод»,  
663690, г. Зеленогорск Красноярского края, ул. Первая промышленная, 1

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

E-mail: ushakovaa2015@sibmail.com

Для использования в полной мере свойств нужного (целевого) изотопа необходимо осуществить процесс разделения изотопной смеси, состоящей из изотопов одного химического элемента. Одной из основных характеристик изотопного состава является концентрация целевого изотопа. При этом в некоторых случаях также имеет значение концентрация других изотопов смеси. Например, в международном научном проекте GERDA использовался германий, к изотопному составу которого предъявлялись следующие требования: <sup>76</sup>Ge – не менее 86%, <sup>70</sup>Ge – не более 0,01%. Помимо этого, особым требованиям по изотопному составу отвечал поликристаллический кремний, который использовался в международных научных проектах «Килограмм-2» и «Килограмм-3» для уточнения числа Авогадро и создания нового прототипа эталона массы (килограмма). Используемый в проекте кремний содержал изотоп Si-28 с концентрацией не менее 99,997%, а относительное содержание изотопов Si-29 к Si-30 не превышало 5. Исходя из этого, ценность получаемого в результате проведения разделительного процесса изотопно-модифицированного вещества (изотопной смеси) в достаточной мере не может быть описана только концентрацией целевого изотопа. Для смеси, состоящей из двух компонентов (изотопов), в теории и практике разделения используется понятие потенциала разделения, который в свою очередь является функцией от концентрации одного из компонентов смеси. Потенциал разделения используется для определения ценности получаемой в процессе разделения двухкомпонентной изотопной смеси косвенным путем в результате определения затрат работы разделения оборудования в единицах работы разделения. Для смеси, которая состоит из более чем двух компонентов, предложены различные формулировки и способы расчета потенциала разделения. Однако все они носят частный характер, ни один из предложенных вариантов потенциала разделения многокомпонентной изотопной смеси не является общепризнанным и не может быть использован для оценки затрат работы разделения оборудования и определения ценности получаемой многокомпонентной изотопной смеси.

В данной работе рассмотрены свойства многокомпонентной изотопной смеси, предложены оригинальные *p*-параметр и *d*-параметр, с помощью которых можно определить ее ценность, а также рассмотрено изменение свойств изотопной смеси в разделительном элементе. Показано, что для моноизотопной смеси, когда концентрация одного из изотопов близка к 100%, величины предложенных параметров близки к нулю и в процессе разделения также не происходит их изменение (эффект разделения близок к нулю). Для изотопной смеси с симметричным составом, когда имеют место равные друг относительно друга концентрации компонентов, массовые числа которых отличаются от средневзвешенное массового числа смеси на одно и то же значение по модулю, *d*-параметр принимает максимальное значение. При пропускании такой изотопной смеси через разделительный элемент достигается максимальное изменение концентраций компонентов смеси. Результаты исследований могут быть использованы для дальнейшего изучения закономерностей изменения состава изотопной смеси в разделительном каскаде.

## **РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ ГЕРМАНИЯ В КАСКАДЕ ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ**

Шинкевич Р.А., Орлов А.А.

Томский политехнический университет, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: ShinkevichRA@yandex.ru

Для исследования закономерностей нестационарного разделения изотопов германия в каскаде газовых центрифуг при заполнении его рабочим веществом и накоплении изотопов до стационарных значений при практически неизменных гидравлических параметрах каскадов была использована математическая модель [1].

В процессе исследования проводилось численное моделирование нестационарного процесса разделения изотопов германия в каскаде газовых центрифуг постоянной ширины при его заполнении рабочим веществом, и определялась динамика концентрации его изотопов в потоках легкой и тяжелой фракций каскада.

В результате исследования показано, что в процессе заполнения происходит разделение изотопов германия. После заполнения каскада изотопы германия распределяются по ступеням каскада в соответствии с их массовыми числами. Наибольшее изменение концентрации изотопов германия имеет место на конечных ступенях каскада, наименьшее – вблизи ступени подачи потока питания. Результаты численного моделирования разделения изотопов германия хорошо согласуются с данными других авторов для случая, когда гидравлические параметры каскада соответствуют стационарным. Характер изменения концентрации изотопов германия в ходе нестационарного процесса зависит от начального состояния каскада.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов А. А., Ушаков А. А., Совач В. П. Математическая модель нестационарных гидравлических процессов, протекающих в каскаде газовых центрифуг при разделении многокомпонентных изотопных смесей. Альтернативная энергетика и экология. 2015. Т. 23, № 187. С. 45–50.

### **ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ОТВЕРСТИЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РЕБРАХ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОГРУЖНОЙ ЕМКОСТИ НА ДИНАМИКУ ЕЕ ЗАПОЛНЕНИЯ ДЕСУБЛИМИРОВАННЫМ UF<sub>6</sub>**

Балаев Д.Б.

Научный руководитель: Орлов А.А., д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: balaev\_daniil@mail.ru

Данная работа посвящена исследованию возможности повышения производительности вертикальной погружной емкости объемом 0,06 м<sup>3</sup> с горизонтальным оребрением. Проведенные ранее расчеты показали, что для заполнения емкости до 70% свободного объема без «перемерзания» верхнего ребра и обеспечения максимальной средней производительности 4,64·10<sup>-3</sup> кг/с диаметр центральных отверстий в ребрах должен быть 64·10<sup>-3</sup> м.

Нами рассмотрен случай, когда центральные отверстия в ребрах имеют различный диаметр. Верхнее ребро также имеет центральное отверстие диаметром 64·10<sup>-3</sup> м, а в нижнем ребре диаметр отверстия уменьшается с 64·10<sup>-3</sup> м до 1,0·10<sup>-3</sup> м с шагом 1·10<sup>-3</sup> м. Диаметр остальных отверстий уменьшается таким образом, что от верхнего до нижнего ребра они образуют усеченный конус. Критерием ограничения диаметра отверстий в ребрах емкости являлось «перемерзание» на любом ребре.

Показано, что, максимальная средняя производительность емкости наблюдается при диаметре центрального отверстия в нижнем ребре 36·10<sup>-3</sup> м и составляет 5,07·10<sup>-3</sup> кг/с. Сравнение показывает, что средняя производительность емкости при расположении центральных отверстий в виде усеченного конуса на 9,27% выше, чем в случае когда диаметр всех отверстий одинаков. Это объясняется тем, что площадь теплообменной поверхности ребер емкости также увеличивается.

### **ДИНАМИКА ЗАПОЛНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОГРУЖНОЙ ЕМКОСТИ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ РЕБРАМИ ДЕСУБЛИМИРОВАННЫМ UF<sub>6</sub>**

Турбина И.А.

Научный руководитель: А.А. Орлов, д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: iat22@tpu.ru

В работе исследована возможность повышения производительности вертикальной погружной емкости объемом 0,06 м<sup>3</sup> с горизонтальным оребрением. Рассмотрен случай, когда центральные отверстия в ребрах имеют различный диаметр. Верхнее (первое) ребро имеет отверстие диаметром 64·10<sup>-3</sup> м. Диаметр отверстия второго ребра уменьшался шагом 1·10<sup>-3</sup> м до его «перемерзания». Определено его максимальное значение до момента «перемерзания». При этом диаметры отверстий остальных ребер были равны этому максимальному значению. Затем уменьшался диаметр отверстия третьего ребра до момента его «перемерзания», причем отверстия в трех верхних ребрах образовывали усеченный конус, а в остальных – цилиндр. Аналогично изменялись диаметры отверстий в ребрах с четвертого по тринадцатое, пока они не образуют усеченный конус. В результате определена оптимальная



конфигурация отверстий, обеспечивающая максимальную теплообменную поверхность ребер и среднюю производительность емкости.

## **РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ Q-КАСКАДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО МОЛИБДЕНА-98**

Проценко А.В.

Научный руководитель Орлов А.А., д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: avp98@tpu.ru

Перспективным является применение изотопных технологий в медицине. В США с применением изотопов проводится более 36 тысяч медицинских процедур в день и около 100 миллионов лабораторных тестов в год. Широко распространены процедуры, связанные с компьютерной томографией и введением изотопных терапевтических агентов [1]. Нароботка  $^{98}\text{Mo}$  является необходимой ступенью для получения  $^{99}\text{Mo}$ . В свою очередь радиоактивный  $^{99}\text{Mo}$  используется при производстве радиоактивного  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , применяемого для диагностики большого числа заболеваний, а также в радиофармацевтических препаратах. В настоящее время количество используемого  $^{99}\text{Mo}$  оценивается примерно в 1 млн Кюри в год при цене за 1 Кюри порядка 200 долларов США. Ежегодно количество производимого  $^{99}\text{Mo}$  увеличивается на 10 %. Из-за относительно короткого периода полураспада  $^{99}\text{Mo}$  создание складских запасов генераторов технеция невозможно [2]. В данной работе по известной методике произведен расчет параметров Q – каскада для получения высокообогащенного  $^{98}\text{Mo}$ . Приведен график распределения концентрации изотопов молибдена и профиль рассчитанного Q – каскада. Показано, что изотопы молибдена распределяются по ступеням каскада в соответствии с их массовыми числами. Наибольшее изменение концентрации изотопов молибдена имеет место на концевых ступенях каскада, наименьшее – вблизи ступени подачи потока питания.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. А.А. Орлов, М.В. Верлинский, Разделение многокомпонентных изотопных смесей. — Томск: Изд-во ТПУ, 2020. – [С.40].
2. Физические основы разделения изотопов в газовой центрифуге : учебное пособие для вузов / В.Д. Борисевич, В.Д. Борман, Г.А. Сулаберидзе и др.; под ред. В.Д. Бормана. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2011. – 275 с.

## **ИСТОРИЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В СССР**

Скорынин Г.М.<sup>1</sup>, Орлов А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>663690, г. Зеленогорск Красноярского края, пр. Мира, 19

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

E-mail: skorynin@gmail.com

В докладе раскрыты забытые страницы и имена советских ученых, осуществивших первые попытки разделения изотопов в СССР. Дан анализ научного вклада в разделение изотопов Максвелла, впервые доказавшего возможность разделения смеси газов в центробежном поле. Рассмотрен процесс выбора и освоение газодиффузионной технологии для промышленного обогащения урана в СССР.

Приведены основные вехи истории создания в СССР центрифужной технологии обогащения урана:

- начало исследований газовых центрифуг немецкими специалистами в Сухуми;
- разработка современных газовых центрифуг конструкторами ОКБ Кировского завода в Ленинграде и учеными ЛИПАН в Москве;
- промышленное освоение центрифужной технологии обогащения урана.

Обсуждаются также перипетии с приоритетами на создание центрифужной технологии, возникшие в 1990 – е годы.

## **ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ЦЕНТРАЛЬНОГО ОТВЕРСТИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РЕБЕР ЕМКОСТИ ОБЪЕМОМ 60 ЛИТРОВ НА ЕЕ СРЕДНЮЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ**

Леонтьева Д.А.

Научный руководитель: Орлов А.А., д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: dal16@tpu.ru

Происходящие в настоящее время модернизация и перераспределение разделительного оборудования между обогащательными предприятиями России, сопровождаются увеличением нагрузки на цеха

конденсационно-испарительных установок. Помимо замены газовых центрифуг на более производительные и увеличения разделительных мощностей предприятий, приобретают актуальность работы направленные на исследование и интенсификацию процесса десублимации  $UF_6$ , проектирование коллекторов десублимации  $UF_6$  повышенной производительности и совершенствование конструкций емкостей [1].

Объектом исследования являлась вертикальная погружная емкость с горизонтальным оребрением. В процессе исследования проводился расчет зависимости средней производительности и степени заполнения емкости объемом 60 л от диаметра отверстия горизонтальных ребер с использованием упрощенной трехмерной математической модели процесса десублимации  $UF_6$ .

В результате исследования установлено, что емкость объемом 60 л имеет максимальную среднюю производительность 6,23 г/с при диаметре отверстия в горизонтальных ребрах 64 мм. При этом достигается заданная степень ее заполнения – 70% свободного объема. Показано, что увеличение диаметра отверстия в горизонтальных ребрах с 60 до 64 мм позволяет увеличить среднюю производительность емкости на 3,5%. Даны обоснованные рекомендации по изменению конструкции данной емкости [2].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов А.А., Малюгин Р.В. Оборудование для десублимации  $UF_6$  на предприятиях по обогащению урана. – учебное пособие / Орлов А.А., Малюгин Р.В. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019.
2. A.A. Orlov, A.F. Tsimbalyuk, R.V. Malyugin, D.A. Leontieva, A.A. Kotelnikova, Effect of tank geometry on its average performance, AIP Conference Proceedings 1938 (2018) 020009.

*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*

# ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ АППАРАТНОЙ ФУНКЦИИ

Киселев С.С.

Научный руководитель: Александров О.Е., к.ф.-м.н., доцент  
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, г.

Екатеринбург, ул. Мира 19  
E-mail: [avtofan96rus@gmail.com](mailto:avtofan96rus@gmail.com)

Масс-спектрометрия широко используется для анализа состава изотопных смесей при разделении. Универсальность получаемых результатов делает масс-спектрометрию популярным методом.

Одной из важных проблем является необходимость анализа наложенных пиков спектра. Проблема возникает при близком расположении одиночных пиков и обусловлена разрешающей способностью прибора. Ее пытаются решить математической обработкой данных спектра измерения – это дает возможность провести анализ зашумленных спектров или спектров с частичным наложением пиков [1].

Под математическим анализом наложенных пиков понимается процедура аппроксимации экспериментальной кривой функцией, имитирующей одиночный пик. Чаще всего в качестве аппроксимирующей функции выбирают аналитическую функцию, например функция Гаусса или подобная ей, которая по форме близка к одиночному пику масс-спектра, как, например, в работе [1]. У такого подхода есть серьезный минус. Пики масс-спектров могут быть несимметричными, могут изменять свою форму при смене масс-спектрометра или/и при изменении настроек прибора. Такие пики невозможно представить в виде универсальной аналитической функции. Аппроксимация такой функцией вносит дополнительные ошибки, связанные с систематическим отклонением формы реальных пиков от формы аппроксимирующей функции.

Предложено следующее решение проблемы: 1) на анализируемом спектре выбирается хорошо разрешенный уединенный пик; 2) по данным этого пика строится «аппаратная функция», в работе использовалась простейшая аппроксимация набором точек, которые соединены прямыми отрезками; 3) эта функция используется вместо аналитической для анализа спектра и разрешения наложенных пиков; 4) в качестве параметров аппроксимации выступают только две неизвестные величины: положение центра пика и амплитуда пика. Для двух наложенных пиков всего 4 параметра.

Форма «аппаратной функции» уникальна для каждого прибора и для каждого набора параметров настройки, но форма пиков в пределах одного измерения остается неизменной. Аппроксимация «аппаратной функцией» и оценка погрешности аппроксимации будет существенно точнее: если аппроксимировать одиночный или наложенный пик «точной функцией формы», то на не зашумленном пике среднеквадратичное отклонение аппроксимации данных спектра такой функцией обратится в ноль, в отличие от «приблизительных функций формы». Таким образом, использование максимально «точной функции формы» и увеличивает точность разрешения наложенных пиков.

Метод реализован в пакете Mathcad. Методика анализа следующая: а) в документ Mathcad

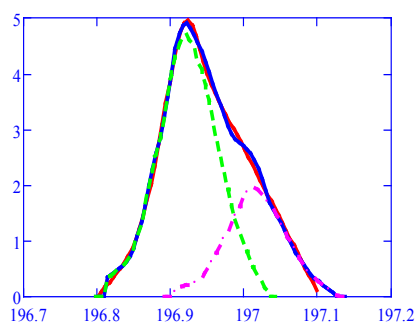


Рис. 1. Результат аппроксимации наложенного пика аппаратной функцией

считывается спектр; б) в нем находятся и сглаживаются наложение и подходящий одиночный пик; в) выделенный участок с наложением пиков нормализуются и производится аппроксимация при помощи встроенной функции Genfit; г) Genfit позволяет отыскать неизвестные параметры: центр пика и амплитуду; качество проведенной аппроксимации можно проверить как визуально, так и рассчитав сумму квадратов отклонений нормализованного наложения и суммарной кривой одиночных пиков; д) производится денормализация полученных кривых и вычисляются истинные массы и интенсивности наложенных пиков. При этом учитывается зависимость полуширины одиночного пика от массы иона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разников В.В. и др. Анализ не полностью разрешенных масс-спектрометрических данных. // Масс-спектрометрия. 2006. №3. С.113-130.

## ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ

Хорохорин Д. М.<sup>1,2</sup>, Еремеев Р. С.<sup>1,2</sup>, Лукин А.В.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Мышкин В.Ф.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., профессор

<sup>1</sup> ФГУП «Горно-химический комбинат», 660049, г. Железногорск, ул. Ленина, 53

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

E-mail: mitek2407@mail.ru

Перспективы развития ядерной энергетики связывают с использованием МОХ-топлива. Частицы МОХ-топлива, оказавшиеся на поверхности твэла, формируют трудно удаляемое радиоактивное загрязнение. Это связано с тем, что радионуклиды находятся в объеме сварного шва заглушки в виде включений микрочастиц МОХ-топлива.

Кажется очевидным, что при облучении металлической мишени лазерными импульсами длительностью 1-10 мс невозможно нагреть до температуры испарения более тугоплавкие, чем металлическая матрица частицы оксидов. При этом лазерное излучение прогревает металл на глубину  $\lambda/3$  мкм. За счет теплопроводности металл прогревается до глубины  $\sqrt{\alpha t_u}$ , где  $\alpha$  – температуропроводность,  $t_u$  – длительность импульса. Микрочастица прогревается равномерно по объему из-за малости её размера. Теплообмен между металлом и внедренной в него микрочастицей, ограничивает скорость нагрева частицы.

Эффективность поглощения лазерной энергии при малых интенсивностях излучения зависит от мнимой части комплексного показателя преломления. Известно, что оксиды  $UO_2$ ,  $PuO_2$  и  $ThO_2$ ,  $CeO_2$  являются полупроводниками, которые слабо поглощают излучение от видимой до средней ИК области спектра. При высокой интенсивности следует учитывать, что лазерное излучение вначале поглощается дефектами кристалла. По мере нагреве кристалла вокруг дефекта поглощение лучистой энергии в локальной области лавинообразно возрастает [1]. Поэтому возможен нагрев полупроводниковых микрочастиц с помощью излучения неодимового лазера.

Лазерная дезактивация объемных загрязнений связана с испарением материала, что приводит к изменению рельефа поверхности. Существующие ТУ на твэл ограничивают шероховатость поверхности. При лазерном воздействии формируются кратеры, глубина которых не должна превышать 40 мкм. Для проведения экспериментальных исследований использовали лазерные импульсы с длиной волны 1,06 мкм и длительностью 1,5 мс. При диаметре фокального пятна диаметром 0,2 мм интенсивность излучения изменяли в диапазоне 17,8-38,5 кВт/см<sup>2</sup>. Изучали взаимодействие импульсного лазерного излучения с поверхностью стального сплава, являющейся аналогом сплава «316» зарубежного производства.

На рис. 1 приведены микроизображения кратера, формирующегося при облучении поверхности мишени лазерным излучением с интенсивностью 26,3 кВт/см<sup>2</sup>. Микроизображения получены с помощью профилометра и сканирующего электронного микроскопа. Видна ступенчатая структура стенок кратера. Экспериментально установлено, что при интенсивности 27,8 кВт/см<sup>2</sup> излучения длиной волны 1,06 мкм формируются кратеры глубиной, не выходящей за пределы требований ТУ.

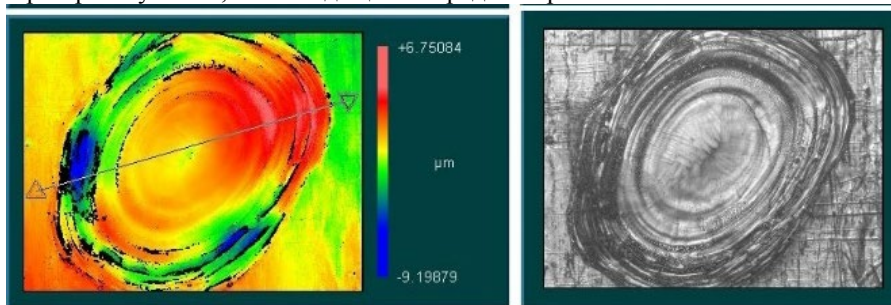


Рис. 1. Изображения кратера: слева - профилометр, справа - микроскоп

В докладе обсуждаются процессы, влияющие на форму и глубину кратеров, образующихся при импульсной лазерной абляции. Показано, что теплопроводность металлической матрицы в значительной мере ограничивает возможности лазерного нагрева импульсами длительностью 1,5 мс. Приводятся формулы и результаты моделирования процесса формирования кратера.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Е.И., Вознюк А.Г., Ципилев В.П. Влияние поглощающих примесей на зажигание ВВ лазерным излучением // Физика горения и взрыва. 25(1) 3-9 (1989).

## ЛАЗЕРНЫЙ НАГРЕВ ЧАСТИЦ ТУГОПЛАВКИХ ОКСИДОВ

Хорохорин Д. М.<sup>1,2</sup>, Еремеев Р. С.<sup>1,2</sup>

Научный руководитель: Мышкин В.Ф.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., профессор

<sup>1</sup> ФГУП «Горно-химический комбинат», 660049, г. Железногорск, ул. Ленина, 53

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

E-mail: mitek2407@mail.ru

Ядерные реакторы четвертого поколения используют МОХ-топливо, содержащее Pu. Частицы МОХ-топлива могут попадать на различную глубину в сварочный шов заглушки твэла. При этом формируется большое радиоактивное загрязнение, которые невозможно удалить путем протирки поверхности тканевым чистящим элементом.

Цель – исследование процесса лазерного нагрева одиночных полупроводниковых частиц оксидов лантаноидов и актиноидов.

При лазерном нагреве металлической мишени, внедренные в неё микрочастицы прогревается равномерно из-за малости их размеров. Для миллисекундных лазерных импульсов необходимо учесть тепловой поток между металлом и внедренной в него микрочастицей, ограничивающий скорость нагрева микрочастиц. Тепловых потерь можно избежать при использовании лазерных импульсов наносекундной длительности.

Мнимая часть комплексного показателя преломления вещества определяет эффективность поглощения слабого лазерного излучения. Поэтому металлы и оксиды металлов, имеющие разные показатели преломления, будут разное количество от падающего импульса излучения. Известно, что  $UO_2$ ,  $PuO_2$  и  $ThO_2$ ,  $CeO_2$  являются полупроводниками, которые имеют малый коэффициент поглощения излучения от видимой до средней ИК области спектра. Следует ожидать, что указанные оксиды будут слабо поглощать излучение серийно выпускаемых лазеров, генерирующих излучение 1,06 мкм. Однако известно, что мощное лазерное излучение первоначально поглощается дефектами внутри кристалла. По мере прогрева кристалла вокруг дефектов поглощение излучения в области дефекта лавинообразно возрастает. Поэтому возможно испарение полупроводниковых частиц с помощью излучения 1,06 мкм.

В докладе приводятся результаты моделирования нагрева одиночных дисперсных частиц в поле лазерного излучения  $CO_2$ -лазеров (10,6 мкм, длительность 50 нс). Теплофизические параметры  $UO_2$ ,  $PuO_2$  и  $ThO_2$ ,  $CeO_2$ , приводимые в различных статьях, значительно различаются. Обобщая литературные данные можно утверждать, что оксиды  $CeO_2$ ,  $ThO_2$ ,  $PuO_2$ ,  $UO_2$  имеют близкие теплофизические и оптические свойства.  $PuO_2$  имеет минимальную температуру плавления из рассматриваемых оксидов. Температура испарения стали составляет 2860°C, а  $PuO_2$  - 2800°C. Остальные рассматриваемые оксиды испаряются при более высоких температурах. Следует учитывать, что излучение  $CO_2$  лазера нагревает металл на глубину до 3,5 мкм.

Для моделирования использовано выражение для нагрева микрочастиц в лазерном пятне

$$\Delta T_d = \frac{3 \varepsilon_d I_0 t}{4 C_d \rho_d \pi r_d} \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon$  - коэффициент поглощения,  $I$  - интенсивность излучения,  $t$  – время действия лазерного импульса,  $r_d$  - радиус частицы,  $r_f$  - радиус фокального пятна лазера.

Рассчитывали изменение температуры за 1 нс. Текущую температуры вычисляли ступенчато от комнатной температуры по формуле (1). На последующих этапах вычисления проводили от предыдущей температуры. Для каждого диапазона температур теплоемкость задавали в соответствии с усредненными значениями по данным нескольких авторов.

Расчетные данные нагрева микрочастиц диаметром 0,5 мкм в поле лазерного излучения с интенсивностью 25 МВт/см<sup>2</sup> показывают следующее. Стальная микрочастица за время импульса  $CO_2$ -лазера (50 нс) не прогревается до температуры кипения.  $CeO_2$  за время 50 нс также не прогревается до температуры кипения. Моделирование показывает, что микрочастицы  $UO_2$  и  $PuO_2$  практически одновременно нагреваются до точки кипения за время 44 нс. Поэтому имеются благоприятные условия для лазерной дезактивации сварного шва твэла от частично выступающих микрочастиц МОХ-топлива с помощью излучения  $CO_2$ -лазера. При этом также возможно взрывное испарение микрочастиц, полностью скрытых в поверхностный слой мишени глубиной до 3,5 мкм.

# ОЧИТСКА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ОТ ПЫЛИНОК ЗА СЧЕТ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА

Хорохорин Д. М.<sup>1,2</sup>, Кузнецов М. С.<sup>2</sup>, Лукин А. В.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Хан В.А.<sup>1</sup>, д.т.н., доцент

<sup>1</sup> ФГУП «Горно-химический комбинат», 660049, г. Железногорск, ул. Ленина, 53

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

E-mail: mitek2407@mail.ru

Известно, что лазерное излучение позволяет очищать поверхности твердых тел как от прилипших, так и внедренных пылинок. В докладе приводятся результаты исследований по лазерной очистке внешней поверхности оболочки твэла от микрочастиц оксидов урана.

Металлы имеют высокую теплопроводность. Поэтому энергия лазерного излучения распространяется в объем материала на большую глубину. Импульсное лазерное облучение позволяет локализовать энергию излучения в поверхностном слое металлов. Эффективность поглощения лучевой энергии зависит от мнимой части комплексного показателя преломления [1]. Металлы и их оксиды имеют разные показатели преломления.

Основным процессом при лазерной очистке поверхности твердых тел является тепловое расширение подложки или частиц. Отличие в скоростях нагрева приводит к появлению механических напряжений по линии контакта поверхности и микрочастицы, что вызывает появление инерционной силы. Инерционная сила прижимает микрочастицу к поверхности при воздействии передним фронтом импульса и отрывает ее во время действия заднего фронта. Микрочастица отрывается от поверхности, если инерционная сила превышает силу адгезии  $F_a$  [2]

$$F_a \rho \frac{I_{\max} m}{\tau_1} \left( \frac{\alpha_s \varepsilon_s}{\rho_s c_s} + k \frac{\alpha_p \varepsilon_p}{\rho_p c_p} \right),$$

где  $I_{\max}$  - максимальная интенсивность импульса излучения,  $\tau_1$  - длительность заднего фронта импульса,  $m$  - масса микрочастицы,  $\alpha$  - линейный коэффициент теплового расширения,  $\varepsilon$  - коэффициент серости,  $\rho$  - плотность,  $c$  - теплоемкость,  $k=0 \div 1$  - коэффициент. Индекс „s“ относится к основному материалу, „p“ - к микрочастицам.

При лазерной дезактивации использовали  $UO_2$  природного изотопного состава, который наносили на поверхность образца трубки твэла методом натирания. Вначале измеряли активность испытываемых образцов без радиоактивного загрязнения. Далее наносили радиоактивное загрязнение и повторно регистрировали активность. На рис. 1 представлен гамма-спектр образца с чистой поверхностью (1) и с нанесенными на его поверхность микрочастицами оксида урана (2). По вертикали отложено количество гамма-квантов, регистрируемых за 30 минут, по горизонтали – номера каналов спектрометра. Гамма-кванты в канале с энергией 185,7 эВ обусловлены наличием  $^{235}U$ .

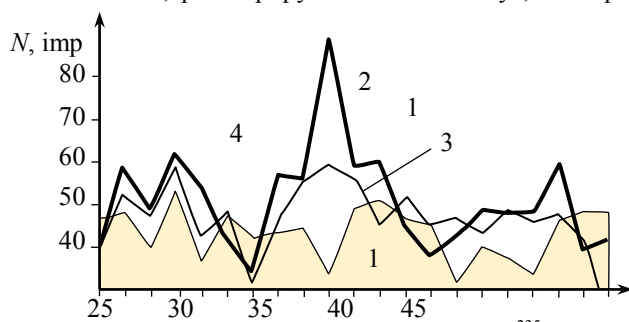


Рис. 1. Гамма-спектры образца в области пика  $^{235}U$ . 1 - фон, 2 - загрязнение, 3 - после дезактивации

кванты в канале с энергией 185,7 эВ обусловлены наличием  $^{235}U$ .

При нанесении на пластинки микрочастиц  $UO_2$  суммарное количество регистрируемых  $\gamma$ -квантов всех энергий возрастало с 4998 до 6146 за 30 минут экспонирования. В дальнейшем образцы с радиоактивным загрязнением поверхности облучали импульсами лазера на стекле с неодимом. Сканирование луча проводили так, чтобы соседние фокальные пятна размером 0,2 мм перекрывались.

На рисунке также приведен гамма-спектр пластинки после лазерного облучения (3). Использовали лазерный луч с интенсивностью 38,5 кВт/см<sup>2</sup>, 27,8 кВт/см<sup>2</sup>, 26,3 кВт/см<sup>2</sup>, 17,8 кВт/см<sup>2</sup>. Даже при интенсивности лазерного излучения 17,8 кВт/см<sup>2</sup> происходит удаление радиоактивных микрочастиц, прилипших к поверхности стали. Из рисунка видно, что после воздействия лазерным излучением уменьшилась интенсивность характерного для изотопа  $^{235}U$  пика, а активности облучаемых образцов приблизилась к фоновому значению.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Hora H. (1975) Refractive Index and Absorption. In: Ksander Y. (eds) Laser Plasmas and Nuclear Energy. Springer, Boston, MA. doi:10.1007/978-1-4684-2085-2\_6.
- 2 Вейко В.П., Мутин Т.Ю., Смирнов В.Н., Шахно Е.А., Батище С.А. Лазерная очистка поверхностей металлов: физические процессы и применение // Изв. Вузов. Приборостроение. 51(4) 30-36 (2008).

## СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ

Ижойкин Д. А.<sup>1</sup>, Лукин А. В.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Мышкин В.Ф.<sup>2</sup>, д.ф.-м.н., профессор

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

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

E-mail: gos100@list.ru

Лазерные, а также электромагнитные методы разделения стабильных изотопов характеризуются высокой селективностью. Развитие лазерной техники, прогресс в области изучения взаимодействия излучения с веществом привели к тому, что лазерный метод может быть целесообразным на небольших опытных установках для получения малых количеств изотопной продукции.

Основы лазерного разделения изотопов (ЛРИ), в том числе с использованием атомарных паров, были заложены в СССР. Проводились исследования физических процессов и работы по созданию экспериментальных стендов для разделения изотопов. Первые обнадеживающие экспериментальные результаты по ЛРИ в атомарных парах по наработке значительного количества целевого изотопа были получены в США. Метод получил название AVLIS (Atomic vapor laser isotope separation). В основе AVLIS лежит процесс многоступенчатой ионизации целевого изотопа настраиваемыми на его оптические переходы между атомными уровнями энергии излучениями перестраиваемых лазеров. В свою очередь, перестраиваемые лазеры на красителях функционируют при их накачке излучением мощных газоразрядных лазеров на парах меди ( $\lambda=510,6$  нм и  $\lambda=578,2$  нм) или излучением второй гармоникой лазеров Nd:YAG, генерирующими импульсы с частотой 10-20 кГц на  $\lambda=530$  нм.

С начала 1980-х годов, благодаря достижениям лазерной спектроскопии, физики плазмы, лазерной физики и техники, работы по совершенствованию процесса AVLIS получили дополнительный стимул и вышли на качественно новый этап. К концу 80-х годов по всем направлениям был достигнут существенный прогресс. Это позволило в 1989 г. перейти к развертыванию технологии AVLIS на уровне создания крупномасштабного прототипа завода разделения изотопов. Конечной стратегической целью программы AVLIS являлось снижение стоимости обогащения урана за счет использования лазерной технологии. В 1992-1993 годах в США было создано оборудование нового поколения и проведены его испытания. Оборудование включало мощные лазеры и сепараторы промышленного масштаба, позволяющие обеспечить высокую производительность процесса обогащения урана и необходимые объемы производства. Мощность установки могла обеспечить получение сотен килограмм целевого изотопа. Разработанный комплекс лазеров на парах меди по суммарной средней мощности генерации был доведен до 72 кВт, а комплекс лазеров на красителях по получению перестраиваемой генерации до 24 кВт.

Прогресс в реализации процесса AVLIS позволил США в начале 1990-х годов начать работы и по программе разработки и демонстрации технологических основ процесса обогащения плутония с использованием процесса AVLIS как основного компонента. Аналогичные программы по AVLIS были развернуты во Франции, России, Китае, Японии, Великобритании, Индии, Израиле, Корею.

В Японии также проявляли значительный интерес к урану, так как АЭС составляют основу национальной энергетики. В 1990-1995 гг. разработки технологии лазерного разделения изотопов урана в атомарных парах получили быстрое развитие, а инвестиции в создание AVLIS процесса составили сотни миллионов долларов. Работы по AVLIS начинались в Японии в университете г.Осака (Japan Atomic Energy Research Institute). Наиболее успешным в исследованиях, связанных с технологией AVLIS, является Laser Atomic Separation Engineering Research Association of Japan.

Аналогичная европейская программа называлась SILVA. Наиболее активно важнейшие компоненты оборудования для лазерного разделения изотопов разрабатывались во Франции (Jilas Alcatel) и в Англии (Oxford Lasers). Перечисленные выше исследования в основном проходили в рамках AVLIS.

В новом тысячелетии исследования по лазерному разделению урана были продолжены в сотрудничестве американской компании USEC и австралийской Silex Systems Ltd. Предполагалось создание к 2010 г. промышленной установки с запуском ее в эксплуатацию к 2012 г. с проектной мощностью от 3,5 до 6 млн единиц работы разделения (EPP).

SILEX метод это процесс MLIS с использованием гексафторида урана в качестве сырья. По многим деталям процессы SILEX и MLIS трудно отличить. В SILEX используется импульсный CO<sub>2</sub>-лазер с длиной волны 10,8 мкм, излучение которого преобразуется в 16 мкм с помощью парагидрогенного комбинационного преобразователя длины волны лазерного излучения. И целевой изотоп, и отвал удаляются механическим путем, а целевой процесс допускает каскадирование.

SILEX имеет преимущества перед другими процессами обогащения урана, такими как низкое энергопотребление, простые и практичные модули разделения и универсальность. Разработчики метода (компания Silex) декларировали, что коэффициент разделения составляет 2-20.



## ОТБОР ПРОБ НАНОПОРОШКА ИЗ ОЧАГА ЛАЗЕРНОГО ПРОБОЯ

Туксов И. В.<sup>1</sup>, Хорохорин Д. М.<sup>1,2</sup>, Лукин А. В.<sup>1</sup>

Научный руководитель: Мышкин В.Ф.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., профессор

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

<sup>2</sup>ФГУП «Горно-химический комбинат», 660049, г. Железногорск, ул. Ленина, 53

E-mail: whirlpool94@yandex.ru

Известно, что как при криогенных, так и комнатных температурах моноизотопные кристаллы имеют большую теплопроводность, чем кристаллы, содержащие более 5% примесного изотопа. Значительное отличие теплопроводности объясняют наличием в кристаллах термодинамически равновесных кластеров примесных изотопов [1, 2], которые влияют на теплопроводность [3], теплоемкость [4], скорость перемещения дислокаций, определяющей пластичность [6], коэффициент упругости [5] кристаллов.

В настоящее время материаловедение достигло такого высокого уровня, при котором замедляется его дальнейшее совершенствование. Толчок для развития материаловедения может дать использование специально формируемых смесей изотопов. Одно из направлений использования изотопов в материаловедении - формирование термодинамически неравновесных кластеров изотопов в твердых телах (ТТ), имеющих природное соотношение изотопов. Поэтому актуальны исследования, связанные с формированием в твердых телах заранее заданного распределения стабильных изотопов.

Ранее нами показано, что плазменные процессы, протекающие во внешнем постоянном магнитном поле 70 мТл селективны по изотопам. Наблюдается магнитный изотопный эффект, который индуцируется постоянными магнитными полями и связан со спиновой селективностью радикальных реакций, находящихся в магнитном поле [7, 8].

Нами также экспериментально показано, что при конденсации из плазменного потока в магнитном поле диапазон размеров наночастиц Zn изменяется с 40-150 нм (в магнитном поле Земли) на 10-190 нм (в поле 44-76 мТл). При конденсации паров Cu из низкотемпературной плазмы в магнитном поле 30 мТл сужается распределение частиц по размерам, относительно его значения без поля. Эти данные о размерах частиц получены в плазменном потоке методом спектральной прозрачности путем просвечивания излучением широкого спектра.

Не представляется возможным проведение изотопного анализа наночастиц безотборным методом. Поэтому необходимы устройства для улавливания наночастиц, образующихся во внешнем постоянном магнитном поле при лазерной абляции твердых тел сырья природного изотопного состава. Цель исследования – испытание электрофильтра для улавливания наночастиц для изотопного анализа.

В докладе приводятся новые данные испытаний миниатюрного устройства для отбора проб наночастиц. Основу устройства составляла тонкостенная труба из фторопласта диаметром 14 мм и высотой 36 мм. Трубу устанавливали на расстоянии ~1 см от мишени, а лазерный пучок проецировали по оси трубы. В трубу со стороны мишени тангенциально подавали аргон, что способствовало затягиванию наночастиц в электрофильтр.

Положительный электрод заземляли для обеспечения безопасности. Проводилась оптимизация конструкции электродов. Для получения наночастиц пластину из прессованного  $Al_2O_3$  облучали импульсами неодимового лазера. Сравнивали количество порошка, осаждаемого на фильтре при одинаковом количестве импульсов. В дальнейшем порошок сбивали с фильтра в ультразвуковой ванне. О количестве улавливаемого порошка судили по оптической плотности взвеси, определяемой на длине волны 0,63 мкм. Выбрана конструкция проволочных электродов, обеспечивающей осаждение большего количества наночастиц.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клочихин А.А., Давыдов В.Ю., Сеель Е.Р. // ФТТ, 49(1) 43-51 (2007).
2. Frank O., Kavan L., Kalbac M. // Nanoscale, 6(12) 6363-6370 (2014).
3. Жернов А.П. // ФТТ, 40(10) 1829-183 (1998).
4. Berman R., Bounds C. L., Rogers S.J. // Proc. R. Soc. Lond. A, 289, 66-80 (1965).
5. Clerc Daryl G., Ledbetter Hassel // Computational Condensed Matter 2017, 1-9.
6. Бучаченко А.Л. // Письма в ЖЭТФ, 84(9) 590-591.
7. Turro N.J. / Proceed. NAS of USA, 80(2) 609-662 (1983).
8. Зельдович Я.Б., Бучаченко Ф.Л., Франкевич Е.Л. // УФН 155(1) 3-45 (1988).

*Секция 3*

**ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ  
В ЯДЕРНО-ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ**

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

## МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Туксов И.В., Ван Цайлунь, Каргина П.С.

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

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

E-mail: whirpool94@yandex.ru

Известно, что изменяя изотопный состав твердых тел (ТТ) можно изменять их свойства. Например, теплопроводность кристаллов [1]; теплоемкость [2], коэффициент диффузии [3], коэффициент упругости [4]. Взаимные эффекты в параметрах ТТ в полной мере изучены [5].

Используемые в настоящее время способы формирования заданного распределения изотопов в ТТ связаны с использованием моноизотопных соединений [6-8] или облучением ускоренными частицами или ионами [9]. Это дорогостоящие технологии.

Примесные изотопы в ТТ образуют термодинамически равновесные кластеры [10-11]. Параметры кластеров изотопов, кроме указанных выше свойств ТТ, также влияют на подвижность дислокаций, а поэтому на пластичность кристаллов.

Открытие спиновой селективности химических реакций в слабом магнитном поле [12] показало фундаментальную роль магнитных взаимодействий. Магнитный изотопный эффект индуцируется постоянными магнитными полями и связан со спиновой селективностью радикальных реакций в магнитном поле [13, 14]. Известно, что при фиксировании значения одной из проекций спина две другие проекции характеризуются дисперсиями, связанными соотношением неопределенности [15].

В докладе обсуждается феноменологическая и математическая модели процессов при нуклеации паров С, SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> природного изотопного состава из низкотемпературной плазмы, находящейся в постоянном магнитном поле, задаваемом в диапазоне 1-200 мТл. В работе сформулированы основные закономерности зависимости размеров кластеров изотопов, проявляющиеся при нуклеации, от распределения вдоль оси плазменного потока величин скорости, температуры и внешнего постоянного магнитного поля.

На размер кластеров изотопов также влияет возможная миграция по поверхности дисперсной частицы атомов из газовой фазы, сорбированной. Для целевого изотопа время триплет-синглетного перехода должна быть меньше времени нахождения сорбированного атома в одном из потенциальных ям на поверхности ТТ или дисперсной частицы. Рост изотопных кластеров стимулируется подбором времени триплет-синглетной конверсии для целевого изотопа и подавляется для второго изотопа из-за большего времени формирования синглетной пары, чем время сорбции при заданных условиях. В результате целевой изотоп формирует химическую связь, а второй изотоп испаряется.

При моделировании процессов формирования синглетного состояния неспаренных спинов, в уравнениях квантовой механики, учитывается соотношение неопределенности для фазы прецессии и проекции спина на направление внешнего магнитного поля [16].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жернов А.П. // ФТТ, 40(10) 1829-183 (1998).
2. Berman R., Bounds C. L., Rogers S.J. // Proc. R. Soc. Lond. A, 289, 66-80 (1965).
3. Магомедов М.Н. // Письма в ЖТФ, 32(10) 40-49 (2006).
4. Daryl G. Clerc // Computational Condensed Matter 2017, 1-9.
5. Cardona M., Thewalt M.L.W., // Rev. Mod. Phys., 77(4) (2005).
6. Haller E.E. // Applied Physics Reviews, 1995, 77(7).
7. Berezin, A.A. // Interdisciplinary Science Reviews, 17(1) 74-80 (1992).
8. Годисов О.Н., Калитеевский А.К., Сафронов А.Ю. и др. // ФТП, 36(12) 1484-1485 (2002).
9. Дидик В.А., Козловский В.В., Малкович Р.Ш. и др. // ФТТ, 45(9) 1576-1578 (2003).
10. Клочихин А.А., Давыдов В.Ю., Сеель Е.Р. // ФТТ, 49(1) 43-51 (2007).
11. Frank O., Kavan L. Kalbac M. // Nanoscale, 6(12) 6363-6370 (2014).
12. Зельдович Я.Б., Бучаченко Ф.Л., Франкевич Е.Л. // УФН 155(1) 3-45 (1988).
13. Turro N.J. / Proceed. NAS of USA, 80(2) 609-662 (1983).
14. Gould I.R., Turro N.J. and Zimmt M.B. // Advances in Physical Organic Chemistry, 20 1-53 (1984).
15. David H. McIntyre Spin and Quantum Measurement, Oregon State University. – 77 p.
- 1.6 Myshkin V.F. et al. // IOP Conf. Series, 135 (2016) 012029 doi:10.1088/1757-899X/135/1/012029.

## ПОЛУЧЕНИЕ НАНОПОРОШКА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Ижойкин Д.А.<sup>1</sup>, Гуксов И.В.<sup>2</sup>, Кейних Д.Д.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Мышкин В.Ф.<sup>2</sup>, д.ф.-м.н., профессор

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

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

E-mail: whirlpool94@yandex.ru

Моноизотопные кристаллы при 20-50К имеют более 100 раз большую теплопроводность, чем кристаллы, содержащие смесь изотопов. При комнатной температуре теплопроводность моноизотопных кристаллов до 2-3 раз больше теплопроводности смеси, содержащей более 5% примесного изотопа. Это объясняется тем, что формируются термодинамически равновесные кластеры изотопов [1, 2], которые влияют на теплопроводности кристаллов [3], теплоемкость [4], коэффициента упругости [5], пластичность [6].

Формирование термодинамически неравновесных кластеров изотопов в твердых телах (ТТ), имеющих природное соотношение изотопов, связано с дальнейшим развитием материаловедения, а также методов разделения изотопов. Поэтому актуальны исследования по формированию термодинамически неравновесных кластеров изотопов в ТТ и исследованию их свойств, в том числе в ТТ природного изотопного соотношения.

Ранее показано, что плазменные процессы при неполном окислении атомарного углерода во внешнем постоянном магнитном поле 70 мТл селективны по изотопу <sup>13</sup>С. Магнитный изотопный эффект индуцируются постоянными магнитными полями и связан со спиновой селективностью радикальных реакций в жидкостях, находящихся в магнитном поле [7, 8].

Нами впервые экспериментально показано, что при конденсации из плазменного потока в магнитном поле минимальный размер наночастиц Zn изменяется с 40 нм (0 мТл) до 10 нм (44-76 мТл). Максимум моды смещается с 150 нм до 190 нм при увеличении величины поля от нуля до 76 мТл. При конденсации паров Си в магнитном поле 30 мТл сужается распределение частиц по размерам, относительно его значения без поля.

Цель исследования - формирование заданного распределения по размерам кластеров изотопов. В докладе приводятся новые данные экспериментальных исследований по формированию кластеров изотопов в наночастицах при их зарождении и росте в постоянном магнитном поле 1-200 мТл из сырья природного изотопного состава из низкотемпературной плазмы. Магнитное поле увеличивает скорость формирования ядер конденсации и нуклеации. Получены наночастицы SiO<sub>2</sub>, C, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, содержащие области с повышенным содержанием примесного изотопа относительно природного значения, путем испарения оксидов с помощью лазерного излучения и высокочастотной плазмы и формирования дисперсных частиц во внешнем магнитном поле, задаваемом в диапазоне 1-200 мТл.

Экспериментальные исследования связаны с формированием пространственно зависимого постоянного магнитного поля для триплет-синглетного преобразования спиновых пар на растущей поверхности наночастиц, содержащих целевую изотопную модификацию.

Получены закономерности зависимости распределения размеров кластеров изотопов в наночастицах SiO<sub>2</sub>, C, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в магнитном поле 1-200 мТл, от концентрации, температуры гетерогенной плазмы и распределения внешнего постоянного магнитного поля вдоль оси.

Концентрация изотопов и размеры кластеров оценены из данных рентгенодифракционного анализа и спектров рамановского рассеяния, а концентраций изотопов в наночастицах - из данных масс-спектрометрического анализа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клочихин А.А., Давыдов В.Ю., Сеель Е.Р. // ФТТ, 49(1) 43-51 (2007).
2. Frank O., Kavan L., Kalbac M. // Nanoscale, 6(12) 6363-6370 (2014).
3. Жернов А.П. // ФТТ, 40(10) 1829-183 (1998).
4. Berman R., Bounds C. L., Rogers S.J. // Proc. R. Soc. Lond. A, 289, 66-80 (1965).
5. Clerc Daryl G., Ledbetter Hassel // Computational Condensed Matter 2017, 1-9
6. Бучаченко А.Л. // Письма в ЖЭТФ, 84(9) 590-591.
7. Turro N.J. / Proceed. NAS of USA, 80(2) 609-662 (1983).
8. Зельдович Я.Б., Бучаченко Ф.Л., Франкевич Е.Л. // УФН 155(1) 3-45 (1988).

## СИНТЕЗ МУЛЛИТОСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ В УСЛОВИЯХ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

Шеховцов В.В., Гафаров Р.Е., Волокитин О.Г.

Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2  
E-mail: shehovcov2010@yandex.ru

Исходя из анализа отечественных и зарубежных работ по синтезу муллита, можно сделать вывод, что большинство исследований муллита проводилось на образцах, полученных при температурах 1000-1400°C [1-3]. Работ, посвященных изучению муллита, являющегося составной частью керамических изделий, обожженных в интервале температур 1400-1900°C и выше, значительно меньше. Это можно объяснить тем, что задача по достижению температуры синтеза муллита является труднодостижимой, при использовании традиционных плавильных аппаратов. Также в работе [4] отмечали, что в начале процесса муллитизации решетка муллита обладает большим количеством дефектов, а затем по мере повышения температуры обжига кристаллическая решетка муллита совершенствуется. Поэтому было принято решение использовать плазменную установку (3000–5000°C) с целью усовершенствования технологии синтеза муллита.

В качестве исходного сырья был использован обогащенный каолин из карьера Журавлиный лог. Химический состав представлен в таблице 1. Количество образующегося муллита зависит от природы сырья, и чем выше содержание в нем каолина, тем больше муллита образуется [5, 6].

Таблица 1. Усредненный состав обогащенного каолина.

Содержание оксидов, %								
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	п.п.п
47,59	37,12	0,54	0,38	0,79	0,51	1,37	0,3	11,2

Однако известно, что при обжиге каолина, накапливается кремнезем SiO<sub>2</sub>, избыток которого снижает выход муллита и ухудшает его качество. Для повышения уровня синтеза муллита и снижения содержания в нем кристобалита в исходный каолин производилась подшихтовка глинозема Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При этом, чтобы добиться на выходе муллита основного химического состава 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub> было рассчитано, что на 1 кг обогащенного каолина необходимо добавлять 0,35 кг Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

В рамках экспериментальной работы получены продукты плавления, по методике [7, 8]. По результатам рентгенофазового анализа установлено, что кристаллической фазой в продукте плавления является муллит с орторомбической сингонией ( $D9_{2h}=Pbam$ ) и химическим составом Al<sub>6</sub>.9Si<sub>1</sub>.22O<sub>4</sub>.85. Однако наличие сложного строения синтезированного материала не исключает содержание муллита с другим химическим составом. Это связано с тем, что муллит относится к соединениям с переменным составом: от 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub> до 2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2020-0004.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Costa Oliveira F.A., Livramento V., Delmas F. Novel mullite-based ceramics manufactured from inorganic wastes: I. Densification behaviour // J. Mater. Process. Technol. – 2008. – V. 196. – No. 1-3. – P.101-108.
2. Bagchi B., Das S., Bhattacharya A. [et al.] Nanocrystalline Mullite Synthesis at a Low Temperature: Effect of Copper Ions // J. Am. Ceram. Soc. – 2009. – V. 92. – No. 3. – P. 748-751.
3. Ribero D., Restrepo R., Paucar C. [et al.] Highly refractory mullite obtained through the route of hydroxyhydrogels // J. Mater. Process. Technol. – 2009. – V. 209. – No. 2. – P. 986-990.
4. Будников П.П., Мчедлов-Петросян О.П. К термодинамике изменений каолинита при нагревании // ДАН СССР. 1960. № 12. С. 349—356.
5. Белянкин Д.С., Федотьев К.М. Кривая нагревания каолина в современном ее освещении // ДАН СССР. – 1949. – Т. 65. - № 3. – С. 357-364.
6. Bai J. Fabrication and properties of porous mullite ceramics from calcined carbonaceous kaolin and  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Ceram. Int. – 2010. – V. 36. – No.2. – P. 673-678.
7. Волокитин О.Г., Верещагин В.И., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Шеховцов В.В. Получение силикатных расплавов с высоким силикатным модулем из кварц-полевошпатсодержащего сырья по плазменной технологии / Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. № 1. С. 73-77.
8. Волокитин О.Г., Шеховцов В.В. Процессы получения силикатных расплавов и материалов на их основе в низкотемпературной плазме / Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1 (60). С. 144-148.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРОДУКТОВ ПЛАВЛЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

Шеховцов В.В., Волокитин О.Г.

Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск,  
пл. Соляная, 2

E-mail: shehovcov2010@yandex.ru

В связи с тем, что в настоящее время получить расплав из силикатсодержащих отходов энергетических производств, имеющих температуру плавления порядка 1600–1700°С, с использованием традиционных технологий не представляется возможным из-за низких температур, реализуемых существующими плавильными агрегатами, возникает необходимость в использовании энергии низкотемпературной плазмы в разрабатываемой технологии, которая обладает высокой концентрацией энергии и температурой 3000–5000°С. Также использование высококонцентрированных потоков снижает энергозатраты [1, 2] при получении силикатного расплава за счет сокращения времени образования расплава.

Принцип работы установки основан на взаимодействии высококонцентрированных потоков плазмы с порошкообразным сырьевым материалом (зола, отходы горючих сланцев) фракцией от 50 мкм до 2 мм. Подача сырья осуществляется тангенциально непосредственно в область горения дуги. Для равномерной регулируемой подачи порошкообразного материала сконструирован и изготовлен вибрационный секторный дозатор [3].

Объектами исследований стали продукты плавления базальта, золы и отходов горючих сланцев. Исследовался с помощью микроскопии вторичных электронов (SEM), дающих топографическое изображение поверхности образца (рис. 1).

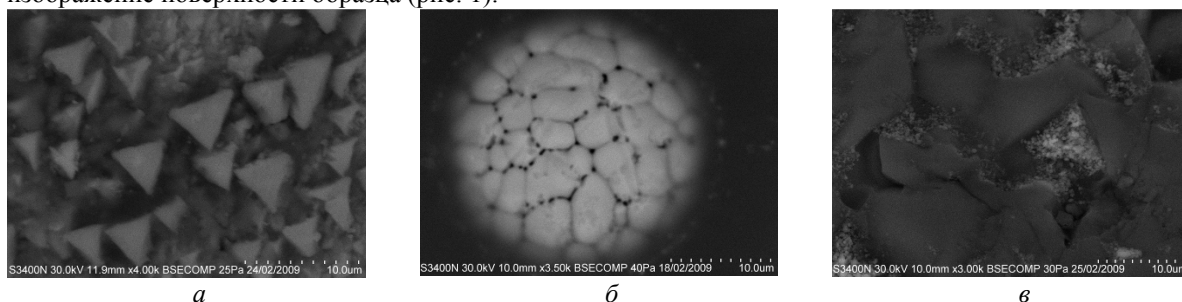


Рис. 1. Структура поверхности продуктов плавления: *а* – базальт; *б* – зола ТЭС; *в* – горючие сланцы

Согласно полученным данным, можно сделать вывод о том, что наиболее разупорядоченную структуру поверхности имеет продукт плавления отходов горючих сланцев. Стеклофаза включает разнородные неравномерно распределенные формы. Структурные элементы продукта плавления базальта имеют треугольную форму, в то время как зольный продукт характеризуется упорядоченными элементами призматической формы, равномерно распределенными в стекловидной массе.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 20-79-10102)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов В.А., Тихомиров И.А., Мышкин В.Ф. Диагностика низкотемпературной плазмы высокочастотных разрядов и плазмы горения веществ / В. А. Власов, И. А. Тихомиров, В. Ф. Мышкин; Томский политехнический университет. Москва, 2002.
2. Мышкин В.Ф., Власов В.А., Гамов Д.Л., Бурдовицын А.Н., Хан В.А. Изотопное перераспределение в продуктах плазменных процессов в высокочастотных разрядах / Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2010. № 61. С. 1-13.
3. Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Абзаев Ю.А., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В. Исследование процессов, протекающих при плазмохимическом синтезе высокотемпературных силикатных расплавов. Часть 1: Анализ отходов обогащения молибденовых руд Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 4 (41). С. 197-202.
4. Волокитин О.Г., Верещагин В.И., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Шеховцов В.В. Получение силикатных расплавов с высоким силикатным модулем из кварц-полевошпатсодержащего сырья по плазменной технологии / Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. № 1. С. 73-77.

## ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ГАЗОВОЙ АТОМИЗАЦИИ

Шикерун К. Т.

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

В настоящее время широко развиваются аддитивные технологии. Однако, большим недостатком аддитивных технологий является значительная стоимость используемого сырья в виде порошков сферической формы различного фракционного и химического составов, содержащие природную смесь изотопов. От параметров порошка (дисперсность, сферичность частиц, отсутствие пор) зависит качество изделий, формируемых с помощью аддитивных технологий.

Например, коммерчески доступные порошки титановых сплавов российского производства имеют ряд недостатков. К ним можно отнести несоответствие составов порошковых материалов большому количеству сертифицированных сплавов для стран СНГ, высокую стоимость (более \$ 500 за 1 кг порошка), а также отсутствие отечественных промышленных технологий их получения. Таким образом, стоит задача импортозамещения и сырьевого обеспечения оборудования для аддитивного производства.

Многообразие методов получения порошков титана обусловлено требованиями, предъявляемыми заказчиками исходя из различных сфер деятельности человека. Разница в требованиях к химическому и гранулометрическому составу порошка, основана на различиях его свойств и эффективности применения для аддитивных технологий.

Методы производства титанового порошка делятся на три группы: химические – газофазные реакции, электроосаждение, гидролиз; физические и механические методы производства. Одним из основных методов получения порошков на основе титана, в том числе порошков высокой чистоты, является распыление вращающегося электрода. В этом случае цилиндр из распыляемого сплава вращается вокруг горизонтальной оси, а его свободный конец расплавляют с помощью электрической дуги. Капли расплавленного металла срываются с электрода, и кристаллизируются в свободном падении до столкновения со стенками камеры распыления. В рабочей камере формируется защитная инертная среда (или вакуум), что позволяет получать порошки с высокой чистотой поверхности. Частицы, полученного таким способом порошка, имеют сферическую форму. Средний размер частиц порошка зависит от технологических параметров распыления и находится в интервале 40-200 мкм.

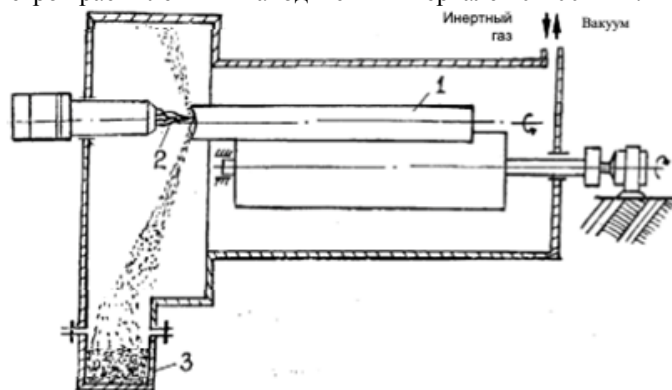


Схема установки для получения сферических порошков методом центробежного распыления.

1- распыляемый материал, 2- плазматрон, 3- бункер для порошка

Получение сферических порошков по рассмотренной технологии является достаточно дорогостоящим, поскольку изготовление расходуемого тела вращения для распыления сопряжено с целым рядом технологических переделов. Альтернативный метод «атомизации» для получения порошковых материалов со сферической формой частиц является еще более дорогостоящим.

Поэтому в настоящее время широко изучается метод получения титановых порошковых материалов с несферической формой частиц, полученных путем дробления титана губчатого до необходимых фракций. В докладе обсуждаются вопросы технологии, а также преимущества применения такого порошка в аддитивных технологиях. Значительное внимание уделяется анализу недостатков несферических частиц.

Усилия по удешевлению производства порошка титана направлено на расширение использования 3D-печати для производства деталей сложной формы, в том числе медицинского назначения.

## ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОРОШКОВ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ ГАЗОВОЙ АТОМИЗАЦИИ

Шикерун К. Т.

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

В настоящее время широко развиваются аддитивные технологии - метод послойного наращивания деталей заданной формы. Однако, большим недостатком аддитивных технологий являются дефекты микроструктуры используемого сырья в виде порошков сферической формы различного фракционного и химического составов, содержащие природную смесь изотопов.

Структура поверхности гранул порошков, полученных методом газовой атомизации, имеет выраженную дендритную структуру во всем диапазоне гранулометрического состава и большое количество образующихся дефектов – сателлитов. Сателлиты являются наиболее характерным и неизбежным дефектом гранул жаропрочных материалов, получаемых распылением жидкого металла потоком инертного газа. Формирование сателлитов происходит из-за того что, энергия газового потока передается дисперсным частицам в соответствии с их массой. Наиболее мелкие гранулы, приобретают большую начальную скорость и, мгновенно кристаллизуются. Мелкие твердые частицы сталкиваются с более крупными, частично кристаллизованными гранулами, имеющие меньшую начальную скорость. Количество дефектных гранул увеличивается с увеличением размеров дисперсных частиц.

Большое влияние на качество сплавления при применении аддитивных технологий оказывает внутренняя пористость в гранулах, полученных при распылении аргоном (см. рис. 1). Внутренние поры в гранулах, полученных распылением расплава потоком аргона, является следствием технологии их получения. При дроблении струи жидкого металла потоком аргона фрагменты расплава под действием сил поверхностного натяжения формируют капли сферической формы. В процессе формирования внешних стенок капли локальный объем аргона может быть захвачен и изолирован внутри остывающей гранулы.

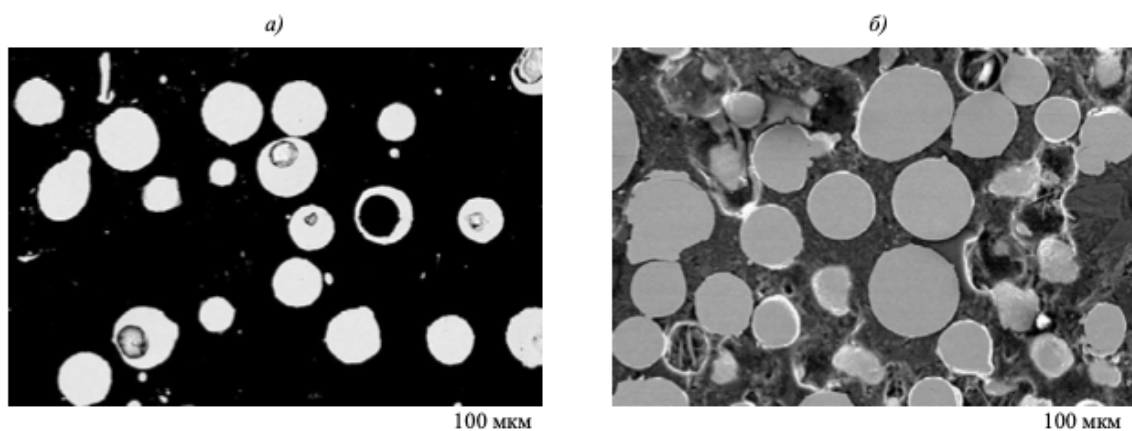


Рис. 1. Микроструктура поперечных срезов «легких» (а –  $\times 150$ ) и «тяжелых» гранул (б –  $\times 250$ ) порошков жаропрочного сплава ЭП648-ВИ после газодинамической сепарации в классификаторе

Поэтому актуальны исследования, связанные с воздействием на микроструктуру порошка в процессе образования единичных частиц для получения порошка с необходимыми размерами и формой. Цель исследования – изучить влияние условий проведения технологического процесса образования дисперсной фазы при газовой атомизации.

При формировании дисперсных частиц из атомарного пара формирование внутренних пор маловероятно. В докладе обсуждаются физико-химические процессы, направленные на формирование дисперсных частиц идеальной сферической формы.

Показано, что при воздействии магнитным полем при нуклеации диамагнитных веществ можно оказывать значительное влияние на как на спектр размеров дисперсных частиц, так и на их изотопный состав. При этом сырье имеет природный изотопный состав.



# THERMAL HYDRAULIC CALCULATION OF THE CHANNELS OF A NUCLEAR REACTOR (SCWR)

Parimala Rangan Fidel Castro

Scientific supervisor: Prof. Alexander G. Korotkikh, Doctor of Physics and Mathematical Sciences  
Tomsk Polytechnic University, 30 Lenina Avenue, Tomsk, 634050

E-mail: fidelcastroprp@gmail.com

It's necessary to study the method of thermo-hydraulic calculation of the core nuclear reactor (a sequence of calculation formulas that made it possible to determine the parameters of the coolant and the surface of the fuel elements along the length of the channel: enthalpy of water, water temperature, the temperature of the cladding of a fuel rod, fuel center temperature, hydraulic resistances). The initial calculation parameters and schematic of circulation circuit is on the basis of PWR. Heat transfer between water and fuel elements in the course of supercritical water flow. Of greatest interest are fast reactors cooled by liquid sodium or lead, and water-cooled reactors at supercritical pressure of 25 MPa (SCWR), which allow combining the design of a reactor with pressurized water (PWR) and a boiling reactor (BWR) in a single concept and increase the efficiency (up to 44% and more).

The flow is super critical, therefore Mokrv et al, correlation is selected for heat transfer calculation.

$$Nu_b = 0.0061 Re_b^{0.904} Pr_b^{0.684} \left( \frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.564}$$

Fluid bulk properties are known, outside wall temperature of the cladding is assumed and using the Mokrv et al, correlation, fluid properties at wall temperature and bulk temperature, heat transfer coefficient is evaluated. Which is then used to calculate new outside wall temperature of cladding. Percentage difference between the assumed wall temperature and new wall temperature is evaluated. The whole iteration is then repeated with new wall temperature as the assumed wall temperature till the difference between assumed wall temperature and new wall temperature becomes less than 2 percent.

The maximum cladding outside temperature is 388.5 °C at 0.8 meters above the center of fuel rod. The temperature of cladding is higher than the coolant temperature at all points, it reaches a maximum values and then decrease towards the outlet, this trend is in harmony with that of literature [1]. The maximum temperature value of fuel centerline is 1200 °C at the center of fuel rod.

The flow is super critical, therefore Mokrv et al, correlation is selected for heat transfer calculation, same as in above section. Fluid bulk properties are known, outside wall temperature of the cladding is assumed and using the Mokrv et al, correlation, fluid properties at wall temperature and bulk temperature, heat transfer coefficient is evaluated. Which is then used to calculate new outside wall temperature of cladding. Percentage difference between the assumed wall temperature and new wall temperature is evaluated. The whole iteration is then repeated with new wall temperature as the assumed wall temperature till the difference between assumed wall temperature and new wall temperature becomes less than 2 percent. The maximum cladding outside temperature is 610 °C at 0.8 meters above the center of fuel rod.

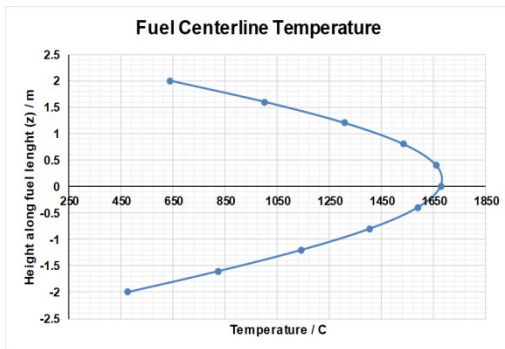


Fig. 1. Distribution of fuel centerline temperature for center

Fuel centerline temperature was evaluated along the length of fuel rod and plotted in figure 1. The maximum temperature value of fuel centerline is 1650 °C at the center of fuel rod.

The thermal hydraulics calculations for VVER SKD showed that the maximum fuel centerline temperature is 1650 °C for ascensional section of the core, whereas, for descending section, it is 1200 °C. These values are very less than the melting temperature of the UO<sub>2</sub> i.e. 2865 °C, ensuring high safe margin in this reactor. Moreover, the cladding temperature. Moreover, the maximum fuel centerline temperature for VVER SKD is lower as compared with PWR plant of similar power.

## REFERENCES

1. A. Glebov and A. Klushin, "Development of Supercritical-Water Cooled Reactors in Russia and Abroad", *Atomic Energy*, vol. 116, no. 5, pp. 320-329, 2014. Available: 10.1007/s10512-014-9860-x [Accessed 2 July 2020].

## **ЭФФЕКТИВНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ДОБАВКИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ $UO_2$ В РЕЖИМАХ РАБОТЫ РЕАКТОРА LWR**

Зорькин А.И., Украинец О.А.

Научный руководитель: Беденко С.В., к.ф.-м.н., доцент

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

E-mail: aizork1995@gmail.com

В настоящее время для коммерческих легководных реакторов промышленного назначения в качестве ядерного топлива используют диоксид урана ( $UO_2$ ), который демонстрирует наиболее оптимальные характеристики с точки зрения соотношения его промышленной эффективности и экономической составляющей. Преимуществом диоксида урана является высокая степень удержания газа деления, химическая стабильность, высокая температура плавления и кубическая кристаллическая структура [1-2].

Однако в качестве недостатков  $UO_2$  отмечают его низкую теплопроводность, что приводит к развитию относительно большого температурного градиента по размеру всей топливной таблетки. Данный температурный градиент является ограничительным фактором в эксплуатационных характеристиках реакторных установок типа LWR [3-4].

Высокая температура топлива может быть снижена и улучшена производительность реактора за счет разработки ядерного топлива с повышенной теплопроводностью. Ядерное топливо с высокой теплопроводностью снизило бы температуру топлива и способствовало бы уменьшению взаимодействия оболочки гранул за счет уменьшения тепловых напряжений, которые приводят к растрескиванию топлива, перемещению и набуханию [5].

В настоящей работе приводятся результаты исследований с различными вариантами таких топливных добавок для  $UO_2$ , улучшающие его свойства, основными из которых являются соединения SiC и BeO. Данные соединения демонстрируют совместимость с  $UO_2$ , в результате чего получаемое композитное ядерное топливо обладает повышенной эффективной теплопроводностью.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Chandramouli D.A., Revankar T.S. Development of Thermal Models and Analysis of  $UO_2$ -BeO Fuel during a Loss of Coolant Accident // International Journal of Nuclear Energy. – 2014. – p. 1-9.
2. Zhou W.V., Liu R.S., Revankar T.S. Fabrication methods and thermal hydraulics analysis of enhanced thermal conductivity  $UO_2$ -BeO fuel in light water reactor // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – p. 1-9.
3. Zhou W.V., Liu R.S., Chan P.K. Fully coupled multiphysics modeling of enhanced thermal conductivity  $UO_2$ -BeO fuel in light water reactor // Nuclear Engineering and Design. – 2015. – p. 511-523.
4. Zhou W.V., Liu R.S., Mehrdad S.B. Microstructure Based Thermal Conductivity and Thermal Behavior Modeling of Nuclear Fuel  $UO_2$ -BeO // Heat Transfer Engineering. – 2017. – p. 1-53.
5. Zhou W.V., Wenzhong Z.V. Thermophysical and Mechanical Analyses, SiC, and FeCrAl Claddings // Metals. – 2017. – p. 1-14.

## **ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО ПУЧКА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ДЕЙТЕРИРОВАННОЙ МИШЕНИ УСКОРЕННЫМИ АТОМАМИ**

Прима А.И.

Научный руководитель: Пушкарев А.И., д.ф.-м.н., профессор

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

E-mail: aip17@tpu.ru

Нейтронные пучки являются важной составляющей современной медицины. Они нашли применение в бор-захватной нейтронной терапии при лечении злокачественных опухолей [1] и для наработки короткоживущих радиоизотопов для медицинских целей [2]. Радиоизотопы применяются при позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), являющейся одним из самых совершенных диагностических инструментов, и для проведения других диагностических исследований. При диагностических исследованиях, для обеспечения низкой радиационной нагрузки на пациентов, используют короткоживущие радиоизотопы с периодом полураспада менее 100 минут [2]. Подготовка таких радиоизотопов требует наличия безопасного и недорогого генератора нейтронов.

В работе представлен новый метод генерации импульсного нейтронного пучка. Для иницирования D-D реакции дейтерированная мишень облучается пучком ускоренных атомов дейтерия, а не дейтронов. Выполнен анализ выхода нейтронов за импульс для параметров импульсного ионного генератора ТЕМП-6 (250-300 кВ, длительность импульса 120 нс) [3]. Ускоритель обеспечивает облучение образцов импульсным пучком ускоренных атомов с энергией 250-600 кэВ и плотностью энергии в фокусе 3-10

Дж/см<sup>2</sup>. Формирование ускоренных атомов происходит за счет перезарядки ускоренных ионов дейтерия при взаимодействии с молекулами остаточного газа в диодной камере ускорителя [4].

При облучении металлической мишени ионами значительная часть энергии (более 80%) расходуется на электронные потери без инициирования ядерных реакций [5]. Облучение ускоренными атомами позволяет снизить эти потери. При облучении мишени ускоренными атомами дейтерия суммарный выход нейтронов может быть в 4-5 раз выше и составить  $(1-5) \cdot 10^9$  за импульс [6]. При облучении мишени ускоренными атомами также увеличивается энергия столкновения. Энергия столкновения ускоренного атома дейтерия (с энергией 0.2 – 0.4 МэВ) с атомом дейтерия в мишени превышает 50 кэВ, а энергия столкновения ускоренного иона дейтерия (с энергией 0.2-0.4 МэВ) с атомом дейтерия в мишени менее 1 кэВ. Полный выход нейтронов на один дейтрон в D-D реакции увеличивается в  $\approx 200$  раз с ростом энергии столкновения от 30 кэВ до 220 кэВ. При этом суммарный выход может увеличиться более чем в 10 раз и составить  $(1-5) \cdot 10^{10}$  нейтронов за импульс.

Использование ускоренных атомов дейтерия для генерации нейтронных пучков на установке ТЕМП-6 позволяет получать нейтроны с энергией 2.45 МэВ и интегральным выходом  $(1-5) \cdot 10^{10}$  нейтронов за импульс, что превышает интегральный выход лучших портативных генераторов нейтронов с вакуумными и газонаполненными трубками при использовании D-D реакции ( $10^7-10^8$ ).

Выполненные исследования поддержаны РФФИ, грант 19 - 38 - 90001.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wagner F.M., Loeper-Kabasakal B. and Breikreutz H. Journal of Instrumentation. – 2012. – Т. 7 – С. 1-14
2. Веревкин А. А., Стервиедов Н. Г., Ковтун Г. П. Получение и применение короткоживущих и ультракороткоживущих изотопов в медицине // Вісник Харківського національного університету ім. Каразіна, серія фізична «Ядра, частинки, поля». – 2006. – №. 746. – С. 54-70.
3. Zhu X. P., Lei M. K., Ma T. C. Characterization of a high-intensity bipolar-mode pulsed ion source for surface modification of materials // Review of scientific instruments. – 2002. – Т. 73. – №. 4. – С. 1728-1733.
4. Pointon T. D. Charge exchange effects in ion diodes // Journal of applied physics. – 1989. – Т. 66. – №. 7. – С. 2879-2887.
5. Was G. S. Challenges to the use of ion irradiation for emulating reactor irradiation // Journal of Materials Research. – 2015. – Т. 30. – №. 9. – С. 1158.
6. Pushkarev A., Prima A., Zhu X.P., Ding L., Zhang Q., Isakova Yu., Lei M.K.. Thermal imaging diagnostics of fast radiation processes // 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. Tomsk: . – 2018. – С. 516.

## СИНТЕЗ В ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «ОКСИД НЕОДИМА-ОКСИД САМАРИЯ - ОКСИД МАГНИЯ»

Андреев Д.В.

Научный руководитель: Каренгин А.Г., к.ф.-м.н., доцент  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: dval17@tpu.ru

К явным преимуществам применения плазмы для синтеза сложных оксидных композиций (СОК) из диспергированных смешанных водных нитратных растворов (ВНР) следует отнести: одностадийность; высокую скорость образования соединений; возможность активно влиять на размер и морфологию частиц; компактность технологического оборудования. Однако плазменная переработка только ВНР требует значительных энергозатрат (до 4 МВт·час/т) и не позволяет получать в одну стадию оксидные композиции требуемого стехиометрического состава без дополнительного водородного восстановления [1].

Существенное снижение энергозатрат может быть достигнуто в воздушно-плазменном потоке при плазмохимическом синтезе СОК, включающих оксиды РЗЭ и оксидную матрицу с высоким коэффициентом теплопроводности, из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны и др.), и имеющих низшую теплотворную способность не менее 8,4 МДж/кг [2]. Плазменная переработка таких растворов ВОНР приведет к снижению энергозатрат на их обработку (до 0,1 МВт·час/т), повысит производительность, а также обеспечит условия в плазмохимическом реакторе для прямого синтеза в воздушной плазме наноразмерных СОК с равномерным распределением фаз с требуемым стехиометрическим составом.

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса плазмохимического синтеза СОК «оксид неодима-оксид самария- оксид магния» в воздушно-плазменном потоке. На рис. 1 показано влияние температуры на равновесный состав конденсированных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР, включающего водные растворы нитратов неодима, самария и магния, а также органический компонент (ацетон). при массовой доле воздуха 69 %:

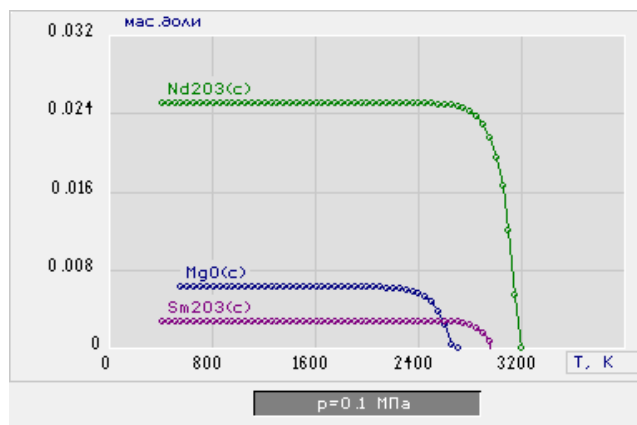


Рис. 1. Влияние температуры на равновесный состав конденсированных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР при массовой доле воздуха 69 % : (MgO – 10 %)

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза наноразмерных СОК из диспергированных растворов ВОНР редкоземельных, редких и рассеянных металлов.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туманов Ю.Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее.– М.: Физматлит, 2003.–759 с.
- Novoselov I.Yu., Karengin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ДИСПЕРСИОННОЕ ПЛУТОНИЙ-ТОРИЕВОЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО

Иванов К.С., Новоселов И.Ю., Тихонов А.Е.

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

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

E-mail: ksi5@tpu.ru

Значительную часть ядерной энергетики в двадцать первом веке еще будут составлять АЭС с реакторами на тепловых нейтронах, использующих ядерное топливо в виде керамики из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, у которого наряду с несомненными достоинствами есть и существенные недостатки: низкая теплопроводность, которая ограничивает удельную мощность реактора по температуре плавления, хрупкость и склонность к растрескиванию, короткий цикл использования (3-5 лет), невозможность создания энергетических установок сверхмалой (до 10 МВт) и малой (до 100 МВт) мощности, большие расходы на утилизацию отработавшего топлива, ограниченный ресурс изотопа уран-235.

Для дальнейшего развития ядерной энергетики перспективным является плутоний-ториевое дисперсионное ядерное топливо (ДЯТ) из оксидов делящихся металлов (плутоний, торий), равномерно распределенных в оксидной матрице, имеющей высокую теплопроводность и низкое сечение резонансного поглощения нейтронов [1].

При использовании изотопов торий-232 и плутоний-239 отпадает необходимость в дорогостоящем изотопном обогащении и появляется возможность создания энергетических установок сверхмалой и малой мощности для использования в труднодоступных регионах.

В отличие от применяемых методов получения сложных оксидных композиций (СОК) путем отдельного получения и механического смешения оксидов металлов, плазмохимический синтез СОК из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны) и водные нитратные растворы, имеет следующие преимущества: одностадийность, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, низкие энерго- и трудозатраты [2].

В работе представлены результаты исследований процесса плазмохимического синтеза СОК из диспергированных растворов ВОНР, включающих ацетон и смешанные водные нитратные растворы самария (вместо плутония), церия (вместо тория) и магния. Подготовленные растворы ВОНР подавались (300 л/ч) через диспергатор в реактор плазменного модуля на базе ВЧФ-плазмотрона, где в воздушно-плазменном потоке при температурах  $\geq 1000$  °С осуществлялся синтез СОК, затем в узле «мокрой»

очистки происходило их резкое охлаждение («закалка») с образованием водных суспензий, которые отстаивали, фильтровали и прокаливали в течение 20 минут при температуре 150 °С.

В ходе исследований проводились лазерная дифракция водных суспензий СОК, сканирующая электронная микроскопия, БЭТ-анализ и рентгенофазовый анализ полученных порошков. Установлено, что при расходе воды на «закалку» (2,8 кг/с), частоте вращения диспергатора (50 Гц) и различных значениях  $\alpha = \text{Sm}/(\text{Sm} + \text{Nd})$  увеличение доли MgO (10...30 %) в составе СОК «Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO» приводит: к снижению размера частиц водных суспензий СОК с 9,4 до 7,4 мкм (при  $\alpha = 0,1$ ); с 12,9 до 5,3 мкм (при  $\alpha = 0,2$ ) и с 6,6 до 4,7 мкм (при  $\alpha = 0,3$ ). При этом размер «зерен» в частицах СОК не превышает 90 нм, что подтверждает плазмохимический синтез наноразмерных СОК из растворов ВОНР.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Novoselov I.Yu., Karengin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ДИСПЕРСИОННОЕ REMIX-ТОПЛИВО

Каренгин А.А., Кузнецов С.Ю., Иванов К.С.

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

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

E-mail: karengin@tpu.ru

Применяемое на АЭС керамическое ядерное топливо из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, имеет наряду с несомненными достоинствами и существенные недостатки: низкая теплопроводность, которая ограничивает удельную мощность реактора по температуре плавления, хрупкость и склонность к растрескиванию, короткий цикл использования (3-5 лет), ограниченный ресурс изотопа уран-235.

Одним из перспективных направлений дальнейшего развития ядерной энергетики является использование регенерированного урана, обогащенного по изотопу уран-235, для изготовления дисперсионного REMIX-топлива в виде диоксида урана, равномерно распределенного в оксидной матрице с высокой теплопроводностью и низким сечением резонансного поглощения нейтронов [1].

Общими недостатками применяемых методов получения оксидных композиций (золь-гель процесс, раздельное получение и механическое смешение) являются: многостадийность, неравномерное распределение фаз, необходимость использования большого количества химических реагентов, высокие энерго- и трудозатраты [2].

К несомненным преимуществам применения плазмы для плазмохимического синтеза в воздушно-плазменном потоке оксидных композиций (ОК) из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны) и водные нитратные растворы, являются: одностадийность, высокая скорость, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, низкие энерго- и трудозатраты [3].

В работе представлены результаты исследований процесса плазмохимического синтеза ОК «UO<sub>2</sub>-MgO» из диспергированных модельных растворов ВОНР, включающих ацетон и смешанные водные нитратные растворы неодима (вместо урана) и магния.

Подготовленные растворы ВОНР подавались (300 л/час) через диспергатор в реактор плазменного модуля на базе ВЧФ-плазмотрона, где в воздушно-плазменном потоке при рабочей температуре 1000-1100 °С осуществлялся синтез ОК, далее в узле «мокрой» очистки (УМО) происходило их резкое охлаждение («закалка») с образованием водных суспензий ОК, которые отстаивали, фильтровали и прокаливали в течение 20 минут при температуре 150 °С.

В ходе исследований проводились лазерная дифракция водных суспензий ОК, сканирующая электронная микроскопия, БЭТ-анализ и рентгенофазовый анализ полученных порошков.

Установлено, что при расходе воды на «закалку» ОК (2,8 кг/с) и частоте вращения ротора диспергатора (35 Гц), увеличение содержания матрицы (MgO) в составе ОК «Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO» (5%, 10%, 15%, 20%, 30% и 50%), ведет к образованию частиц ОК в водных суспензиях размером 13,0 мкм; 9,4 мкм; 7,3 мкм; 6,8 мкм; 5,1 мкм и 4,7 мкм соответственно. При этом удельная поверхность полученных порошков составляет 19,5; 18,0; 17,1; 15,2; 14,6 и 11,2 м<sup>2</sup>/г а размер «кристаллитов» в частицах ОК – 39; 42; 45; 53; 56; 73 и 123 нм., что подтверждает возможность плазмохимического синтеза наноразмерных ОК из диспергированных растворов ВОНР.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Туманов Ю.Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее.– М.: Физматлит, 2003.–759 с.
3. Novoselov I.Yu., Karengin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.

### **ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ДИСПЕРСИОННОЕ УРАН-ПЛУТОНИЕВОЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО**

Расторгуев В.И., Каренгин А.А., Ельмиров Д.В.

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

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

E-mail: vir12@tpu.ru

Традиционное ядерное топливо из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, имеет ряд существенных недостатков: низкая теплопроводность, короткий цикл использования, ограниченный ресурс изотопа уран-235.

Перспективным является дисперсионное ядерное топливо (ДЯТ) в виде сложных оксидных композиций (СОК), включающих оксиды делящихся металлов (уран, плутоний), равномерно распределенных в оксидной матрице, имеющей высокую теплопроводность и низкое сечение резонансного поглощения нейтронов [1].

В отличие от применяемых методов получения СОК (раздельное получение и механическое смешения оксидов металлов, золь-гель процесс и др.) плазмохимический синтез СОК из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих водные нитратные растворы и органический компонент (спирты, кетоны), имеет следующие преимущества: одностадийность, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, низкие энерго- и трудозатраты [2].

В работе представлены результаты исследований процесса плазмохимического синтеза СОК в воздушно-плазменном потоке из диспергированных растворов ВОНР, включающих ацетон и водные нитратные растворы неодима (вместо урана), самария (вместо плутония) и магния.

Подготовленные растворы ВОНР подавались (300 л/час) через диспергатор в реактор плазменного модуля на базе ВЧФ-плазмотрона, где в воздушно-плазменном потоке при температурах  $\geq 1000$  °С осуществлялся синтез СОК, затем в узле «мокрой» очистки происходило их резкое охлаждение («закалка») с образованием водных суспензий СОК, которые отстаивали, фильтровали и прокачивали в течение 20 минут при температуре 150 °С.

В ходе исследований проводились лазерная дифракция водных суспензий СОК, сканирующая электронная микроскопия, БЭТ-анализ и рентгенофазовый анализ полученных порошков СОК. Установлено, что при расходе воды на «закалку» (2,8 кг/с), частоте диспергатора (50 Гц) и различных значениях  $\alpha = \text{Sm}/(\text{Sm} + \text{Nd})$  увеличение доли MgO (5...50 %) в составе СОК «Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO» приводит:

- (при  $\alpha=0,1$ ) к снижению размера частиц СОК в водной суспензии с 13,5 до 4,3 мкм, увеличению Суд порошков СОК с 10,1 до 21,0 м<sup>2</sup>/г и снижению размера «зерен» в СОК с 79 до 38 нм;
- (при  $\alpha=0,2$ ) к снижению размера частиц СОК в водной суспензии с 12,9 до 5,3 мкм, увеличению Суд порошков СОК с 10,0 до 12,6 м<sup>2</sup>/г и снижению размера «зерен» в СОК с 79 до 63 нм;
- (при  $\alpha=0,3$ ) к снижению размера частиц СОК в водной суспензии с 6,6 до 4,7 мкм, снижению Суд порошков СОК с 15,2 до 11,9 м<sup>2</sup>/г.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Novoselov I.Yu., Karengin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.

# ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ДИСПЕРСИОННОЕ УРАН-ТОРИЕВОЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО

Тихонов А.Е., Расторгуев В.И., Каренгин А.А.

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

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

E-mail: aet13@tpu.ru

В отличие от применяемого ядерного топлива из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, имеющего низкую теплопроводность, короткий цикл использования (3-5 лет) и ограниченный ресурс изотопа уран-235, перспективным является уран-ториевое дисперсионное ядерное топливо (ДЯТ), включающее оксиды делящихся металлов (уран, торий), равномерно распределенных в оксидной матрице, имеющей высокую теплопроводность и низкое сечение резонансного поглощения нейтронов [1].

При использовании изотопа торий-232 отпадает необходимость в дорогостоящем изотопном обогащении, а цикл использования такого ЯТ может быть доведен до 10-15 лет. При этом прогнозных запасов тория в земной коре в 3-5 раз больше, чем урана, а использование топлива из сложных оксидных композиций (СОК) на основе урана и тория даст возможность создания сверхмалых (до 10 МВт) и малых (до 100 МВт) энергетических установок для использования в удаленных и труднодоступных регионах, на рудниках и карьерах [2]. Однако у такого ЯТ остается существенный недостаток – низкая теплопроводность.

Плазмохимический синтез сложных оксидных композиций (СОК) из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны), в отличие от применяемых методов получения СОК путем раздельного получения и механического смешения оксидов металлов, имеет следующие достоинства: одностадийность, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, низкие энергозатраты [2].

В работе представлены результаты исследований процесса плазмохимического синтеза СОК из диспергированных растворов ВОНР, включающих ацетон и смешанные водные нитратные растворы неодама (вместо урана), церия (вместо тория) и магния. Подготовленные растворы ВОНР подавались (300 л/ч) через диспергатор в реактор плазменного модуля на базе ВЧФ-плазмотрона, где в воздушно-плазменном потоке при температурах  $\geq 1000$  °С осуществлялся синтез СОК, далее в узле «мокрой» очистки происходило их резкое охлаждение («закалка») с образованием водных суспензий СОК, которые отстаивали, фильтровали и прокачивали в течение 20 минут при температуре 150 °С.

В ходе исследований проводились лазерная дифракция водных суспензий СОК, сканирующая электронная микроскопия, БЭТ-анализ и рентгенофазовый анализ полученных порошков.

Установлено, что при расходе воды на «закалку» (2,8 кг/с), частоте диспергатора (50 Гц) и различных значениях  $\alpha = \text{Nd}/(\text{Nd} + \text{Ce})$  увеличение доли MgO (10...30 %) в составе СОК «Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO» приводит: к снижению размера частиц водных суспензий СОК с 9,8 до 9,3 мкм (при  $\alpha = 0,5$ ); с 8,9 мкм до 6,8 мкм (при  $\alpha = 0,6$ ) и с 6,6 мкм до 4,7 мкм (при  $\alpha = 0,7$ ). При этом, размер «зерен» в частицах СОК не превышает 70 нм, что подтверждает плазмохимический синтез наноразмерных СОК из растворов ВОНР.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Novoselov I.Yu., Karengin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «ОКСИД САМАРИЯ–ОКСИД ЦЕРИЯ–ОКСИД МАГНИЯ»

Басс В.И., Иванов К.С., Зубов В.В.

Научный руководитель: Каренгин А.Г., к.ф.-м.н., доцент  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: vadim2@tpu.ru

Общими недостатками применяемых методов получения сложных оксидных композиций (золь-гель процесс, раздельное получение и механическое смешение) являются: многостадийность, неравномерное распределение фаз, необходимость использования большого количества химических реагентов, высокие энерго- и трудозатраты.

К несомненным преимуществам применения плазмы для плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций (СОК) из диспергированных смешанных водных нитратных растворов (ВНР) следует отнести: одностадийность; высокую скорость; возможность активно влиять на размер и морфологию частиц; компактность технологического оборудования [2]. Однако плазменная переработка только ВНР требует значительных энергозатрат (до 4 МВт·час/т) и не позволяет получать в одну стадию СОК требуемого стехиометрического состава без дополнительного водородного восстановления [1].

Применение плазмохимического синтеза СОК в воздушно-плазменном потоке из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих ВНР и органический компонент (спирты, кетоны и др.), и имеющих низшую теплотворную способность не менее 8,4 МДж/кг, приведет к существенному снижению энергозатрат на их переработку (до 0,1 МВт·час/т), позволит значительно увеличить производительность плазменных установок и обеспечит условия в плазмохимическом реакторе для прямого синтеза в воздушной плазме наноразмерных СОК, имеющих гомогенное распределение фаз, высокую теплопроводность и требуемый стехиометрический состав без дополнительного водородного восстановления [2].

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса плазмохимического синтеза СОК «оксид самария–оксид церия–оксид магния» из растворов ВОНР, включающих водные нитратные растворы самария, церия, магния и органический компонент (этанол, ацетон), а также закономерности влияния состава растворов ВОНР и режимов их переработки, обеспечивающих в воздушной плазме прямой синтез наноразмерных композиций «оксид самария–оксид церия–оксид магния».

В ходе исследований проводились лазерная дифракция водных суспензий СОК, сканирующая электронная микроскопия, БЭТ-анализ и рентгенофазовый анализ полученных порошков. Установлено, что при расходе воды на «закалку» (2,8 кг/с), частоте диспергатора (50 Гц) и различных значениях  $\alpha = \text{Sm}/(\text{Sm}+\text{Nd})$  увеличение доли MgO (10...30 %) в составе СОК « $\text{Sm}_2\text{O}_3\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ » приводит: к снижению размера частиц водных суспензий СОК с 9,4 до 7,4 мкм (при  $\alpha = 0,1$ ); с 12,9 до 5,3 мкм (при  $\alpha = 0,2$ ) и с 6,6 до 4,7 мкм (при  $\alpha = 0,3$ ). При этом размер «зерен» в частицах СОК не превышает 90 нм, что подтверждает плазмохимический синтез наноразмерных СОК из растворов ВОНР.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза наноразмерных СОК из диспергированных растворов ВОНР редкоземельных, редких, рассеянных и делящихся металлов.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туманов Ю.Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. – М.: Физматлит, 2003. – 759 с.
2. Novoselov I.Yu., Karengin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ИЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БАССЕЙНОВ-ХРАНИЛИЩ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Шестакова Л.А.

Научный руководитель: Каренгин А.Г., к.ф.-м.н., доцент  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: shestakova\_lyu@mail.ru

В бассейнах-хранилищах предприятий ЯТЦ накоплены жидкие радиоактивные отходы с иловыми отложениями (ИЛО), основными компонентами которых являются: (3-17) % Fe, (2,8-8,5) % Si, (0,2-3,2) % Ca, (1,0-2,8) % Mg, (0,7-1,9) % Na, (0,1-0,9) % P, остальное вода [1].

Для переработки ИЛО используются химические, сорбционные, электрохимические способы и механическая классификация с отделением фракций с наибольшим содержанием радионуклидов [2]. Для стабилизации ИЛО и их перевода в устойчивые формы, препятствующие миграции радионуклидов, используются различные способы высокотемпературной переработки с получением керамических и



стеклоподобных матриц [2,3]. Их недостатками являются низкая эффективность, многостадийность и высокая стоимость.

Существенное снижение энергозатрат может быть достигнуто при плазмохимической переработке ИЛО в виде оптимальных по составу илоорганических суспензий (ИЛОС), имеющих адиабатическую температуру горения не менее 1200°C [4].

На рис. 1 показано влияние содержания ИЛО и дизельного топлива (ДТ) на адиабатическую температуру горения ( $T_{ад}$ ) различных по составу илоорганических суспензий.

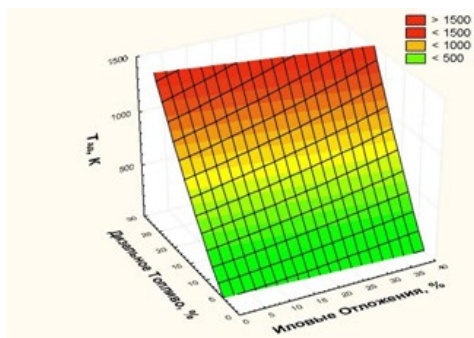


Рис. 1. Влияние содержания ИЛО и ДТ на адиабатическую температуру горения илоорганических суспензий

Из полученной зависимости определен состав илоорганической суспензии (ИЛОС-1) с максимальным содержанием ИЛО (40 %), имеющей  $T_{ад} \approx 1200^\circ\text{C}$ : (15,5 % ДТ : 44,5 % Вода : 40 % ИЛО). Для определения оптимальных условий процесса проведены расчёты равновесных составов газообразных и конденсированных продуктов плазмохимической переработки композиции ИЛОС-1. Расчёты проведены при атмосферном давлении (0,1 МПа), широком диапазоне температур (300-4000) К и для различных массовых долей воздушного плазменного теплоносителя (10-90) %. Для расчётов использовалась лицензионная программа «TERRA».

В результате проведенных расчетов показано, что при температурах до 1500 К и массовой доле воздуха 70 % и выше основными продуктами в конденсированной фазе являются простые и сложные оксиды металлов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и др.) включая магнитный оксид железа  $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{c})$ , что позволит применить магнитное осаждение для извлечения этих продуктов.

По результатам проведенных исследований могут быть рекомендованы для практической реализации следующие условия: состав композиции ИЛОС-1 (15,5 % ДТ : 44,5 % Вода : 40 % ИЛО); массовое отношение фаз (70 % воздух : 18 % ИЛОС-1); температура (1500±200) К.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орешкин Е.А., Каренгин А.Г., Шаманин И.В. // IV Международная школа-конференция молодых атомщиков Сибири: Сборник тезисов докладов. – Томск: ТПУ, 2013. С. 18.
2. Шингарев Н.Э. и др. Способы обращения с илами водоемов-хранилищ радиоактивных отходов. // Экология и промышленность России. 2000. № 3. С. 43-45.
3. Соболев И.А., Хомчик Л.М. Обезвреживание радиоактивных отходов на централизованных пунктах. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 75-78.

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ДИСПЕРСИОННОЕ УРАН-ТОРИЕВОЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО

Хоцеловский Н.С., Каренгин А.А., Побережников А.Д.

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

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

E-mail: nsh4@tpu.ru

Приоритетным направлением дальнейшего развития ядерной энергетики в России является создание АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, использующих уран-плутониевое дисперсионное ядерное топливо (ДЯТ) в виде сложных оксидных композиций (СОК), включающих оксиды делящихся металлов (уран, плутоний) распределенных в матрице с высокой теплопроводностью и низким сечением резонансного поглощения нейтронов [1].

В отличие от применяемых методов получения сложных оксидных композиций (СОК) путем раздельного получения и механического смешения оксидов металлов, плазмохимический синтез СОК из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны), имеет следующие преимущества [2]: одностадийность, гомогенное

распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, низкие энерго- и трудозатраты.

В работе представлены результаты исследований процесса плазмохимического синтеза СОК из диспергированных растворов ВОНР, включающих ацетон и смешанные водные нитратные растворы неодима (вместо урана), самария (вместо плутония) и магния.

Подготовленные растворы ВОНР подавались (300 л/час) через диспергатор в реактор плазменного модуля на базе ВЧФ-плазмотрона, где в воздушно-плазменном потоке при температурах  $\geq 10000^\circ\text{C}$  осуществлялся синтез СОК, затем в узле «мокрой» очистки происходило их резкое охлаждение («закалка») с образованием водных суспензий, которые отстаивали, фильтровали и прокачивали в течение 20 минут при температуре  $150^\circ\text{C}$ .

В ходе исследований проводились лазерная дифракция водных суспензий СОК, сканирующая электронная микроскопия, БЭТ-анализ и рентгенофазовый анализ полученных порошков.

Установлено, что при расходе воды на «закалку», частоте диспергатора (50 Гц) и различных  $\alpha = \text{Sm}/(\text{Sm}+\text{Nd})$  увеличение доли матрицы в виде  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (10...30 %) в составе СОК « $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Sm}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ » приводит:

- (при  $\alpha = 0,1$ ) к снижению размера частиц водных суспензий СОК с 12,1 мкм до 4,3 мкм, увеличению Суд порошков СОК с 5,5 до 7,8  $\text{m}^2/\text{г}$  и снижению размера «зерен» в СОК с 147 нм до 115 нм;

- (при  $\alpha = 0,3$ ) к снижению размера частиц водных суспензий СОК с 13,6 мкм до 10,2 мкм, увеличению Суд порошков СОК с 6,9 до 8,6  $\text{m}^2/\text{г}$  и снижению размера «зерен» в СОК с 118 нм до 93 нм;

Это позволяет утверждать, что плазменная переработка диспергированных растворов ВОНР в воздушно-плазменном потоке приводит к плазмохимическому синтезу наноразмерных СОК.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Novoselov I.Yu., Karegin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.

## SYNTHESIS OF OXIDE POWDERS FOR NUCLEAR FUEL IN PLASMA OF TORCH DISCHARGE

Tikhonov A.E., Novoselov I.Yu.

Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050

E-mail: aet13@tpu.ru

Ceramic nuclear fuel made of  $\text{UO}_2$  has a number of disadvantages: low thermal conductivity, high brittleness, tendency to crack, a short cycle of use, and a limited resource of the  $^{235}\text{U}$  [1]. This has caused a slowdown in the development of nuclear energy in a number of countries.

A promising today is the creation of dispersion nuclear fuel, which is characterized by the absence of contacts between particles of fissile material due to their uniform distribution in the matrix and has the following advantages: high thermal conductivity and good mechanical properties, high enough fissile material burn, high radiation resistance and strength, localization of fission products in matrix [2].

Common disadvantages of the technologies used to obtain complex oxide compositions from solutions (usually nitric-acid) are: multi-staging, high cost of processing raw materials, inhomogeneous phase distribution, the need to use much chemicals.

At the same time, the technology of synthesis of oxides in air plasma has the following advantages: one-staging, homogeneous distribution of phases with a given stoichiometric composition, the ability to actively influence the size and morphology of particles [3, 4].

It should be noted that the processing of nitric-acid solutions in plasma is quite expensive. To reduce energy consumption, it needs to add any organic component into the solutions, which, when oxidizing in the air plasma, creates additional energy, allowing to increase the consumption of the processed solution and, thus, increase the yield of the target product.

The work represents carried out thermodynamic modeling of plasmachemical synthesis of complex oxide compositions from water-organic nitrate solutions (WONS), consisting of fissile material (inclusion) and matrix. Uranium dioxide was considered as a fissile inclusion, and magnesium oxide as the matrix material, acetone were used as organic component. The proportion of fuel inclusion in the target complex oxide composition was selected within the range of 95% – 85%, the proportion of the matrix within 5% – 15%.

Based on the modeling results, the optimal WONS based on uranyl nitrate, magnesium nitrate and acetone were calculated, and the optimal modes (WONS–air ratios) of the WONS plasma treatment were calculated. It was shown that with an excess of air, non-target products ( $\text{UO}_3$ ,  $\text{U}_3\text{O}_8$ ,  $\text{U}_4\text{O}_9$ ) are formed from the initial solutions, with a deficiency of air – products of incomplete thermal decomposition of hydrocarbons in WONS (soot). It was shown that the optimal air fraction varied in the range of 69% – 71%.

The results of the studies can be used to calculate the plasmachemical synthesis of complex oxide compositions for dispersion nuclear fuel.

This work was financially supported by the Russian Science Foundation (project 18-19-00136).

#### REFERENCES

1. Skorov D.M., Bychkov Yu.F., Dashkovsky A.M. Reactor material science. – Moscow: Atomizdat, 1979. – 344 p.
2. Alexeyev S.V., Zaytsev V.A., Tolstoukhov S.S. Dispersion nuclear fuel. – Moscow: Tekhnosfera, 2015. – 248 p.
3. Kosmachev P.V., Vlasov V.A., Skripnikova N.K. // Russian Physics Journal. – 2017. – V. 60. – No 2. – P. 46–50.
4. Novoselov I.Yu., Karengin A.G., Shamanin I.V., Alyukov E.S. Plasmachemical synthesis of nanosized powders of yttria and zirconia from dispersed water-salt-organic mixtures // Polzunovskiy vestnik. – 2017. – V. 1. – No. 3. – P. 142–148.

## COMPARISON OF $Y_2O_3$ AND $ZrO_2$ SYNTHESIZED FROM WATER NITRATE SOLUTIONS AND WATER-ORGANIC NITRATE SOLUTIONS

Tikhonov A.E.

Scientific Supervisor: Novoselov I.Yu.

Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050

E-mail: aet13@tpu.ru

One of the priorities in the development of modern material science is the technology based on nanosized powders, which is due to the desire for miniaturization of products, unique properties of materials in the nanostructured state, etc.

The most common technologies for producing such nanosized oxides are laser sublimation, chemical precipitation from solutions, hydrothermal method and sol-gel technology. Each method has its advantages and disadvantages, while the choice of technology is determined by the purpose of the powder, the state of its microstructure, method performance, complexity and cost of the equipment used. The disadvantages of the methods used to obtain nanosized powders include: multi-staging, long process duration, low productivity, the need to use a large number of chemicals, non-uniform distribution of phases in the powders, and high cost.

Taking into account above, the use of low-temperature plasma is promising for obtaining nanosized metal oxide powders. The advantages of plasma-chemical synthesis from water nitrate solutions (WNS) include: one-staging, high process speed, homogeneous phase distribution with a given stoichiometric composition, the ability to actively influence the size and morphology of particles, and the compactness of technological equipment. However, plasma treatment of only WNS due to high energy costs (up to 4.0 kW·h/ g) [1] is not widely used, and it is possible to significantly reduce energy consumption and increase productivity by introducing an organic component in the composition of the initial WNS.

Firstly, the optimal compositions of water-organic nitrate solutions (WONS) based on acetone and WNS  $Y(NO_3)_3$ , as well as acetone and WNS  $ZrO(NO_3)_2$  were calculated. For this, the values of lower calorific value were determined for various mass fractions of acetone in WONS. Secondly, in order to determine the optimal modes of the process under study, the influence of the mass fraction of the air plasma coolant on the adiabatic combustion temperature of WONS was determined.

The studies were carried out using plasma module based on the high-frequency generator. For plasma treatment, WONS-1 and WONS-2 were prepared according to the optimal compositions determined for them, while the concentration of  $Y(NO_3)_3$  and  $ZrO(NO_3)_2$  salts was 97 g/100 ml of water and 57 g/100 ml of water, respectively. The prepared solutions were processed in a high-frequency torch plasma. During the plasma treatment, after liquid evaporation and crystallization of the salt, yttrium and zirconium oxides were formed as a result of thermolysis, which were quenched in centrifugal bubblers. The obtained oxide powders were sent for analysis.

To study the main parameters of the obtained powders, scanning electron microscopy, BET analysis, and X-ray phase analysis were performed. The obtained results were compared with data [3] on the parameters of yttrium and zirconium oxide powders obtained by plasma-chemical synthesis from WNS (without the addition of an organic component). From the analysis of the presented data, it follows that the powders obtained by plasma-chemical synthesis from WONS-1 and WONS-2 are comparable in a number of parameters (CSR size, specific surface area) with powders obtained by plasma-chemical synthesis from WNS solutions. However, zirconia powders obtained by plasma-chemical synthesis from a WONS-2 solution are in the tetragonal and cubic phases, and obtained from WNS in the monoclinic phase, which is explained by the use of quenching in the first case. In this case, the inclusion of the organic component in the composition of the WNS leads to an increase in powder productivity by 2.5–4 times and a decrease in energy consumption for producing 1 kg of nanosized powders by 5–8 times.

Considering the obtained results, it can be argued that the plasma-chemical synthesis of yttrium and zirconium oxides is an energy-efficient method for producing nanosized powders, which can be used to obtain oxide nanosized powders of other metals.

#### REFERENCES

1. Novoselov I.Yu., Podgornaya (Shakhmatova) O.D., Shlotgauer E.E., Karegin A.G., Kokarev G.G. Plasma utilization and magnetic separation of modeling spent nuclear fuel wastes // Russian Physics Journal. – 2014 – Vol. 57 – № 2/2. – P. 26–30 [in Russ.].

*Секция 4*

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

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ФАЗ В РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ ДЛЯ СИСТЕМ ГАЗ-ЖИДКОСТЬ

Дмитриев В.В., Видяев Д.Г.

Научный руководитель: Видяев Д.Г., д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: neversummer@tpu.ru

В наше время использование продуктов колонного разделения, например, нефтепродуктов, очень распространено, особенно это актуально для Российской Федерации, где нефтяная отрасль играет важнейшую роль в экономике. Также выделение нужных элементов с использованием колонн осуществляется и в других областях науки и техники, например, в медицине, металлургии и атомной промышленности. Например, этанол, который отделяется от различных альдегидных фракций, используется для получения бензина, керосина, а также прочих нефтяных фракций. Также на колоннах возможно разделять воздух на компоненты.

Для разделения элементов в вышеперечисленных случаях используется ректификация [1]. Для увеличения эффективности обмена компонентами необходимы проведения многочисленных исследований.

Как известно, для процесса ректификации применяются различные специальные ректификационные колонны, в которых снизу вверх движется газовая фаза, а сверху вниз – жидкая. В процессе движения происходит массообмен, при котором газовая фаза обогащается легколетучими компонентами, а жидкая фаза труднолетучими, что и позволяет выводить нужные компоненты из смеси. В каждой колонне необходимо увеличивать площадь соприкосновения фаз, так как при простом соприкосновении ректификация неэффективна, поэтому используются различные насадки, пористые структуры и т.д. [2].

Проведение натурального эксперимента по разделению элементов и их изотопов в противотоке двух фаз в колонне с заданными степенью разделения и производительностью, связано с высокими материальными и временными затратами, даже при работе колонны в стационарном режиме [3]. Поэтому с быстрым развитием вычислительной техники стали актуальны теоретические исследования, в которых используются численные методы расчета параметров обменной колонны, производимые на ЭВМ.

В данной работе проведено моделирование колонны с помощью специализированного программного обеспечения, а также смоделированы потоки проходящих фаз сквозь колонну. Для увеличения площади соприкосновения фаз использовалась развитая пористая структура. В результате проведенных расчетов получены данные по давлению, массообмену, теплообмену и другим физическим параметрам.

Полученные данные необходимы прежде всего для экономии времени и расходуемых материалов, предотвращения возможных аварий, а также для оптимизации обменного процесса.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девярых Г.Г., Еллиев Ю.Е. Введение в теорию глубокой очистки веществ. – М.: Наука, 1981. – 320 с.
2. Жаров В.Т. Физико-химические основы дистилляции и ректификации / Жаров В. Т., Серафимов Л. А. – Ленинград: Химия, 1975. – 240 с.
3. Тихомиров И.А., Видяев Д.Г., Гринюк А.А. Уравнение амальгамно-обменной колонны в стационарном режиме работы // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 2. – С. 95–97.

## ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ

Дмитриев В.В., Видяев Д.Г.

Научный руководитель: Видяев Д.Г., д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: neversummer@tpu.ru

На сегодняшний день использование ректификационных колонн весьма распространено. Благодаря ректификации добывается этанол, который используется для получения керосина, бензина и прочих нефтепродуктов. Более того процесс ректификации применяется для выделения полезных веществ в медицине, атомной промышленности и т.д. Из воздуха выделяются ценные составляющие компоненты, например, гелий. Учитывая экономические особенности России, оптимизация получения нефтепродуктов чрезвычайно важно.

В каждой ректификационной колонне в нижней части установлен нагреватель, благодаря которому жидкая фаза испаряется и превращается в газовую, а затем происходит массообмен, при этом газовая фаза обогащается легколетучими компонентами [1], а жидкая фаза труднолетучими. Движущийся из нагревателя пар имеет высокую температуру. Высокие температуры негативно влияют на материалы, из которых изготавливаются стенки колонны. В основном это различные виды стали. Материал может расширяться, что может вызвать нарушение формы колонны, понизить эффективность работы колонны и привести к поломке, которая в свою очередь ведет к аварии. Также, в результате воздействия высоких температур быстрее изнашивают материал из-за чего затраты на ремонт и обслуживание вырастают.

Для увеличения площади соприкосновения фаз и улучшения, тем самым, обмена между ними, используют специальные устройства – различные регулярные и нерегулярные насадки [2]. Они, как и материалы стенок взаимодействуют с горячими фазами из-за чего могут быть подвержены негативным термическим эффектам. Поэтому, как для материала стенок, так и для материала насадки необходим термический анализ, который позволит определить какие материалы лучше использовать и какие задавать температуры.

Провести натуральный эксперимент по движению фаз, которые будут нагревать стенки и насадки весьма затруднительно. Поэтому на сегодняшний момент актуальны теоретические исследования, в которых с помощью специализированных программных продуктов основанных на различных аналитических и численных методах производится расчет параметров обменной колонны.

В данной работе проведены результаты моделирования теплового обмена в колонне с помощью специализированного программного обеспечения. В результате были получены расчетные данные для различных видов стали и материала насадок. Были определены оптимальные материалы и температура нагревателя.

Полученные данные могут способствовать экономному использованию времени и материалов, предотвращению аварийных ситуаций и оптимизации межфазного обмена.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девярых Г. Г., Еллиев Ю. Е. Введение в теорию глубокой очистки веществ. – М.: Наука, 1981. – 320 с.
2. Тихомиров И.А., Видяев Д.Г., Гринюк А.А. Кинетика изотопного обмена и величина обменного потока между фазами // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307, № 6. – С. 81–84.

## РАЗВИТИЕ АДСОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цветков А.Д., Сукотнова В.В.

Научный руководитель: Борецкий Е.А., аспирант

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

E-mail: cvalexej@gmail.com

В настоящее время наиболее распространённые виды топлива, используемые в двигателях внутреннего сгорания, являются производными нефти и природного газа, и оказывают негативное влияние, загрязняя окружающую среду. Исходя из этого, появилась необходимость использования менее вредных источников энергии. Одним из наиболее экологически чистых энергоносителей является водород. При этом водород обладает высокой энергетической ценностью на единицу массы [1].

Одной из наиболее значимых задач, которая требует решения для распространения водородного топлива, является создание способа хранения водорода, при котором будет обеспечиваться невозможность его детонации в случае разгерметизации системы хранения. Традиционные методы хранения, используемые на сегодняшний день, имеют достаточно низкие массовые и объёмные показатели.

Существует возможность использования альтернативных способов хранения водорода. Одним из таких способов является применение углеродных материалов, которые выступают в качестве сорбентов [2, 3].

В данной работе представлены результаты обработки данных по исследованию способности углеродных материалов к сорбции водорода, а также определены наиболее оптимальные параметры увеличения адсорбционного потенциала.

В результате работы наилучшие результаты по адсорбции водорода ~6 мас. % при 77 К и давлениях до 10 МПа были получены при использовании микропористых углеродных адсорбентов. Достижение адсорбционной активности выше ~6 мас. % становится возможным при модифицировании углеродных материалов переходными металлами 8Б группы, причем наибольший эффект проявляется в присутствии осмия. Термолиз углеродных материалов с гидроксидами щелочных металлов (LiOH, NaOH или KOH) также способствует увеличению адсорбционной активности, причём гидроксид калия является наиболее эффективным реагентом для развития пористой системы в углеродном адсорбенте.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. Справ. изд. / Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов, Н.Ф. Дубовкин, Л.Н. Смирнов; Под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. М.: Химия, 1989. – 672 с.
2. Видяев Д.Г., Борецкий Е.А., Верхорубов Д.Л. Определение сорбционных свойств наноразмерных материалов // Альтернативная энергетика и экология. – 2015 – №. 23. – С. 73–77.

3. Борецкий Е.А., Видяев Д.Г., Савостиков Д.В. Аккумуляция водорода углеродсодержащими наноструктурными системами // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58., № 2-2. – С. 68–72.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ ПРИ ФАБРИКАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Борецкий Е.А.

Научный руководитель: Видяев Д.Г., д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
г.Томск, пр. Ленина, 40  
E-mail: eboretsky@mail.ru

Важным этапом при фабрикации мелкодисперсных материалов является определение оптимального давления прессования и времени выдержки пресс-порошка под статическим давлением.

В работах [1, 2] приводятся давления прессования углерода 1 МПа, 5 МПа, 20 МПа, 220 МПа. Исходя из проведенного обзора литературных источников можно говорить об отсутствии конкретных сведений по вопросу об оптимальном давлении прессования. В соответствии с этим, выбор давлений прессования осуществлялся исходя из следующих соображений:

1. при увеличении давления прессования снижается пористость образца;
2. при снижении давления прессования уменьшается прочность таблетки;
3. при выборе величины давления необходимо учитывать возможности прессы.

Таким образом, для проведения тестового эксперимента были выбраны следующие величины давлений: 10, 20, 40, 60 МПа при времени выдержки: 5, 10, 20, 30 мин.

С целью определения оптимального давления прессования был проведен тестовый эксперимент, в ходе которого была изготовлена экспериментальная партия таблеток на основе технического углерода.

Перед фабрикацией пресс-порошка была определена его насыпная плотность и плотность после утряски [3]. Объем измерялся с помощью стеклянного мерного цилиндра объемом 10 см<sup>3</sup> и площадью поперечного сечения 1 см<sup>2</sup>. Масса порошка определялась электронными весами ВЛТЭ-150.

По результатам измерений средняя насыпная плотность составила 0,406 г/см<sup>3</sup>, а средняя плотность после утряски – 0,526 г/см<sup>3</sup>, относительное изменение объема составило 22,9 %. Изготовление углеродных таблеток производилось путем статического одностороннего прессования порошка в пресс-форме.

В ходе тестового эксперимента определялись масса, высота, объем и плотность получившихся таблеток, а также их органолептические свойства, такие как внешний вид таблетки, наличие дефектов (сколов и трещин).

По результатам тестового эксперимента для дальнейшей работы были выбраны следующие условия: по давлению – 20 МПа, 40 МПа, 60 МПа; по времени выдержки – 10 минут. Образец изготовленных таблеток представлен на рис. 1.



Рис. 1. Углеродная таблетка, изготовленная при давлении прессования 60 МПа, время выдержки – 10 минут

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Искусственный графит / Островский В.С., Виргильев Ю.С., Костиков В.И., Шипков Н.Н. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
2. Preparation and characterization of carbon nanotube reinforced silicon nitride composites / Cs. Balazsi, Z. Kónya, F. Wébera, L.P. Biro, P. Arato // Materials Science and Engineering: C. – 2003. – Vol.23, №6-8. – P.1133-1137.
3. ГОСТ 25279-93. Порошки металлические. Определение плотности после утряски. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 10 с.

## **РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА НАГРЕВА ОБРАЗЦОВ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА, ПОДВЕРЖЕННОГО ФАБРИКАЦИИ**

Борецкий Е.А.



Научный руководитель: Видяев Д.Г., д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: eboretsky@mail.ru

Для изучения влияния температуры на свойства углеродных таблеток [1, 2] была разработана технологическая схема нагрева образцов, представленная на рис. 1.



Рис. 1. Схема нагрева образцов (обозначения по тексту)

Процесс нагрева осуществлялся следующим образом: спрессованные образцы помещались в трубчатую печь 5 и, для удаления основной части летучих примесей, проводилась откачка рабочего объема печи с помощью вакуумного насоса 3. По завершении откачки в систему подавался аргон из баллона 1, расход газа регулировался ротаметром с игольчатым клапаном 2. Расход газа измерялся с помощью газгольдера 6. Используя манометр 4, осуществлялся контроль давления в системе.

На рис. 2 представлен график нагрева образцов углерода до 500 °С с темпом 2 °С/мин и 3 °С/мин.

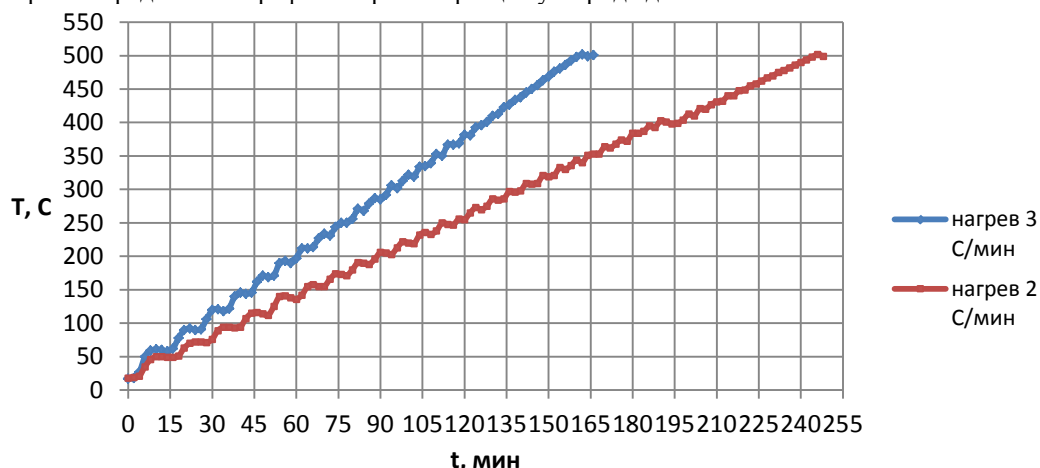


Рис. 2. График нагрева образцов углерода до 500 °С с различными темпами

По результатам измерений параметров образцов подверженных нагреву можно сделать ряд выводов:

- массы таблеток уменьшается в среднем на 3 %;
- максимальное снижение массы наблюдается у образцов, изготовленных при давлении прессования 10 МПа;
- при увеличении плотности образца величина изменения его массы снижается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Видяев Д.Г., Борецкий Е.А., Верхорубов Д.Л. Определение сорбционных свойств наноразмерных материалов // Альтернативная энергетика и экология. - 2015 - №. 23. - С. 73-77.
2. Борецкий Е.А., Видяев Д.Г., Савостиков Д.В. Аккумуляция водорода углеродсодержащими наноструктурными системами // Изв. высш. учеб. заведений. Физика. – 2015. – Т. 58., № 2-2. – С. 68–72.

## УЛУЧШЕНИЕ СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Акимов В.Н., Сукотнова В.В.

Научный руководитель: Борецкий Е.А., аспирант

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

E-mail: vna5@tpu.ru

На сегодняшний день, из-за бурного промышленного развития, сильно возросла потребность в энергоносителях. Большинство основных видов топлив таких как бензин, газ пропан, дизельное топливо

и т. д., наносят вред окружающей среде. И встает вопрос о применении экологически безопасных источников энергии, к таким можно отнести водород.

Водород является перспективным экологически чистым энергоносителем, так как в результате сгорания в чистом кислороде продуктами будут – вода и высокотемпературное тепло. Также водород обладает рядом преимуществ: низкая молекулярная масса, высокое энергосодержание и неограниченные запасы, так как его можно добывать из воды, а удельная энергия сгорания водорода в 3 раза выше, чем у бензина [1].

Водород является высоко химически активным и взрывоопасным газом, это накладывает ряд ограничений на условия его хранения и на используемые при этом материалы. Современные способы хранения, такие как сжатие, сжижение водорода или закачка в гидриды металлов имеют ряд недостатков: низкое объемное содержание, большие энергозатраты, высокая стоимость.

Возможным решением проблемы может стать использование углеродных сорбентов, в качестве материалов для хранения водорода. Так как они имеют достаточно развитую сорбционную поверхность и относительно малую стоимость.

В последнее время появился целый класс новых углеродных наносорбентов – так называемые синтетические нанопористые угли, имеющие высокие удельные объем и поверхность сорбционных пор. Эти материалы по своим сорбционным характеристикам не только не уступают таким известным углеродным наноматериалам как фуллерит, углеродные нанотрубки и графен, но и по некоторым параметрам существенно их превосходят [2-4]. В данной работе приведены результаты исследования данных по обработке холодной плазмой углеродных наноструктур для сорбции водорода.

В результате работы выявлено влияние на сорбцию водорода обработки холодной плазмой углеродных наноструктур. Обработка плазменным разрядом в атмосфере водорода увеличивает в 1,65 раза сорбционную способность СКН (сферический карбонит насыщенный) по отношению к физически сорбируемому водороду. Также выявлено, что в результате обработки СКН плазменным разрядом хемосорбция водорода составляет 0,36 масс. %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузык Б. Альтернатива, которой нельзя не воспользоваться // Мировая энергетика. – 2007. – № 10 (46). – С. 17–19.
2. Видяев Д.Г., Борецкий Е.А., Верхорубов Д.Л. Определение сорбционных свойств наноразмерных материалов // Альтернативная энергетика и экология. – 2015 – №. 23. – С. 73–77.
3. Борецкий Е.А., Видяев Д.Г., Савостиков Д.В. Аккумуляция водорода углеродсодержащими наноструктурными системами // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58., № 2-2. – С. 68–72.
4. Фенелонов В.Б. Пористый углерод. – Новосибирск: Ин-т катализа СО РАН, 1995.– 518 с.

## ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛЬФРАМА-186 ИЗ ЕГО ГЕКСАФТОРИДА

Гусев Н.В.

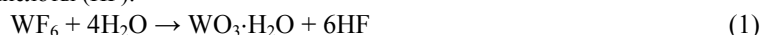
Научный руководитель: Егоров Н.Б., к.х.н., доцент

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

Email: egorov@tpu.ru

Природный вольфрам состоит из смеси пяти изотопов ( $^{180}\text{W}$ ,  $^{182}\text{W}$ ,  $^{183}\text{W}$ ,  $^{184}\text{W}$ ,  $^{186}\text{W}$ ). Они используются для исследования материалов методом ЯГР в металлургии, а также для получения радиоизотопа  $^{181}\text{W}$ , который применяется для изготовления источников рентгенофлуоресцентного анализа руд и комплектации геофизических приборов. Некоторые изотопы вольфрама используются для разработок методов анализа руд цветных металлов в естественном залегании, а также для изучения структуры поверхности и физико-химических процессов, происходящих на поверхности при адсорбции различных газов. В свою очередь,  $^{186}\text{W}$  используется для получения радиоизотопа  $^{188}\text{W}$ , являющегося генератором медицинского радиоизотопа  $^{188}\text{Re}$  [1]. Стабильные изотопы вольфрама используются в основном в металлической форме или в виде его триоксида ( $\text{WO}_3$ ). Разделение изотопов вольфрама осуществляется газодиффузионным методом, а рабочим веществом при этом является гексафторид вольфрама ( $\text{WF}_6$ ). Целью данной работы являлось разработка способа получения металлического  $^{186}\text{W}$  из его гексафторида, обогащенного по  $^{186}\text{W}$ .

Известный прямой способ получения металлического вольфрама при восстановлении газообразного гексафторида вольфрама водородом [2] для переработки изотопно-обогащенного  $\text{WF}_6$  оказался не совсем приемлемым вследствие необходимости использования нескольких реакторов восстановления, что приводило к размазыванию изотопно-обогащенного продукта. Поэтому для перевода из газообразного соединения вольфрама в твердые его соединения использовали реакцию гидролиза [3] в присутствии аммиака, который добавляли для нейтрализации образующейся плавиковой кислоты (HF):



В реактор объемом на 2 литра помещали 40 мл смеси водного раствора  $\text{NH}_4\text{OH}$ . Смесь замораживали жидким азотом и переконденсировали отмеренное количество  $\text{WF}_6$  в реактор. В процессе размораживания реактора протекала реакция 1 с выделением тепла. Образующиеся продукты имели желтую и белую окраску и с помощью

ИК-спектроскопии были определены как модификации вольфрамовой кислоты. Реакция их образования в реакторе протекала ~2 мин. Полученную вольфрамовую кислоту отфильтровывали и для ее очистки растворяли в водном растворе аммиака. Далее полученный раствор упаривали и полученные кристаллы паравольфрамата аммония отфильтровывали. Порошок паравольфрамата аммония обрабатывали концентрированной соляной кислотой при нагревании с получением желтой модификации WO<sub>3</sub>. WO<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O сушили и использовали ее для получения металлического вольфрама. В основе большинства методов промышленного получения вольфрама лежит восстановление металла из WO<sub>3</sub> или из вольфрамовой кислоты. На первой стадии получают исходные вещества, и далее восстанавливают их при помощи водорода до чистого металла в интервале температур от 750 до 1000 °С в избытке водорода. Процесс восстановления описывается общим уравнением:



При получении вольфрамового порошка водородным способом используют специальные методы, позволяющие контролировать его химический состав, размер и форму зерен, гранулометрический состав. Например, быстрое нарастание температуры, малая скорость подачи водорода способствуют увеличению размера частиц вольфрамового порошка [4].

Кроме этого можно для получения вольфрама из WO<sub>3</sub> использовать реакцию его восстановления углеродом в интервале температур от 1300 до 1400 °С:



Однако, процесс восстановления WO<sub>3</sub> углеродом протекает при более высокой температуре и при этом частично образуются карбиды вольфрама, что делает этот способ получения изотопного вольфрама в виде металла менее пригодным. В связи с этим при разработке способа получения изотопно-обогащенного металлического вольфрама использовали водородный метод восстановления.

По разработанному способу был получен порошок металлического <sup>186</sup>W с химической чистотой выше 99,9 % и размерами частиц ~1,5 мкм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов В.Ю. Изотопы: свойства, получение, применение. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 728 с.
2. Красовский А.И., Чужко Р.К., Трегулов В.Р., Балаховский О.А. Фторидный процесс получения вольфрама. – М.: Наука, 1981. – 261 с.
3. Агте К., Вацек И. Вольфрам и молибден. – М.: Энергия, 1964. – 443 с.
4. Зеликман А.Н., Никитина Л.С. Вольфрам. – М.: Metallurgia, 1978. – 272 с.

## FEATURES OF THE FORMATION OF RADIATION IN A NEW-GENERATION OF FUEL WITH A COMPLEX INTERNAL HETEROGENEOUS STRUCTURE

Xu Y.B., Bedenko S.V, Shamanin I.V.

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

E-mail: syuyuybin@tpu.ru

Fuel and structural materials of existing reactor systems (reactors) and innovative reactor plants operate in extreme conditions. These extreme conditions include higher operating temperatures, increased (extreme) burn up, exposure to aggressive media, etc. For the long-term trouble-free and efficient operation of the reactor, the fuel must have good thermal conductivity, radiation and thermal stability. To increase thermal conductivity, radiation and thermal stability, the fuel is modified by adding various homogeneous compounds [1] and heterogeneous inclusions [1, 2]. However, these additives affect the neutron component of the radiation characteristics of irradiated fuel [2]. So far, little research has been done in scientific journals on the effects of various additives on the neutron background of fresh fuels and irradiated fuels, or even on fuels containing heterogeneous inclusions. The meaning of the work is that the fuel is modified to improve its thermal conductivity, thermal and radiation resistance, while they do not consider the fact that such fuel requires special handling after its operation. In the work authors, the applicant will use MCNPX for numerical experiments couple with other software (Sources-Serpent), to study the characteristics and mechanisms of the formation of residual neutron radiation on fuels in a LWR reactor with a complex heterogeneous internal structure. The scientific problem studied in this work is aimed at developing procedures for handling new-generation irradiated fuel during transportation and “dry” long-term storage (See Fig. 1, [3]).

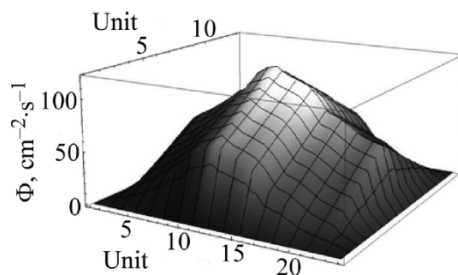


Fig. 1. Results of calculations  $\Phi(E,r)$  of «dry» storage systems with modified fuel

In addition, since additives affect the components of the fuel, the reprocessing of spent nuclear fuel needs to be changed accordingly. But compare with the traditional open fuel cycle with direct disposal, the reprocessing-recycle cost is more expensive. How to improve the reprocessing of fuel, reduce the disposal amount of high-level radioactive waste and reduce its costs are also considered and studied.

#### REFERENCES

1. Tran H.-N., et al. Neutronics design of VVER-1000 fuel assembly with burnable poison particles // Nuclear Engineering and Technology. – 2019. – V. 51(7). – P. 1729-1737.
2. Bedenko S.V., et al. A fuel for generation IV nuclear energy system: Isotopic composition and radiation characteristics // Applied Radiation and Isotopes. – 2019. – V. 147. – P. 189-196.
3. Plevaka, et al. Neutron-physical studies of dry storage systems of promising fuel compositions // Bulletin of the Lebedev Physics Institute – 2015. – T. – 42 (8). - P. 240-243.

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ДРЕЙФА РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Побережников А.Д., Ушаков И.А., Тимченко С.Н., Зукау В.В., Кузьменко А.С.

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

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

E-mail: mamay2008@bk.ru

Явление селективного дрейфа ионов щелочных металлов под действием внешнего асимметричного электромагнитного поля еще недостаточно изучено, и не нашло значительного практического применения. Основной причиной этого является то, что обнаруженное явление недостаточно изучено [1]. В данной работе проведено описание аппаратно-программного комплекса для автоматизации обработки экспериментов по изучению явления селективного дрейфа ионов под действием внешнего “асимметричного” электрического поля на движущийся раствор [2].

Цель работы – разработка автоматизированной системы хранения экспериментальных данных процесса селективного дрейфа радиоактивных изотопов.

Проведено описание экспериментального стенда для проведения изучения явления электроиндуцированного селективного дрейфа ионов, инфологическая модель базы данных (БД), протокол передачи экспериментальных данных в БД.

В работе рассматривается архитектура программного комплекса (рис. 1.), обеспечивающего сбор, структурирование и хранение экспериментальных данных с исследовательских установок. В состав комплекса входят: программная система сбора данных, клиентское приложение, база данных, система управления базой данных и программа удаленного доступа к данным.

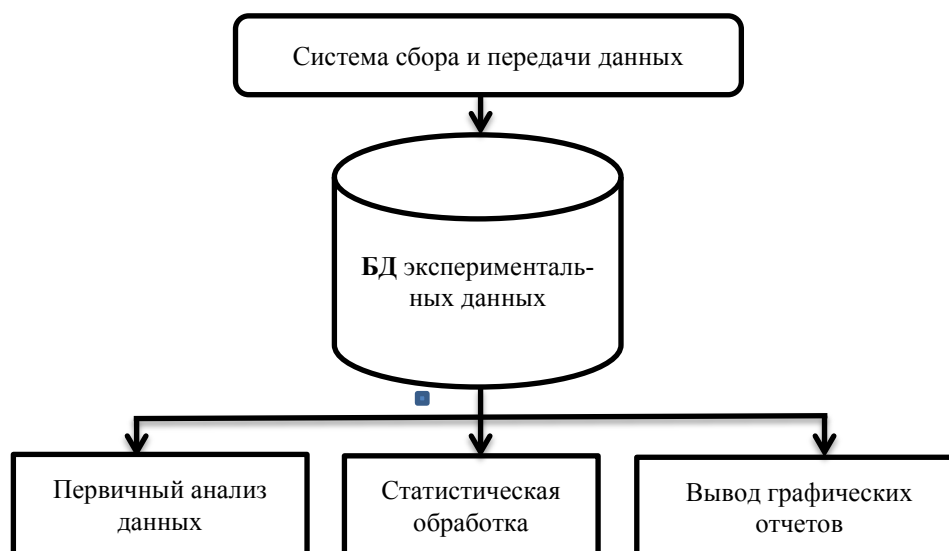


Рис. 1. Программный комплекс сбора, обработки и хранения данных

Данная система обеспечивает высокую скорость обработки экспериментальных данных. Функционирование программного комплекса с первичными преобразователями и устройствами связи с объектами разного типа обеспечивается путем программных библиотек и драйверов устройств. Для передачи экспериментальных данных используется унифицированный транспортный файл. Разработанный программный комплекс позволяет экспериментатору сохранять все экспериментальные

данные, основные характеристики и параметры, видеoinформацию в одном месте с тем, чтобы централизованно хранить и обеспечивать быстрый доступ к информации и ее обработку: сортировка, поиск, статистический анализ и т.д.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Shamanin, M. A. Kazaryan, S. N. Timchenko, I. A. Ushakov Mechanistic models of the ion-solvation shell system// Bulletin of the Lebedev Physics Institute -2017 – vol. 44 -iss. 9. – pp. 254–257.
2. Li Hongda , Kazaryan M. A. , Shamanin I. V. , Timchenko S. N. , Ushakov I. A. Electroinduced drift of solvated ions in salt solution of Ce and Ni // Journal of Chemical Physics. - 2018 - Vol. 130 - №. 8, Article number 111. - pp. 1-6.

### **РАСЧЕТ КАСКАДОВ ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ СХемой СОЕДИНЕНИЯ СТУПЕНЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ SIMULINK**

Бутов В.Г., Гольцман А.И., Тимченко С.Н.

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

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

E-mail: timsn@tpu.ru

В современном разделительном производстве используются сложные многокаскадные технологические схемы, состоящие из нескольких разделительных каскадов соединённых между собой линиями межкаскадных коммуникаций. Каждый каскад, в свою очередь, состоит из разделительных ступеней соединённых, в общем случае, по противоточной симметричной схеме, в которой поток отбора ступени подается на питание следующей ступени, а поток отвала подается на питание предыдущей ступени [1]. И в данном производстве часто требуются переходы с одной вида продукции на другую. В связи с этим при переходе обогащения с одного вида продукции на другой меняется большое количество факторов: сырьё, необходимая степень обогащения и т. д. [2]. Приходится пересчитывать параметры каскадов при каждом переходе. Каждый такой пересчёт требует длительной настройки. Таким образом, современная технологическая схема разделительного производства, в общем случае, представляет собой набор разделительных ступеней соединённых между собой межступенными и межкаскадными коммуникациями произвольным образом. Расчет параметров подобных систем классическими итерационными методами достаточно сложен. В некоторых случаях, при значительных изменениях в технологической схеме, при расчете требуется внесение существенных изменений не только в начальные данные, но и в сам алгоритм расчета, что требует определенного времени и квалификации от пользователя программой по расчету параметров технологической схемы разделительного производства.

Поэтому важно иметь удобный инструмент для быстрого и удобного расчёта каскада. Одним из таких инструментов является среда имитационного моделирования Simulink.

Одно из главных преимуществ Simulink заключается в том, что путём перетаскивания и соединения блоков из библиотеки можно смоделировать ступень, и затем строить и рассчитывать каскады произвольной формы путём дублирования и соединения ступеней.

Таким образом, цель работы заключается в разработке Simulink-модели для расчёта основных параметров разделительного каскада бинарной изотопной смеси.

На основе классических итерационных методов расчета параметров разделительного каскада была разработана Simulink-модель для расчёта основных параметров разделительного каскада бинарной изотопной смеси, в которой можно выполнить расчёт автоматически, соединив типовые блоки ступеней и задания параметров в них. Проведено моделирование ситуации по переносу точек подачи питания.

Результаты расчетов хорошо согласуются с результатами, полученными другим автором. Предложенная модель позволяет осуществлять расчет технологической схемы произвольной структуры, что делает данную модель интересной для использования на предприятиях государственной корпорации «РОСАТОМ».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неклюдов А.А., Бутов В.Г., Тимченко С.Н. Использование теории графов для расчета параметров разделительного каскада, Альтернативная энергетика и экология(ISJAEЕ).2015;(23):40-44. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.23.005>
2. Орлов А.А., Тимченко С.Н., Сидоренко В.С. Математические модели нестационарных гидравлических процессов используемые в компьютерном тренажере разделительных производств по обогащению изотопов урана, Перспективные материалы. 2013. № 14. С. 83-86

### **PROSPECTS FOR ISOTOPE MATERIALS SCIENCE**

Plekhanov V. G.

Head of Fonoriton Sci. Lab., Garon Ltd, Tallinn, Estonia

E-mail: vgplekhanov@gmail com

Isotope shift (of spectral lines) can be divided into two classes, that caused by the mass effect and that resulting from the field effect. The mass effect consists of two parts, normal and specific, and results from the nucleus having a finite mass. The normal mass effect can be calculated exactly, while the specific mass effect present in spectra of atoms with more than one electron is very difficult to calculate precisely. Both of these effects decrease with increasing  $Z$ . This is probably the most important consequence of isotope shift studies.

In the very light elements the mass effect dominates and can account qualitatively for the observed shifts. In the heaviest elements the mass effect is negligible and the field effect can roughly account for the observed shift. In the element of intermediate mass the two effects are comparable. As a result, the shifts observed are small because the mass and field effects within the levels are often in such a direction as to oppose one another.

Since the radius decreases by 0.01 fm in going from  $^{40}\text{Ca}$  to  $^{48}\text{Ca}$ , it means that the addition of neutrons to calcium isotopes reduces the size of the charge distribution of the same 20 protons when the neutron number is increased from 20 to 28. If we take the simple view that charges were distributed eventually throughout the nuclear volume, the charge radius should have increased by 6% based on the simple  $R = r_0 A^{1/3}$  relation. This is found to be true in the case of  $^{48}\text{Ti}$ , a nucleus with two more protons and six more neutrons than  $^{40}\text{Ca}$ . There are two possible explanations for the decrease in the charge radius with increasing neutron number among even calcium isotopes. The first is that addition of neutrons makes the protons more tightly bound and, hence, the charge radius is smaller. The interpretation of atomic isotope shifts relies partly on the knowledge of nuclear structure. Conversely it can provide some information on the structure of nuclei. This relation between the two fields has been for many years the main reason for the interest in isotope shifts of optical (electronic) transitions. The first atomic model assumed that the atoms of all elements are put together out of hydrogen atoms. As a heuristic principle this hypothesis finally led to a scheme for ordering the elements based on their chemical properties, the periodic system. The present report is a comprehensive introduction to the main ideas and techniques of the field of isotopic materials science. The subject matter supports a probable interplay of experiment, theory, and application (traditional and modern). This thesis is underlining that the isotopic technology is a next step in the nanotechnology. I hope to give sufficient references to published work so that the interested reader can easily find the primary literature sources to this rapidly expanding field of solid-state physics. The present thesis is devoted to a description of the fundamentals and different applications of the isotopic materials science.

Modern physics distinguishes three fundamental properties of atomic nuclei: mass, spin (and related magnetic moment), volume (surrounding field strength), which are the source of isotope effect. The stable elementary particles (electrons, protons, and neutrons) have intrinsic properties. Some of these properties such as mass and electrical charge are the same for macroscopic objects. Some are purely quantum mechanical and have no macroscopic analog. Spin is an intrinsic angular momentum associated with elementary particles. The spin angular momentum of an electron, measured along any particular direction, can only take on the values  $\hbar/2$  or  $-\hbar/2$ . The nuclear magnetic moment associates with nuclear spin and produces the magnetic interaction with its environment. The ability to manipulate and control electron and/or nucleus spin in semiconductor devices provides a new route to expand the capabilities of inorganic semiconductor-based electronics and to design innovative devices with potential application in quantum computing. One of the major challenges toward these objectives is to develop semiconductor-based systems and architectures in which the spatial distribution of spins and their properties can be controlled. For instance, to eliminate electron spin decoherence resulting from hyperfine interaction due to nuclear spin background, isotopically controlled nuclear-spin-depleted devices are needed. The control of the spatial distribution of isotopes with nuclear spins is a prerequisite to implement the quantum bits or qubits. Therefore, stable semiconductor isotopes are important elements in the development of solid-state quantum information. At the present time spintronics refer to spin electronics, the phenomena of spin-polarized transport in metals and semiconductors. The study of spin phenomena in solids characterizes electrical (field-effect transistor), optical and magnetic properties of solids due to the presence of equilibrium and nonequilibrium spin populations, as well as spin dynamics. These fundamental aspects of spintronics give us important insights about the nature of spin interaction, hyperfine, or spin exchange couplings - in solids.

My intention has been to present a report on isotopic materials science that starts with the physics of isotope low-dimensional materials and quantum heterostructures and would build up to the treatment of those new electronic, transport, and optical properties which arise as a consequence of both energy quantization of electrons and phonons in potential wells and the reduced dimensionality of nanostructures. Once the basic concepts of quantum nanostructures are presented in a unified scheme, the last chapter of my textbook deals with the applications of isotopic materials science in nanoelectronic and optoelectronics [1].

#### REFERENCES

1. Plekhanov V.G. Introduction to Isotopic Materials Science. Springer Series in Mat.Sci., 2018. - Vol. 248. - 285 p.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ТИТАНА ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Шикерун К. Т.

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

На данный момент одним из наиболее активно развивающихся направлений изготовления деталей ГТД (Газотурбинных двигателей) сложной конфигурации из титановых сплавов являются аддитивные технологии. Для изготовления деталей методами 3д-печати в качестве расходного материала преимущественно применяются порошки с необходимыми параметрами: химический и изотопный состав, размеры и сферическая форма частиц. Необходимые размеры частиц и сферическую форму порошков титановых сплавов получают при помощи разнообразных технологий атомизации, которые основаны на процессах распыления металла из расплавленной титановой заготовки. Одним из основных сдерживающих факторов промышленного развития АМ технологий является высокая стоимость и ограниченные объемы производства расходных материалов - качественных порошков титановых сплавов. Ведь необходимый химический и изотопный состав, стабильность механических свойств, в применяемых в настоящее время порошках титановых сплавов, достигается за счет использования для распыления порошков заготовки высокого качества. Другими важными показателями порошков титановых сплавов, применяемых в АМ технологиях, является их фракционный состав и форма. Порошки титана представляют собой частицы сплава титана сферической формы. Такой гранулометрический состав и форма порошков обусловлены необходимостью компактно укладываться в определенный объем и требованиями по «текучести» порошковых композиций в системах подачи материала.

Таким образом, вопросы, связанные с расходными материалами для аддитивных технологий, требуют отдельного рассмотрения. Поэтому актуальны исследования в сфере получения легированных порошков титановых сплавов, а именно альтернативный метод получения титановых порошковых материалов с несферической формой частиц, полученных путем дробления титана губчатого до необходимых фракций.

В данной работе рассмотрен способ дезинтегрирования или дробление легированного губчатого титана при помощи термохимического охрупчивания посредством водорода. Для этого на конструктивно модернизированной установке гидрирования [1] отработаны режимы насыщения водородом легированного титана губчатого и последующих процессов дробления, отсева и дегидрирования.

В результате получены HDH порошки легированного титана (Ti-Mo-Al-V-Zr), химический состав которых по всем элементам соответствует марочному сплаву BT20. Форма полученных порошков является несферической. Частицы порошка имеют угловатую форму, в связи с чем обладают невысокой текучестью [1]. Однако, частицы угловатой формы могут обеспечить меньшую пористость порошковых изделий, так как процесс печати подразумевает переплавление порошков, поэтому их форма не влияет на геометрию конечного изделия.

В результате можно сделать следующие выводы: технология получения легированного титана губчатого позволяет исключить затратные и технологически сложные операции, что положительно повлияет на стоимость сырья, а соответственно и на стоимость конечного продукта печати методом аддитивных технологий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хазнаферов, М. В. Технология получения «low-cost» порошков легированного титана для аддитивных процессов / М. В. Хазнаферов, А. В. Овчинников, Т. Б. Янко // Титан. – 2015. - No 2. – С. 31-36.
2. Фроус, Ф. Х. Порошковая металлургия титановых сплавов / Ф. Х. Фроус, Дж. Е. Смугерски. – М. : Металлургия, 1985. - 263 с.
3. Довбыш, В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В. М. Довбыш, П. В. Забеднов, М. А. Зленко // Библиотечка литейщика. - 2014. - No 9. - С. 14-71.
4. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутылина. – С.-Пб.: Издательство политехнического университета, 2013. - 221 с.

### **НАРАБОТКА РАДИОАКТИВНОГО ИЗОТОПА $^{85}\text{Sr}$ НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ ИРТ-Т ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ДРЕЙФА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

Кабанов Д.В., Тимченко С.Н., Ушаков И.А., Кузьменко А.С.

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

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

E-mail: mamay2008@bk.ru

Для селекции радиоактивных изотопов, находящихся в полярных растворах могут быть использованы внешние периодические электрические поля высокой частоты [1]. В настоящее время подавляющее число методов обогащения радиоактивных изотопов требуют дополнительных агентов, что в свою очередь приводит к увеличению количества радиоактивных отходов. Метод селективного дрейфа ионов металлов под действием внешнего асимметричного электромагнитного поля, позволяет выделить, необходимы элемент без образования дополнительных радиоактивных отходов [2]. В качестве объекта для исследований был выбран стронций как яркий представитель отработанного ядерного топлива

(ОЯТ). Распределение стронция под воздействием внешнего ассиметричного поля можно отслеживать при помощи гамма радиоактивной метки  $^{85}\text{Sr}$ .

Цель работы – наработка радиоактивной метки  $^{85}\text{Sr}$  и расчет биологической защиты для проведения анализа распределения ионов во внешнем ассиметричном электрическом поле.

Проведены расчеты длительности облучения мишени из хлорида стронция природного состава показавшие необходимость облучение не менее 2 суток облучения в сухом канале №6 реактора ИРТ-Т ( $2,9 \cdot 10^{13}$  нейтр./см<sup>2</sup>/с) Учитывая незначительное сечение захвата тепловых нейтронов ( $270 \pm 40$  мбарн) целевым нуклоном, при облучении необходимо увеличивать время облучения природного стронция. При увеличении облучения активируется массивный контейнер, изготовленный из алюминия марки АД-1, что затрудняет перегрузку мишени и ее последующую распаковку.

Таблица 1. Ядерно-физические характеристики некоторых изотопов стронция

Активируемый нуклид	$\sigma$ (0,025эВ), мбарн	Распределение, %	Образующийся радионуклид (n, $\gamma$ )	$T_{1/2}$	Энергия гамма излучения, кэВ	Выход, %
$^{84}\text{Sr}$	270±40	0.5574	$^{85}\text{Sr}$	64.8 дн	514	99,3
	600±60		$^{85m}\text{Sr}$	1.13 ч.	231,9	84,4
$^{86}\text{Sr}$	840±60	9.8566	$^{87m}\text{Sr}$	2.8 ч.	388,4	82,5
$^{87}\text{Sr}$	17000	7.0015				
$^{88}\text{Sr}$	5.8±0.4	82.5845	$^{89}\text{Sr}$	50.6 дн	слаб. $\gamma$	

Для подтверждения проведенных расчетов нами была облучена мишень с хлоридом стронция массой 10,7 мг и 199,7 мг. Облучение проводили сухом канале №6 реактора ИРТ-Т в течение 18 и 42 часов соответственно. После «охлаждения» проводили измерение мощности дозы при перегрузке и вскрытии мишени. Измерение образовавшегося стронция-85 проводили на гамма-спектрометр многоканальный для измерения рентгеновского и гамма излучения CANBERRA на базе многоканального анализатора DSA-1000 с полупроводниковым блоком детектирования GS2018. После недельного «охлаждения» мощность дозы составляла 35 мкР/с. Теоретическая активность по  $^{85}\text{Sr}$  составила 46,7 кБк (мишень массой 10,7 мг) и 871,6 кБк (мишень массой 199,7 мг)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Shamanin, M. A. Kazaryan, S. N. Timchenko, I. A. Ushakov Mechanistic models of the ion-solvation shell system// Bulletin of the Lebedev Physics Institute -2017 – vol. 44 -iss. 9. – pp. 254–257.
2. Li Hongda , Kazaryan M. A. , Shamanin I. V. , Timchenko S. N. , Ushakov I. A. Electroinduced drift of solvated ions in salt solution of Ce and Ni // Journal of Chemical Physics. - 2018 - Vol. 130 - №. 8, Article number 111. - pp. 1-6.

## ПРОВЕДЕНИЕ АНАЛИЗА НА ПОРИСТОСТЬ ГРАФИТОВЫХ ПРЕСС-КОМПОЗИЦИЙ

Колесников Е.В.

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

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

E-mail: [evk58@tpu.ru](mailto:evk58@tpu.ru)

В ядерной технике графит широко применяется как хороший замедлитель с малым сечением захвата нейтронов и как конструкционный материал, а также как матричный материал твэлов и материал противоосколочных покрытий сферических топливных частиц в высокотемпературных газоохлаждаемых реакторах.

Графит имеет большую анизотропию свойств, которая обусловлена кристаллической структурой, а также текстурой, образованной в процессе изготовления. В связи с этим наблюдается значительное различие физических и механических свойств в направлениях, параллельном и перпендикулярном к оси прессования или выдавливания.

Наиболее высокая степень анизотропии у графитовых материалов, полученных выдавливанием, в то время как при прессовании удается получать изотропные изделия [1, 2].

Качество графита применяемого как матричный материал в основном оценивается по общей пористости, доле открытых пор, их распределению и размерам [2]. Характер пористости во многом зависит от исходных материалов и способа изготовления. При этом пористость оказывает влияние на другие свойства графита, в частности, на сорбционные свойства, прочность и теплопроводность [3–5]. Для определения теплопроводности графита используют следующее уравнение:

$$1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} = A\varepsilon;$$



где  $\lambda$  – теплопроводность при температуре 45°C;  $\lambda_0$  – теплопроводность при нулевой пористости 217,8 Вт/(м·К);  $A$  – постоянная, равная 2,3;  $\varepsilon$  – относительная пористость.

Цель данной работы было качественное определения пористости исследуемых заготовок по наличию сквозных пор и, соответственно, возможности количественного определения размеров пор по методу максимального давления пузырьков.

В соответствии с поставленной целью были спрессованы графитовые таблетки из чистого углерода и с добавлением различных пластификаторов. Анализ образцов на наличие сквозных пор проводился с помощью керосина. Результат считался положительным в случае, когда керосин проходил через таблетку насквозь и с обратной ее стороны на поверхности, покрытой меловой суспензией, образовывался мокрый след.

Анализ показал, что таблетки, спрессованные из чистого графита и с добавлением стеарата натрия, имеют сквозные поры и, вероятно, высокую пористость, т.к. через них прошел керосин, о чем свидетельствует цветовая индикация на обратной стороне таблеток. Следовательно, данные таблетки пригодны для определения размеров пор по максимальному давлению пузырьков В тоже время, образцы, полученные с добавлением в качестве пластификатора при прессовании фторопласта, показали низкую проницаемость по керосину и, скорее всего, имеют низкую пористость и малый их объем и не пригодны для вышеуказанного метода анализа размеров пор.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что таблетки, спрессованные при добавлении фторопласта как пластификатора, имеют лучшие эксплуатационные свойства, в случае применения их в качестве матричного материала для дисперсионного ядерного топлива, чем другие образцы. С другой стороны таблетки, полученные из чистого графита и с добавлением стеарата натрия, имеют перспективы использования как сорбирующие элементы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогайлин М.И., Чалых Е.Ф. Справочник по углеродным материалам. – Л.: Химия, 1974. – 208 с.
2. Вяткин С.Е. и др. Ядерный графит. – М.: Атомиздат, 1967. – 279 с.
3. Видяев Д.Г., Борецкий Е.А., Верхорубов Д.Л. Определение сорбционных свойств наноразмерных материалов // Альтернативная энергетика и экология. - 2015 - №. 23. - С. 73-77.
4. Видяев Д.Г., Савостиков Д.В., Селянин А.С., Сидоркин А.С. О кинетике сорбции водорода наноструктурными композитными материалами // Изв. высш. учеб. заведений. Физика. – 2013. – Т. 56., № 11-3. – С. 280–283.
5. Самойлов А.Г. и др. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 400 с.

## ПРОВЕДЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА УГЛЕРОДНЫХ-КОМПОЗИЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ SOLIDWORKS

Колесников Е.В.

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

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

E-mail: [evk58@tpu.ru](mailto:evk58@tpu.ru)

Система автоматизированного проектирования SolidWorks (SolidWorks Corp., США) создана для использования на персональном компьютере в операционной среде Microsoft Windows.

В SolidWorks используется принцип трехмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования, что позволяет конструктору создавать объемные детали и компоновать сборки в виде трехмерных электронных моделей, по которым создаются двухмерные чертежи и спецификации в соответствии с требованиями ЕСКД.

Трехмерное моделирование изделий дает массу преимуществ перед традиционным двумерным проектированием, например, исключение ошибок собираемости изделия еще на этапе проектирования, создание по электронной модели детали управляющей программы для обработки на станке с ЧПУ. С помощью программы SolidWorks можно увидеть будущее изделие со всех сторон в объеме и придать ему реалистичное отображение в соответствии с выбранным материалом для предварительной оценки дизайна.

Трехмерная деталь SolidWorks получается в результате комбинации трехмерных примитивов. Большинство элементов основаны на плоском эскизе, по которому создается базовый трехмерный объект. Последовательное наращивание 3D объектов и позволяет в итоге получить желаемый результат.

В ходе проведения работы были созданы модели таблеток из реакторного графита, спрессованных при 20 и 100 МПа соответственно.

После построения геометрии были заданы физические свойства материала моделей таблеток с учетом полученной плотности. После того как был задан материал таблетки, было проведено термическое исследование при приложении потока теплоты к боковой поверхности и к одному из оснований цилиндрической таблетки. Начальная температура всех поверхностей модели была задана равной 20°C.

Тепловой поток, подводимый к таблетке рассчитывался исходя из скорости реакции деления  $^{235}\text{U}$  изотопа урана тепловыми нейтронами и того, что на 1 акт деления в среднем приходится 200 МэВ энергии.

Из полученных результатов видно, что наибольшую температуру имеют участки модели, находящиеся вблизи граней, к которым подводится тепловой поток. Однако из-за небольшого объема таблетки градиент температур в ней имеет малое значение.

Сравнительный анализ, проведенный на основании полученных данных, показал, что модель таблетки, имеющая меньшую плотность, нагревается сильнее при подведении теплового потока ко всем граням и к боковой поверхности, а при подведении теплового потока к основанию цилиндрической таблетки нагрев уменьшается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов В.В., Монахов В.С. Материалы ядерной техники. – М.: Атом-издат, 1976. – 260 с.
2. Самойлов А.Г. и др. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 400 с.
3. Исследование перспектив использования таблеток на основе технического углерода для сорбции водорода [Электронный ресурс] / Д. Е. Адильханов [и др.] // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине (ФТПНПМ-2019) сборник научных трудов Международ. научно-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 30 сентября – 04 октября 2019 г.: Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); под ред. А. Г. Горюнова [и др.]. – Томск : Изд-во ТПУ, 2019. – С. 107.
4. Подготовка пресс-порошков при фабрикации углеродных материалов в таблетки [Электронный ресурс] / В. Н. Акимов [и др.] // Изотопы: технологии, материалы и применение материалы V Международ. научн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 19–23 ноября 2018 г.: Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск : Графика, 2018. – С. 95.

### ПРИМЕНЕНИЯ $\text{BF}_3$ В КАЧЕСТВЕ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ВТГР

Кнышев В.В., Луцик И.О., Зорькин А.И.

Научные руководители: Шаманин И.В., д.ф.-м.н., профессор, Беденко С.В., к.ф.-м.н., доцент  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: vvk28@tpu.ru

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторные установки (ВТГР) в силу особенностей состава конструкции активной зоны и компоновки, обладают благоприятными характеристиками в отношении ядерной безопасности. В них практически исключено расплавление активной зоны, состоящей в основном из графита, имеющего температуру сублимации около  $3600^\circ\text{C}$ . При потере теплоносителя не происходит резкого возрастания температуры, что обусловлено высокой теплоемкостью активной зоны. Кроме того, реакторы ВТГР имеют высокий отрицательный температурный коэффициент реактивности [1].

Традиционные реакторные установки работают в критическом режиме с управляемой цепной реакцией деления и поддерживается на стабильном уровне, тремя видами регулирования реактивностью: 1) компенсация большого запаса реактивности; 2) небольшие изменения для управления мощностью ядерного реактора; 3) быстрое уменьшение реактивности для аварийной остановки. Во всех случаях задача заключается во влиянии на баланс нейтронов в размножающейся среде активной зоны [2].

В качестве дополнительного метода регулирования реакторов ВВЭР-1000 используется борное регулирование. В теплоноситель добавляется борная кислота ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ), которая позволяет компенсировать избыточную реактивность и упрощает управление установкой [3-4]. По этому принципу рассматривается возможность применения борсодержащих материалов в теплоносителе разрабатываемой реакторной установки ВТГР в Томском политехническом университете [5].

Из рассмотренных вариантов, наиболее оптимальным, по теплофизическим и химическим свойствам, выбран трифторид бора ( $\text{BF}_3$ ) [6].  $\text{BF}_3$  имеет высокую термостойкость, что очень важно при температуре теплоносителя в  $1000^\circ\text{C}$  [5]. Применение данного материала позволяет упростить управление критичностью установки и соответственно повысить безопасность самой установки. Применение обогащенного  $\text{BF}_3$  до 50% по  $\text{B}^{10}$  повысит эффективность добавляемого соединения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90132 и № 19-29-02005.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гребенник В.Н., Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы – инновационное направление развития атомной энергетики. - М.: Энергоатомиздат, 2008, 136 с.

2. Владимиров В.И. Физика ядерного реактора: Практические задачи по их эксплуатации. Изд. 5-е, перераб. и доп. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009, 480 с.
3. Pazirandeh A., Ghaseminejad S., Ghaseminejad M. Effects of various spacer grid modeling on the neutronic parameters of the VVER-1000 reactor // Annals of Nuclear Energy, 2011, 38, p. 1978–1986
4. Kashi S., Moghaddam N.M., Shahriari M. A spatial kinetic model for simulating VVER-1000 start-up transient // Annals of Nuclear Energy, 2011, 38, p. 1300–1309
5. Shamanin I.V., Chertkov Y.B., Bedenko S.V. et al. Neutronic properties of high temperature gas cooled reactors with thorium fuel // Annals of Nuclear Energy, 2018, Vol. 113, pp. 286-293.
6. Desai, S.S., Rao, M.N. Drift of electrons and performance of BF<sub>3</sub> filled neutron proportional counters // AIP Conference Proceedings Volume 1832, 19 May 2017, Номер статьи 060014 61st DAE Solid State Physics Symposium; KIIT University Bhubaneswar, Odisha; India; 26 December 2016 до 30 December 2016; Код 127872.
7. Кузнецов Е. В. Исследование зависимости диэлектрических характеристик компаунда «Mecoline» от дозы облучения. – 2016.

## **ПРОЦЕСС ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФТОРОПЛАСТАХ И ДРУГИХ МАТЕРИАЛАХ ЯДЕРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**

Украинец О.А

Научный руководитель: Беденко С.В., к.ф.-м.н., доцент  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: lesyaukrainets@gmail.com

Основные элементы, обеспечивающие надежность и безопасность эксплуатации ядерных энергетических установок включают в себя кабельные изделия, в особенности, провода и кабели системы управления и защиты (СУЗ) ядерного реактора, а также кабели основных технологических агрегатов. Такие элементы находятся под воздействием радиационных полей и повышенных температур в течение длительного времени [1-3]. В связи с этим существует острая необходимость в разработке специальных проводов и кабельной продукции, выбор материалов которых должен основываться на анализе электрофизических, физико-механических и технологических свойств с учетом изменения большинства этих свойств в процессе облучения.

Полимерные материалы широко применяются в атомной отрасли, где они подвергаются воздействию ионизирующего излучения высокой энергии [4,5]. Поэтому изучение влияния этого специфического вида внешнего воздействия на разнообразные свойства полимера представляет определённый научный и практический интерес.

Материал фторопласт-4 МБ был разработан специально для кабельной промышленности, использования его в качестве изоляции и оболочек теплостойких проводов и кабелей, однако его модификация фторопласт-4 МБ серии К «Пластполимер» (г. Санкт-Петербург, Россия) практически не исследована.

В работе исследуется влияние гамма-облучения с различным дозированием на диэлектрические и механические характеристики фторопласта-4МБК путем оценки относительной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, напряжения и деформации подвергнутого воздействию материала. Измерения проводились при фиксированной частоте 10<sup>6</sup> Гц с помощью измерительной ячейки ИЯ-2Т (ФГУП «Национальный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», г. Иркутск, Россия), которая предназначена для измерений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твёрдых диэлектриков толщиной от 0,5 до 2 мм в диапазоне частот от 50 Гц до 1 МГц [6].

Полученные экспериментальные данные дают достаточное представление о характере изменения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь исследованного материала в широком диапазоне доз и частот и позволяют обоснованно подходить к выбору его в качестве оболочки или электрической изоляции различного рода кабельных изделий, в особенности, в полях интенсивного ионизирующего излучения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костромин, В. В. Влияние β-излучения на диэлектрические свойства кабельных изоляционных полимерных материалов/ В. В. Костромин, Б. С. Романов, В. Н. Егоров, В. Л. Масалов// Кабели и провода. – 2014. – N 4 (347). – С. 30-34.
2. Украинец О. А., Беденко С.В., Зорькин А.И., Масенко С.А., Структурно-фазовые деструктивные изменения в конструкционных материалах и функциональных покрытиях топлива со сложной внутренней структурой, Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Российский и международный опыт подготовки кадров: сборник тезисов докладов X-той

Международной научно-практической конференции; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Ветер, 2020. – С. 43.

3. Athem G., Planck M. A new dosimeter for diagnostic x-rays //Applied Radiation and Isotopes. – 2012. – Т. 20. – С. 333-350.

4. Бабич Л. Н., Бородин Ю. В. Перспективные полимерные материалы, используемые для радиационной защиты //Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции, 2-4 декабря 2015 г., Томск. Т. 2.—Томск, 2015. – СКАН, 2015. – Т. 2. – С. 260-262.

5. Romanov B. et al. Effect of gamma radiation on dielectric and mechanical properties of modified fluoroplastic PTFE //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2018. – Т. 1938. – №. 1. – С. 020003.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛОННОГО ОБМЕННОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМ ЖИДКОСТЬ–ЖИДКОСТЬ

Кузьменко А.С.<sup>1</sup>, Савостиков Д.В.<sup>2</sup>

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

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

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050,  
г. Томск, пр. Ленина, 40

E-mail: ask147@tpu.ru

В современном мире область применения соединений высокообогащенных по элементам и их изотопам чрезвычайно широка и затрагивает медицину, электронику, атомную энергетику и другие отрасли промышленности. Одной из наиболее сложных задач считается получение особо чистых соединений щелочных металлов и их изотопномодифицированных вариантов, ввиду отсутствия у них газообразных соединений [1].

Для решения данной проблемы используют обменные системы, состоящие из двух нерастворимых друг в друге жидких фаз. При этом обмен осуществляется в многоступенчатых колоннах с помощью экстракции или химообменного способа [1–5]. Для поиска новых и оптимизации известных обменных систем целесообразно проводить численный анализ параметров работы колонны, что позволяет избежать больших материальных и временных затрат.

Цель работы являлось создание математическое описание колонного обменного экстракционного процесса для оценки его основных параметров.

В результате выполненной работы получено описание процесса обмена в системе жидкость–жидкость протекающего в насадочной колонне, что позволило создать программу для расчета ряда параметров, таких как размеры и характеристики насадки, объемные расходы, размеры диспергатора и колонны, а также параметры массопередачи для обеих фаз. Сравнение результатов расчета и имеющихся литературных данных показали хорошую сходимость, что говорит о перспективности практического применения разработанной программы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Б. М., Зельвенский Я.Д., Кательников С.Г. Разделение стабильных изотопов физико-химическими методами. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 208 с.
2. Пат. 93008155 РФ МПК 6 С 25 В1/42. Установка очистки гидроксида калия / И.М. Белозеров, А.И. Белосохов, Г.Г. Горовой и др.; Заявл. 11.02.93; Опубл. 20.01.96.
3. Тихомиров И.А., Видяев Д.Г., Гринюк А.А. Кинетика изотопного обмена и величина обменного потока между фазами // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307, № 6. – С. 81–84.
4. Холькин А.И. и др. Экстракция металлов фенолами.– Новосибирск: Наука, 1976. – 192 с.  
Демин С.В., Жилон В.И., Цивадзе А.Ю. Изотопные эффекты лития и бора в экстракционных системах // Журн. неорганич. химии. – 2015. – Т.60, №5. – С. 705–709.

*Секция 5*

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

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

# ОЧИСТКА ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ГУМИНОВЫМИ КИСЛОТАМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ТОРФА

Цхе А.А.<sup>1</sup>, Сосновский С.А.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Сосновский С.А.<sup>2</sup>, к.ф.-м.н., с.н.с.

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

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

E-mail: ssa777@mail.ru

Удаление радионуклидов и токсичных химических веществ с загрязненной поверхности и из объема твердых и жидких радиоактивных отходов остаётся одной из важных задач прикладной радиохимии и радиоэкологии. Без создания надёжных и доступных производству средств дезактивации невозможно устойчивое развитие национальной атомной энергетики. Гуминовые кислоты (ГК) – это вещества природного происхождения, которые представляет собой природно-совместимые многофункциональные полиамфолиты, служащие отличными сорбентами радионуклидов и токсичных химических веществ. Актуальность создания новых физико-химических и технологических подходов к проблеме получения ГК, в частности из торфа, представляется весьма актуальной научной задачей. В нашем случае экстракцию гуминовых веществ из торфа вели путём обработки водных суспензий торфа высоковольтными импульсными плазменными разрядами.

Камера обработки суспензии торфа состоит из корпуса, высоковольтного электрода и заземлённого электрода. К высоковольтному электроду подключен генератор импульсов, имеющий конденсаторную батарею и разрядник. Обрабатываемая суспензия торфа, с определенным соотношением твердого к жидкому, помещается в рабочую камеру. При пробое промежутка высоковольтный импульс подается на высоковольтный электрод, с которого начинают развиваться плазменные образования. Когда промежуток замыкается плазменным каналом, происходит его ударный разогрев, взрывное расширение, и канал разряда генерирует ударную волну, за фронтом которой образует кавитационные процессы, которые развиваются во всем объеме суспензии и, схлопываясь, разрушают растительное сырьё. Затем канал разряда вырождается в пульсирующую парогазовую полость, которая создаёт мощные турбулентные потоки жидкости в рабочем объеме, обеспечивая интенсивный диффузионный процесс между клеткой и водной фазой суспензии.

Представленные результаты показывают, что с целью достижения минимальных затрат энергии при высокой степени извлечения гуминовых веществ из торфа, целесообразно работать в диапазоне плотности энергии в рабочем промежутке от 10 до 100 Дж/мм. Удельные затраты энергии составили 1,5 кВт·ч/г, удельная производительность 1 мг/имп извлечения гуминовых веществ.

Сорбционные эксперименты проводились в условиях ограниченного объема с использованием модельного раствора монацита в качестве источника ионов тория, урана и редкоземельных элементов. Проведены эксперименты по соосаждению и коллоидно-химической экстракции микорэлементов с ГК, определены зависимости степени экстракции твердофазных комплексов ГК с двухвалентным стронцием, шестивалентным ураном, четырёхвалентным торием, трёхвалентным лантаном - трёхвалентным ниодимом и трёхвалентным железом из водного раствора. Показано, что взаимодействие двухвалентного стронция и других химических элементов речной воды с внесённой ГК завершается за 3-4 часа и подчиняется формальной кинетике обратимой реакции первого порядка по катиону. Установлен высокий коэффициент распределения ионов двухвалентного стронция при сорбции ГК на фоне больших концентраций ионов двухвалентного кальция и двухвалентного магния. Коэффициент распределения между речной водой и ГК для большинства исследованных микроэлементов зависит от условий проведения сорбции и может изменяться в пределах порядка величины. Полученные результаты соответствуют оптимальным условиям сорбции и разделения фаз. Показано, что ГК являются сорбентами коллективного действия и концентрируют элементы, относящиеся к продуктам деления и активации.

В докладе приведено физико-математическое и химическое моделирование процессов воздействия высоковольтного импульсного разряда на суспензию торфа, показана экспериментальная установка.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0028.

# ОЧИСТКА ЖИДКИХ СРЕД ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИКАЛОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ПЛАЗМЕ СВЧ-РАЗРЯДА

Цхе А.А.<sup>1</sup>, Ильин А.П.<sup>1</sup>, Сосновский С.А.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Ильин А.П.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., профессор

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

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

E-mail: ssa777@maill.ru

Высокие темпы развития нефтехимической, химической и фармацевтической отраслей, увеличение номенклатуры химической продукции неуклонно приводят к росту потребления химических препаратов. Со сточными водами от нефтехимической, химических и фармацевтических производств, лечебно-профилактических учреждений и животноводческих ферм химические вещества попадают в водоемы. Современные методы очистки водных стоков оказались неэффективными в отношении ряда химических препаратов. Эти препараты способны вызывать гибель микроорганизмов систем биоочистки сточных вод, а при попадании в водоем наносят тяжелый урон его флоре и фауне.

В настоящее время наиболее универсальным и широко применяемым методом очистки сточных вод является биологическая и электрохимическая очистки. Одним из способов подготовки воды для биологической и электрохимической очистки могут служить процессы деструкции синтетической органики при действии активных радикалов созданных в атмосферной плазме СВЧ- разряда в результате высокой энергетической эффективности плазмохимических реакций, протекающих в результате колебательного возбуждения молекул вещества в СВЧ- плазме. Одна из причин этого интереса заключается в новых возможностях, которые открывает этот разряд для практического использования.

В плазменном устройстве используется объёмный цилиндрический резонатор (2,45 ГГц), внутри которого при подаче на магнетрон импульса напряжения питания формируется объёмный разряд (низкотемпературная плазма). В настоящих экспериментах использовалась импульсная микроволновая мощность 0,6 кВт. При зажигании разряда импульс мощности заканчивался, чтобы избежать перегрева среды и резонатора. В экспериментах был получен озон. Расход газа через выпускное отверстие диаметром 14 мм варьировался от 1 до 30 литров в минуту. Максимальная мощность и объём газового потока ограничены доступными в настоящее время аппаратными компонентами. Существует значительный потенциал для расширения деятельности. Этот подход может открыть новые возможности для термической обработки с использованием имеющихся в продаже и недорогих магнетронов на частотах 2,45 ГГц и 915 МГц. Капитальные затраты могут быть меньше доллара на ватт для систем большой мощности (> 75 кВт). Эти особенности могут сделать эту технологию конкурентоспособной с традиционными плазменными горелками и высокочастотной индукционной плазмой. Проведено термодинамическое исследование плазмохимических процессов, протекающих в СВЧ горелке, что позволило определить возможность образования определенных количеств химических соединений в данных условиях. Для термодинамического анализа используется универсальная программа TERRA.

Основными разрядными продуктами являются активные окислители: короткоживущие частицы ·O, ·OH и другие, способные воздействовать на растворы непосредственно во время СВЧ- электроразрядной обработки воздуха. Целью настоящей работы явилось исследование деструкции водных растворов диклофенака (C<sub>14</sub>H<sub>11</sub>Cl<sub>2</sub>NO<sub>2</sub>), как модельного вещества, представляющего особую сложность при очистки сточных вод, в условиях воздействия активных радикалов созданных в плазме атмосферного СВЧ-разряда. Также на выбор этого вещества повлияло возможностью прямого спектрофотометрического определения в интервале длин волн 200–600 нм с использованием спектрофотомера.

Анализ оптических спектров поглощения водного раствора диклофенака показал протекание процесса деструкции, сопровождающегося снижением интенсивности поглощения в области 590 нм и увеличением интенсивности поглощения в области 200 нм. Согласно литературным данным снижение интенсивности поглощения в области 590 нм обусловлено деструкцией по ауксохромным группам. Наибольшие изменения состава модельного раствора при воздействии плазмы СВЧ- разряда получены в среде воздуха. В докладе представлены обзорные данные, данные экспериментов, данные экспериментального оборудования, аналитические данные, общие выводы, выводы о перспективах использования этой технологии и список литературы. Показана физико-химическая и математическая модель процесса.



# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗОТОПНЫХ РАЗДЕЛЕНИЙ В ОБМЕННЫХ 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.<sup>2</sup> д.ф.-м.н., профессор

<sup>1</sup>Акционерное общество «Сибирский химический комбинат», 636039, г. Северск,  
ул. Курчатова, 1

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

E-mail; anatoli@tpu.ru

Все большее применение в промышленности и технике находят различные виды изотопов [1].

При выборе ионитов для процессов разделения изотопов используется метод направленного поиска систем с максимальными разделительными свойствами. Сущность метода состоит в том, что определяются значения  $\beta$ -факторов соединений, участвующих в изотопном обмене. Отношение  $\beta$ -факторов дает величину однократного коэффициента разделения изотопов в рассматриваемых условиях [Разработана методика расчета  $\beta$ -факторов применительно к различному виду гранулированным ионообменникам. Математическая модель расчета однократного коэффициента разделения в системе ионит-раствор предложена также на основе представлений о электростатическом взаимодействии ионов.

С учетом результатов направляемого поиска систем с высокой селективностью разработан метод разделения изотопов при изотопном обмене и электрохимическим обращением потоков фаз. Экспериментальная установка, реализующая данный метод разделения, включает противоточные обменные колонны и электродиализатор, в котором происходит обращение потоков фаз [3]. Для процесса разделения используются органические и неорганические иониты. В колонке осуществляется встречное движение ионита и раствора. Оптимальная скорость движения ионита составила 0,04 см/с [3].

На основании значений коэффициентов взаимодиффузии определена величина ВЭТС. Полученные расчетные значения этой величины согласуются с экспериментальными данными. Электрохимическое обращение потоков фаз производится с применением электродиализного аппарата. В нем под действием электрического поля зона более подвижного изотопа перемещается в ионите, заполняющим межмембранную часть электродиализатора. Ионит при этом насыщается изотопом с меньшей подвижностью и далее вновь поступает в обменную колонну. Степень электрорегенерации достигает в этих условиях 96-98%, что позволяет осуществлять обращение потоков фаз. Найдены оптимальные условия питания электродиализатора и конструкционные особенности аппарата.

Для повышения концентрации выделяемого изотопа используется электрохроматографическая колонна, где разделение изотопов осуществляется за счет разности в их подвижностях. С целью повышения эффективности работы колонны противоток в ней осуществляется путем совместного движения ионита и раствора. Существенное увеличение чисел переноса разделяемых изотопов достигается путем выполнения установки «колонка-электродиализатор». В электродиализаторе используются катионитовые мембраны. Отбор обогащенного продукта осуществляется из катодной камеры этого аппарата. Здесь также 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 [2].

Комплекс проведенных исследований по моделированию рассматриваемых процессов, разделению изотопных и ионных смесей на экспериментальной установке позволил сделать вывод об адекватности полученных в работе математических моделей, определить оптимальные условия проведения разделительных процессов [3].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Б.М., Зельвенский Я.Д., Кательников С.Г. Разделение стабильных изотопов физико-химическими методами. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 208 с.
2. 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.
3. Балашков В.С., Вергун А.П., Беляков Д.М. Направленный поиск, моделирование электрохроматографических и обменных процессов изотопного разделения // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов V Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (19.11 – 23.11 2018 г.), НИ ТПУ – Томск: Графика, 2018. – 108 с.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗОТОПНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ИОНИТ-РАСТВОР

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>Акционерное общество «Сибирский химический комбинат», 636039, г. Северск,  
ул. Курчатова, 1

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail; anatoli@tpu.ru

К числу перспективных методов разделения относятся электроионитные и обменные, использующие различные виды ионитов и ионообменных мембран [1].

Проведены исследования по электрохроматографическому разделению изотопов. Экспериментальная установка позволяет осуществлять процессы изотопного разделения в условиях встречного движения ионов и системы “ионит – раствор”. Электродные камеры установки отделены от разделительной колонны ионитовыми мембранами, что дает возможность значительно повысить выход по току разделительного процесса.

Для моделирования, определения оптимальных условий разделения изотопов различных элементов при изотопном обмене и электрохроматографии использовались методы планирования экстремальных экспериментов. [2, 3].

При разделении изотопов электрохроматографическим методом с применением ионитов в качестве функции отклика использовалась относительная концентрация выделяемого изотопа в продукте ( $y_1$ ) и относительный выход целевого компонента ( $y_2$ ).

Факторами являются следующие величины: концентрация раствора в разделительной установке, скорости противотока в растворе и ионите, напряженность электрического поля [3].

При проверке полученных уравнений на адекватность по критерию Фишера установлено, что полученные 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 (50-55) % и (90-95) %. С увеличением обогащения процент прироста достигается с большими затратами.

Большой интерес с точки зрения адекватного описания процессов изотопного разделения представляет использование обобщенных критериев оптимизации.

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

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

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

Математических модели проверены на адекватность, предложены методы устранения неадекватности математических моделей в процессах разделения изотопов.

Проведено сравнение эффективности рассматриваемого метода разделения с аналогичным методом разделения изотопов при неподвижном ионите. Для изотопов щелочных элементов обогащение по легкому изотопу достигается в 1,3 раза выше, чем по способу с неподвижным ионитом [3].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Изотопы, свойства, получение, применение» под ред. Баранова В.Ю.М.:Издат.АТ 2000г.
2. 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
3. Балашков В. С., Вергун А. П., Беляков Д. М. Разработка, оптимизация процессов разделения изотопов в противоточных колоннах с движущейся фазой ионита // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов IV Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (30.10 – 3.11 2017 г.), ТПУ – Томск: Графика, 2017. – 69 с.

# ОЧИСТКА ИЗОТОПНО-ОБОГАЩЕННОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СВИНЦА

Гусев Н.В.

Научный руководитель: Егоров Н.Б., к.х.н., доцент  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Email: egorov@tpu.ru

Известно, что изотопы одного и того же химического элемента несмотря на незначительные отличия по химическим свойствам, очень часто имеют существенные отличия по физическим свойствам. Например, сечение взаимодействия с элементарными частицами, период полураспада, теплопроводность и т.д. [1-5]. Как следствие, изучение свойств стабильных изотопов химических элементов является весьма актуальной задачей. Процесс изучения свойств изотопной продукции всегда сопряжен требованиями по обеспечению высокой изотопной и химической чистоты изучаемого материала. Поэтому стадии его очистки перед непосредственным изучением свойств являются обязательными. Природа содержащихся примесей в изотопной продукции может быть различна. Так, в случае разделения стабильных изотопов свинца используется его летучее соединение тетраметилсвинец -  $Pb(CH_3)_4$ , характеризующееся высокой химической чистотой. Однако в процессе разделения изотопов примеси из конструкционных материалов газовых центрифуг могут загрязнять  $Pb(CH_3)_4$ . При конверсии изотопно-обогащенного  $Pb(CH_3)_4$  примеси, из используемых химических реагентов, также могут попасть в металлический свинец. В качестве способов рафинирования свинца от примесей возможно применение таких методов как зонная перекристаллизация, вакуумная дистилляция, кристаллизация из расплава методом Чохральского, а также различные комбинации вышеперечисленных способов [6-8].

В настоящей работе представлены экспериментальные исследования по очистке изотопно-обогащенного свинца  $^{208}Pb$  с помощью процессов зонной перекристаллизации и вакуумной дистилляции. В ходе проведения эксперимента по очистке свинца с помощью процесса зонной перекристаллизации был получен образец, после чего был выполнен его элементный анализ верхней и нижней зоны слитка. Как показали результаты атомно-эмиссионного анализа зонная перекристаллизация эффективна для очистки свинца от Ca, K, Mo, Mn, Cu, Sn, Sb, Ag, V, Bi, Zn, однако для таких примесей как Si, Fe, Ni, Al, Mg, Cr, Ba, Cd, Li, Na, Te провести глубокую очистку посредством зонной перекристаллизации невозможно. Результаты элементного анализа изотопно-обогащенного свинца  $^{208}Pb$  полученного после процесса вакуумной дистилляции показали, что после первой дистилляции в очищенном продукте еще содержатся такие примеси, как Si, Cd, K, Al, Li, Na, Ba, Bi и V. С целью удаления данных примесей свинец подвергался повторному процессу очистки вакуумной дистилляцией. Анализ примесей после первой и второй дистилляции показал, что из изотопно-обогащенного свинца происходит интенсивное поэтапное удаление таких примесей, как Ca, Fe, Ni, Zn, Te, Mo, Mg, Mn, Cr, Sn, Sb, Cu, Ag, Si, V, Na, Cd, K, Li, Ba, которыми наиболее загрязнен изотопно-обогащенный  $^{208}Pb$ . Напротив, глубина очистки дистилляцией свинца от алюминия и висмута, ограничена. При этом необходимо отметить низкий (30 – 50) % выход  $^{208}Pb$  после двукратной дистилляции. Таким образом, при использовании зонной перекристаллизации или дистилляции  $^{208}Pb$  происходит удаление не всех, а только вполне определенных примесей. Эффективность рафинирования  $^{208}Pb$  методом вакуумной дистилляции выше, чем методом зонной перекристаллизации. После двукратной дистилляции был получен  $^{208}Pb$  с химической чистотой 99,999 % (5 N).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плеханов В.Г. Изотопические эффекты и эффекты разупорядочения в спектроскопии экситонов большого радиуса // УФН. 1997. Т. 167. № 6. С. 577-604.
2. Коган В.С. Изотопические эффекты в структурных свойствах твердых тел // УФН. 1962. Т.78. № 4. С. 579-615.
3. Плеханов В.Г. Изотопические эффекты в динамике решетки // УФН. 2003. Т. 173. № 7. С. 711-738.
4. Егоров Н.Б., Колесов Б.А. Изотопические эффекты в раман-спектрах кристаллической серы  $\alpha$ - $S_8$  // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 98. № 3. С. 155-159.
5. Ежевский А.А., Гусев А.В., Гусейнов Д.В. и др. Спиновый резонанс электронов с различной степенью локализации в кремнии с измененным изотопным составом // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. № 5 (2). С. 321-329.
6. Александров Б.Н. Дьяков Г.Н. Зонная очистка алюминия и свинца // Физика металлов и металловедение. 1962. Т 14. № 2. С. 267-270.
7. Щербань А.П. Получение высокочистых металлов для производства низкофоновых сцинтилляционных детекторов редких событий // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. 2011. № 6. С. 3-10.
8. Voiko R.S., Virich V.D., Danevich F.A. Ultrapurification of Archaeological Lead // Inorganic Materials. 2011. V. 47. № 6. P. 645-648.

## ПРИМЕНЕНИЕ ФЛОКУЛЯНТОВ BESFLOC В ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

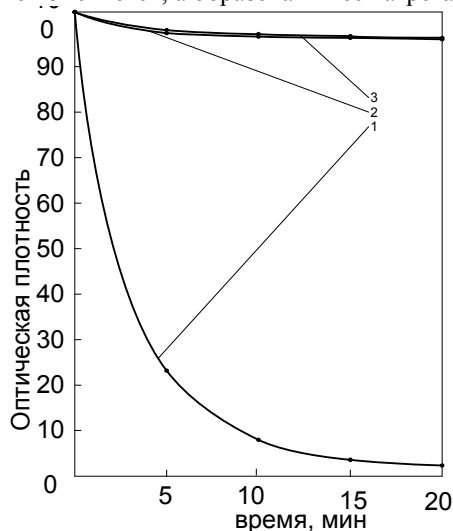
Распутин И.В., Губская М.Л.

Научный руководитель: Карелин В.А., д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: raspustin.ilia@yandex.ru

За последние десятилетия процессам переработки керамического отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) [1], образующимся при его использовании в реакторах LWR [2], уделяется все больше внимания. Процесс переработки позволяет использовать замкнутый ядерный топливный цикл и обеспечить многократное использование урана, находящегося в исходном топливе [3].

При растворении керамического ОЯТ образуются растворы, содержащие от 0,19 до 0,59 % коллоидов от массы исходного топлива (концентрация взвесей в растворе  $\sim 1-3$  г/дм<sup>3</sup>). Для их удаления используют флокуляцию, а в качестве флокулянта BESFLOC. Для определения принципиальной возможности применения BESFLOC и осветления азотнокислых растворов ОЯТ с  $c_U=400-1000$  г/л, использован неионогенный BESFLOC K4000. Осаждение коллоидов в растворе с BESFLOC K4000 произошло за  $\sim 15$  мин. Для изучения возможности выделения платиновых металлов и определения возможности использования неионогенных BESFLOC K4000 и K4020, а также катионного BESFLOC K6651 и анионного BESFLOC K4032 исследовано разрушению коллоидных растворов, содержащих мелкодисперсный порошок Pt (платиновая «чернь»). Исследовано воздействие излучения  $d$  18,5 Рентген/час на U-растворы с флокулянтами в течение 3-х суток. Установлено, что внешний вид раствора не изменяется, а образовавшиеся агрегаты частиц не разрушаются.



Изменение оптической плотности растворов  $UO_2(NO_3)_2$  с концентрацией 1000 г/л по U и раствором имитатора (порошком графита) от времени проведения процесса после взаимодействия с флокулянтами BESFLOC показаны на рис. 1.

Зависимость изменения оптической плотности  $I/I_0$  от времени для растворов  $UO_2(NO_3)_2$  с концентрацией 1000 г/л по U с мелкодисперсным порошком графита, после взаимодействия с флокулянтами:

- 1 – раствором BESFLOC K4000;
- 2 – раствором BESFLOC K4032;
- 3 – раствором BESFLOC K6651

Рис. 1. График зависимости оптической плотности растворов от времени проведения процесса с флокулянтами BESFLOC

Анионный BESFLOC K4032 и катионный BESFLOC K6651 незначительно увеличивают размеры коллоидных частиц только при длительном контакте флокулянта ( $> 1$  часа) с раствором. Образующиеся частицы имеют рыхлую структуру и при перемешивании разрушаются. Неионогенный BESFLOC K4000 за 10 мин уменьшили оптическую плотность раствора  $I/I_0$  до 8 ед., а через 20 мин произошло практически полное осветление исходного раствора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Choi, E.Y. et al. Progress in Natural Science: Materials International. 2015, 25(6), 572–582.
2. Alekseev, P.N. et al.: Physics of Atomic Nuclei. 2015, 78(11, 1), p. 1264–1273.
3. Chen, G.J. International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE (Xi'an; China; 2010, 1, p.

## ФЛОТАЦИОННОЕ ОБОГАЩЕНИЕ ТИТАНСОДЕРЖАЩИХ ПЕСКОВ ИЗ ВЬЕТНАМА

Ле Ш.Х., Карелин В.А., Карелина Н.В.

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

E-mail: v.a.karelin@mail.ru

Основным промышленным типом титансодержащих песков являются прибрежные россыпи в виде мелко- и среднезернистого песчаного материала. Крупность зерен 0,05-0,8 мм. Тяжелая фракция песков содержит циркон, рутил, ильменит, дистен, силлиманит, ставролит, турмалин и др. минералы. Вмещающая порода представлена кварцем и глинистыми минералами [1, 2]. Содержание тяжелой фракции в песках – от 3,0 до 42 %, глины – от 7 до 35 %. Также содержатся турмалин, хромшпинелиды, шпинели и др. минералы. Гранулометрический состав песков:

Класс, мм	Выход, %	Класс, мм	Выход, %
+0,28	4	-0,10+0,10	10,2
-0,28+0,20	28,8	-0,10+0,07	2,2
-0,20+0,14	31,0	-0,07	23,8

Во флотационной схеме используют дезинтеграцию, обесшламливание, флотацию, двойную перемешку черного концентрата, обезвоживание и сушку. Показатели флотации и расход реагентов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты флотации песков при разной температуре пульпы

Температура пульпы, °С	Расходы мыла, кг/т обесшламленных песков	Выход концентрата, %	Содержание тяжелой фракции, %		Извлечение в коллективный концентрат, %					
			Исходное питание	Коллектив. концентрат	Тяжелая фракция	рутил	ильменит	Дистен и силлиманит	ставролит	турмалин
5-7	Сульфатное мыло, 0,6-0,7	21,95	22,3	94,8	93,3	96,8	91,2	92,4	95,8	85,0
5-7	Талловое мыло, 0,47-0,50	20,45	21,0	95,5	93,0	97,1	92,5	89,7	88,5	87,0
10-12	То же	15,75	16,1	95,4	93,3	97,5	93,4	90,5	91,4	86,8
18-20	То же	16,3	16,0	94,4	96,1	98,4	96,3	92,0	90,8	92,0

При переработке песков с содержанием тяжелой фракции до 10-15 % производительность достигала 250-300 т/сутки, а при переработке более богатых песков 150-200 т/сут.

По результатам исследований установлен режим флотации:

- содержание твердого в пульпе в контактном чане 40-70 %, во флотации 30-45 %;
- время перемешивания с реагентами 10-12 мин, основной флотации 8-10 мин, первой перемешки 4-5 мин, второй перемешки 5-6 мин;
- рН пульпы в питании основной флотации 6,0-6,7;
- необходимый расход сульфатного мыла и серной кислоты от 0,15 кг/т для песков с высоким содержанием тяжелой фазы до 1,2 кг/т – с низким;
- сульфатное или талловое мыла необходимо подавать в контактный чан в виде 5 %-ного или менее концентрированных растворов, серную кислоту подают без разбавления в контактный чан и в процесс первой перемешки черного концентрата. Таким образом показана возможность флотации титановых россыпей для получения коллективного концентрата при низких расходах собирателей кислот предельного ряда в слабокислой среде (рН = 6,0-6,7) без подогревания пульпы.

Коллективный концентрат флотации после сушки разделяется без какой-либо дополнительной операции по удалению пленки флотореагентов электросепарацией по общепринятой схеме доводки гравитационного концентрата.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ле Ш.Х., Карелина Н.В., Карелин В.А. Особенности обогащения ильменитовых руд из Вьетнама // Материалы XXI Межд. науч.-практ. конф. (г. Томск, 21-24 сентября 2020 г.) / ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2020. – С. 457-458.
2. Ле Ш.Х., Карелина Н.В., Карелин В.А. Обогащение вьетнамских ильменитовых руд // Материалы X Межд. науч.-практ. конф. «Физ.-технич. пробл. в науке, пром. и медицине» (г. Томск, 9-11 сентября 2020). – С. 64-65.

# ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НИТРАТА АЛЮМИНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОЯТ

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

Научный руководитель: Карелин В.А., д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет 634050, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: nikolay\_shuravlev@mail.ru

Все существующие способы разделения U и Pu основаны на совместной экстракции  $U^{6+}$  и  $Pu^{4+}$  с частью ПД, последующей многоступенчатой реэкстракцией этих ПД, последовательной восстановительной реэкстракцией  $Pu^{4+}$  ураном (4+), а затем реэкстракцией  $U^{6+}$  (в виде уранилнитрата) азотной кислотой с концентрацией 0,5-0,8 М [1, 2]. Для устранения указанных недостатков разделение U и Pu необходимо проводить в шестивалентном состоянии в виде  $UO_2^{2+}$  и  $PuO_2^{2+}$  в присутствии высаливателя –  $Al(NO_3)_3$ . Процесс совместной экстракции U и Pu проводят в 7 М  $HNO_3$ , а затем  $PuO_2^{2+}$  восстанавливают нитратом урана (4+). При этом  $PuO_2^{2+}$  восстанавливается до  $Pu^{3+}$ , а  $U^{4+}$  окисляется до  $UO_2^{2+}$ . Затем  $UO_2^{2+}$  реэкстрагируется 0,7 М  $HNO_3$  в водную фазу.

Для изучения влияния концентрации высаливателя исследованы зависимости изменения  $\alpha_{Pu}$  от  $C_{Al(NO_3)_3}$  в растворах с концентрацией  $UO_2(NO_3)_2$  200-250 г/л. Результаты исследований представлены на рис. 1. При концентрации  $Al(NO_3)_3$ , 1 М (213 г/л)  $\alpha_U > 15$  и при увеличении концентрации высаливателя практически не меняется. Низкое значение  $\alpha_U$  объясняется низкой концентрацией ТБФ в ОФ.

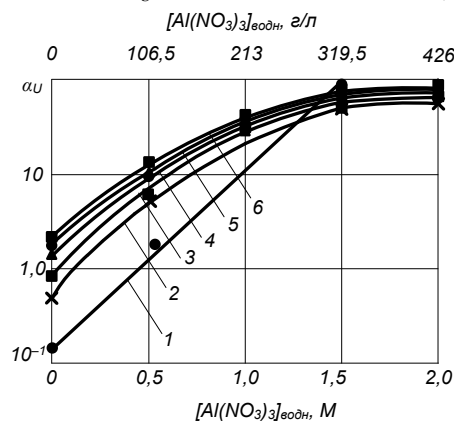


Рис. 1. Влияние концентрации нитрата алюминия на экстракцию урана 4,5 % ТБФ в изопаре.

Концентрация  $HNO_3$ : 1 – 0,5 М; 2 – 1 М; 3 – 2 М; 4 – 4 М; 5 – 7 М; 6 – 8 М

С увеличением кислотности среды  $\alpha_{Pu^{6+}}$  резко возрастает. Несмотря на то, что во всем диапазоне кислотностей  $\alpha_{Pu^{6+}} < 1$ , максимальное его значение, равное 0,78, наблюдается в 7 М  $HNO_3$ . Падение  $\alpha_{Pu^{4+}}$  и  $\alpha_{Pu^{6+}}$  при концентрации  $HNO_3$  более 7 М объясняется конкурирующим влиянием катионов  $H^+$  на процесс экстракции. Однако в 7 М  $HNO_3$  и 30 % ТБФ  $\alpha_{Pu^{4+}}$  и  $\alpha_{Pu^{6+}}$  практически сравниваются [3, 4].

Таким образом, выполненные исследования позволяют провести технологический процесс, в котором обеспечивается:

- совместное извлечение  $UO_2^{2+}$  и  $PuO_2^{2+}$  в ОФ 30 % ТБФ в изопаре,
- эффективность восстановительной реэкстракции  $PuO_2^{2+}$  до  $Pu^{3+}$  в 7М  $HNO_3$ ; в зоне вывода Pu необходимо поддержание высокой концентрации  $U^{4+}$ , а на подпитке концентрация ТБФ должна обеспечивать эффективность экстракции образующегося  $UO_2^{2+}$ ,
- полнота отделения  $Pu^{4+}$  от  $UO_2^{2+}$  и  $U^{4+}$ ,
- высокая степень реэкстракции  $UO_2(NO_3)_2$  из ОФ и его чистота,
- коэффициент очистки целевых продуктов от ПД – не менее  $10^9$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копырин А.А., Карелин А.И., Карелин В.А. Технология производства и радиохимической переработки ядерного топлива. – М: ЗАО «Издательство Атомэнергоиздат», 2006. – 576 с.
2. Мефодьева М.П., Крот Н.Н. Соединения трансплутониевых элементов. – М.: Наука, 1987. – 302 с.
3. Журавлев Н.А., Карелин В.А., Распутин И.В. Особенности применения нитрата алюминия при переработке ОЯТ // Материалы XXI Межд. науч.-практ. конф. ХХТ-2020 (г. Томск, 21-24 сентября 2020 г.) / ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2020. – С. 429-430.
4. Журавлев Н.А., Распутин И.В., Карелин В.А. Преимущества применения нитрата алюминия при переработке ОЯТ // Материалы X Межд. науч.-практ. конф. «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» (г. Томск, 9-11 сентября 2020). – С. 61-62.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФТОРИРОВАНИЯ ИЛЬМЕНИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Ле Шон Хай, Карелина Н.В., Карелин В.А.

Научный руководитель Жерин И.И., д.х.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail:son.hut2006@gmail.com

В настоящее время существуют две схемы переработки титансодержащих концентратов: сернокислотная и хлоридная. Сернокислотная технология приводит к загрязнению окружающей среды, а получаемый диоксид титана имеет высокую стоимость. Ежегодно в окружающую среду сбрасываются сотни тысяч тонн сульфатсодержащих отходов (в виде  $\text{CaSO}_4$ ). Хлоридный способ считается более благоприятным в экологическом отношении. Однако и здесь, образуются огромные количества газовых, жидких и твердых хлоридных производственных сбросов, а общее извлечение титана в очищенный хлорид не превышает 89 % мас. При мировом производстве пигментного  $\text{TiO}_2$  2750 тыс. т/год образуется 1467 тыс. т/год или 4890 т/сут вредных хлоридных производственных твердых отходов [1, 2]. Все это является предпосылкой для разработки и создания более прогрессивной и перспективной технологии по переработке титансодержащих концентратов, наиболее распространенный из них – ильменитовый. В связи с тем, что ильменитовые концентраты содержат значительные количества оксидов железа (до 40 %), то для их отделения проводят восстановительную плавку исходного сырья. При этом получают шлак, обогащенный оксидом титана, который направляют на фторирование. В табл. 1 представлен примерный состав ильменитовых концентратов

Таблица 1. Состав ильменитовых концентратов

Место-рождение	Состав ильменитовых концентратов, %												
	TiO <sub>2</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	U	Th
Ilmenite Hung Thinh I	51,74	23,31	16,73	3,35	2,48	0,06	0,23	1,02	0,14	0,12	0,05	0,0002	0,005

Разрабатываемая нами фторидная технология получения титана [3, 4] в виде высококачистого металлического порошка включает процессы фторирования ильменита, выделения образовавшегося  $\text{TiF}_4$  из газового потока и электролитического восстановления титана во фторидном расплаве.

Один из основных процессов предлагаемой технологии – фторирование ильменитовых шлаков. Для изучения особенностей фторирования ильменитовых шлаков выполнены кинетические исследования этого процесса. С использованием нескольких кинетических уравнений определены значения энергии активации и предэкспоненциального множителя (см. рис. 1).

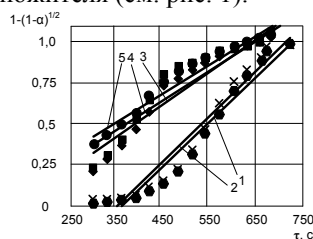


Рис. 1. Зависимость изменения степени превращения  $\alpha$  от времени  $\tau$  при температуре: 1 – 300 °C; 2 – 380 °C; 3 – 450 °C; 4 – 520 °C; 5 – 600 °C

Показано, что полученная зависимость наиболее точно описывается уравнением сокращающегося цилиндра:

$$1 - (1 - \alpha)^{1/2} = 0.0047 \cdot e^{\frac{261.82}{RT}} \cdot \tau .$$

Таким образом скорость процесса фторирования определяется диффузионными факторами, т.е. скоростью подвода газообразного фтора к частицам ильменитового шлака.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lane D.A. Pollution caused by waste from the titanium dioxide industry: Directive 89/428 // Boston College International and Comparative Law Review. 1991. V. 14. Issue 2 Symposium on European Community. Article 16. Environmental Law. URL: [lawdigitalcommons.bc.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=1500&context=iclr](http://lawdigitalcommons.bc.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=1500&context=iclr)
2. Vondruska M., Bednarik V., Sild M. Stabilization/solidification of waste ferrous sulphate from titanium dioxide production by fluidized bed combustion product. // Waste Management. 2001. V. 21, № 1. P. 6-11.
3. Karelin V.A. et al. Research of fluorination process of rutile concentrate // Procedia Chemistry. 2014. V. 11. P. 49-55.
4. Karelin V.A., Voroshilov F.A., Sazonov A.V., Karelina N.V. Processing of rutile concentrates by fluorination // International Journal of Civil Engineering (IJCE). 2020. V. 9. P. 9-26.

## ПЕРЕРАБОТКА ОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ФЛОКУЛЯНТОВ

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

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

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

E-mail:rasputin.ilia@yandex.ru

При растворении керамического ОЯТ образуется коллоидный раствор, содержащий труднорастворимые взвеси, количество которых варьируется в пределах 0,19-0,59 % коллоидных веществ от массы исходного топлива [1, 2]. Обычно коллоидные частицы удаляют центрифугированием на каскаде центрифуг. Недостаток такого метода – наличие в оборудовании движущихся частей, что может привести к выходу оборудования из строя. Метод флокуляции устраняет этот недостаток. Оборудование для флокуляции не имеет движущихся частей, не соприкасается с растворами ОЯТ, поэтому при его поломке можно быстро произвести ремонт не подвергаясь воздействию радиоактивного излучения.

Флокулянты «BESFLOC» обладают свойствами, позволяющими применять их для удаления коллоидных примесей из суспензий, образующихся при растворении керамического ОЯТ. Для исследований использованы 3 вида флокулянтов: неионогенные (высокомолекулярные флокулянты «K4000» и «K4020»), анионный («K4032» низкомолекулярный с низкой плотностью заряда) и катионный («K6651» среднемолекулярный с высокой плотностью заряда) [3].

Принципиальная возможность применения BESFLOC для осветления азотнокислых растворов ОЯТ с  $c_U=400-1000$  г/л проведена на неионогенном BESFLOC K4000. При использовании этого флокулянта произошло осаждение коллоидных частиц в растворе за ~15 мин. Для изучения возможности выделения платиновых металлов и определения возможности использования неионогенных BESFLOC K4000 и K4020, а также катионного BESFLOC K6651 и анионного BESFLOC K4032 исследовано разрушение коллоидных растворов, содержащих мелкодисперсный порошок Pt – платиновая «чернь». Изучено воздействие излучения интенсивностью 18,5 Рентген/ч на U-растворы с флокулянтom в течение 3-х суток. После проведения исследований внешний вид растворов не изменяется, а образовавшиеся агрегаты частиц не разрушаются.

Зависимость изменения оптической плотности  $I/I_0$  от времени для растворов  $UO_2(NO_3)_2$  с концентрацией 1000 г/л по U с мелкодисперсным порошком графита, после взаимодействия с флокулянтами BESFLOC показана на рис. 1.

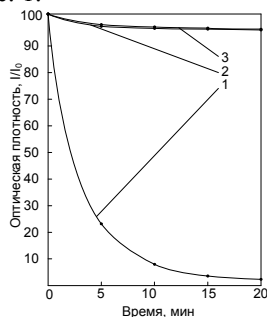


Рис. 1. Изменение оптической плотности растворов от времени проведения процесса при использовании: 1 –BESFLOC K4000; 2 –BESFLOC K4032; 3 –BESFLOC K6651

Незначительное увеличение размеров коллоидных частиц заметно только при длительном контакте (> 1 часа) с раствором анионного флокулянта BESFLOC K4032 и катионного флокулянта BESFLOC K6651. Образовавшиеся частицы обладают рыхлой структурой и при перемешивании разрушаются.

Использование неионогенного BESFLOC K4000 за 10 мин позволило уменьшить оптическую плотность раствора до 8 ед., а через 20 мин произошло практически полное осветление исходного раствора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Choi E.Y. et al. Progress in Natural Science: Materials International, 2015- 25(6) - 572-582.
2. Alekseev P.N. et al.: Physics of Atomic Nuclei, 2015 - 78(11,1).-P. 1264-1273.
3. Chen G.J. International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE (Xi'an; China, 2010- p. 1-4
4. Распутин И.В., Журавлев Н.А., Карелин В.А. Переработка облученного ядерного топлива с применением флокулянтов // Материалы XXI Межд. науч.-практ. конф. ХХТ-2020 (г. Томск, 21-24 сентября 2020 г.) / ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2020. – С. 448-449.



## ОЧИСТКА ТЕХНОГЕННЫХ РАСТВОРОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО РЕАКТОРА

Головков Н.И.<sup>1</sup>, Сосновский С.А.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Сосновский С.А.<sup>2</sup>, к.ф.-м.н., с.н.с.

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

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

E-mail: ssa777@mail.ru

Производства, связанные с химической обработкой руд и металлов, являются одними из наиболее вредных для окружающей среды. Поэтому вопросы эффективной утилизации жидких техногенных отходов (ЖТО) в настоящее время остаются весьма актуальными. Для группы промышленных ЖТО применение механического, биохимического, физико-химических и других методов очистки зачастую не даёт положительных результатов. Особенно затруднительна утилизация галогенсодержащих ЖТО, с большим набором и высокой концентрацией минеральных веществ. В этих случаях применяются термические методы обезвреживания, заключающиеся в окислении при повышенной температуре примесей в жидкости с образованием нетоксических соединений. Одним из термических методов обезвреживания промышленных ЖТО является термохимическое обезвреживание, проводимое в высокотемпературном распылительном реакторе (ВРР). Суть этого метода заключается в том, что жидкость в распылённом состоянии вводится в высокотемпературную зону ВРР. При этом капли жидкости полностью испаряются, токсические примеси подвергаются термохимическому разложению и окислению. Содержащиеся в жидкости минеральные примеси образуют твёрдые частицы, которые уносятся с газами и улавливаются в фильтрационном блоке установки. На этом принципе построены процессы, идущие в аппаратах по регенерации отработанных травильных растворов металлургических предприятий. В основе этих процессов лежит пиролиз отработанного раствора в распылительном термохимическом реакторе с последующим отделением твёрдой фазы в виде высокодисперсного порошка и конденсацией паров кислоты в массообменных колоннах.

В качестве примера применения высокотемпературного процесса утилизации жидких титансодержащих техногенных отходов, рассмотрим исследование переработки отработанного галогенсодержащего травильного раствора, образующегося после травления титановых сплавов. В отличие от известной классической схемы в данном случае мы имеем дело с регенерацией двух кислот. Кроме того, травлению подлежит не просто титан, а титановые сплавы с различными легирующими добавками, ассортимент и количество которых меняются в достаточно широком диапазоне. Совершенно очевидно, что при травлении определенная доля этих легирующих добавок вместе с основным металлом будет переходить в раствор. Относительно возможных реакций при терморазложении отметим основные процессы отдельно для хлоридов и фторидов титана, известные из литературы. Можно утверждать, что при травлении образуются галогениды трехвалентного титана. При нагреве уже свыше 100 °С наряду с потерей свободной кислоты и кислоты, освобождающейся при распаде различных комплексов. При дальнейшем нагреве они должны гидролизироваться за счет имеющихся паров воды и через цепочку гидроксо- и оксогалогенидов превратиться в TiO<sub>2</sub>. Указанная выше возможность возгонки некоторых галогенидов означает, что часть процессов может протекать не по классической схеме распылительной химической реакции, когда сначала идет обезвоживание и сушка капли диспергированного раствора, а затем топочимическая реакция в твердом остатке, а иным путем – по схеме химической конденсации. Продуктом такого процесса являются частицы размером не более 100 ангстрем. В нашем случае ВРР работал в режиме нисходящего прямотока. Пневматическая форсунка, через которую впрыскивается раствор, располагалась в центре крышки реактора. Подача реагента-теплоносителя происходила через тангенциальное отверстие верхней части распылительной камеры. Стендовый реактор работал с полным уносом твердой фазы. Проведено термодинамическое исследование физико-химических процессов, протекающих в ВРР, что позволило определить возможность образования определенных количеств химических соединений в данных условиях. Для термодинамического анализа используется универсальная программа TERRA.

В настоящее время прорабатывается плазмохимическая схема процесса регенерации отработанных фторсодержащих растворов титановых, стекольных и рудо перерабатываемых производств, с возвратом регенерированной кислоты. В докладе представлены обзорные данные, данные экспериментов, данные экспериментального оборудования, аналитические данные, общие выводы, выводы о перспективах использования этой технологии и список литературы. Показана физико-химическая и математическая модель процесса.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0028.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ РУД ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА

Головков Н.И.<sup>1</sup>, Сосновский С.А.<sup>2</sup>, Кудабаев Б.Б.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Сосновский С.А.<sup>2</sup>, к.ф.-м.н., с.н.с.

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

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

E-mail: ssa777@mail.ru

В последние десятилетия не затихает интерес к электроимпульсным методам переработки различных веществ. Это обусловлено проявлением множества интересных и полезных свойств и результатов, основанных на эффекте Воробьевых (высоковольтный наносекундный пробой диэлектрика) и эффекте Юткина (электрогидравлический эффект), присутствующих в различной степени в процессе высоковольтного импульсного пробоя в жидких диэлектриках и на границе раздела фаз жидкий/твёрдый диэлектрик. Стоит отметить, что многих подобных результатов трудно или практически невозможно достичь другими известными способами воздействия или обработки материалов в процессах очистки, дробления, сепарации, перемешивания и т.д. Совершенствование техники и технологии обогащения сырьевой базы промышленности позволило значительно расширить и вовлечь в переработку запасы новых месторождений благородных и редких металлов. Как правило, содержание ценных компонентов в рудах очень низкое, как и в концентратах, выделяемых из отвальных хвостов. Поэтому, полноценное извлечение ценных металлов из руды не может быть осуществлено без применения современных методов обогащения, в частности с помощью метода электроимпульсного дробления. Что касается дезинтеграции золотосодержащих и редкометалльных руд, то можно сказать, что этот ныне развивающийся метод в этом случае очень эффективен. Высокая селективность разрушения минеральных агрегатов, проявляющаяся в лучшем раскрытии зёрен отдельных минералов, в меньшем ошламовании продукта, создают возможность более полного извлечения полезного минерала в концентрат при очистки и обогащения руды. Так же отсутствует свойственное механическим способам загрязнение продукта аппаратным металлом, материалом футеровки и мелющих тел. Особенность разрушения материала с образованием новой поверхности обеспечивает улучшение технологических свойств продукта (повышение реакционной способности частиц материала). Существует возможность электроразрядной активации золотосодержащих и редкометалльных руд для рудоподготовительных и гидрометаллургических циклов. Предлагаемая установка электроимпульсного дробления позволяет исследовать и моделировать варианты технологического применения электроимпульсного воздействия на интересующие материалы для достижения желаемого результата обработки. Такая универсальность основана на применении нескольких различных разрядных камер, подключаемых к генератору высоковольтных импульсов. Предусмотрено подключение разрядных камер к замкнутому контуру циркуляции рабочей жидкости, в который по необходимости могут включаться различного типа фильтры и другие устройства для разделения. Сущность и отличительная особенность предлагаемой технологии в том, что обработка руды и техногенного сырья с использованием энергии, выделяемой при электроимпульсном воздействии, позволяет получать быстро измельченный и очищенный от примесей дисперсный продукт заданной крупности, который затем можно использовать непосредственно для последующего обогащения. Параметры установки: напряжение питания 220 В, 50 Гц; потребляемая мощность зависит от комплектации (200 Вт - 2 кВт); выходное напряжение ГИН – 40-160 кВ, в зависимости от комплектации до 200 кВ; максимальная энергия импульса - не менее 100 Дж, в зависимости от комплектации, до 1,2 кДж; максимальная частота импульсов - 1-10 Гц, зависит от комплектации и выходного напряжения; производительность установки зависит как от свойств материала, так и параметров установки. Последние достижения в электронной и высоковольтной импульсной технике (высокочастотные схемы преобразования напряжения, импульсные трансформаторы, импульсные конденсаторы повышенного ресурса работы и т.д.) позволяют резко сократить размеры элементов электротехнического обеспечения, существенно повысить надежность работы установок и за счет этого совершить технический прорыв в производственном использовании электроимпульсной технологии. Проведено термодинамическое исследование плазмохимических процессов, протекающих при электроимпульсной очистке руд, что позволило определить возможность образования определенных количеств химических соединений в данных условиях. Для термодинамического анализа используется универсальная программа TERRA. В докладе представлены обзорные данные, данные экспериментов, данные экспериментального оборудования, аналитические данные, общие выводы, выводы о перспективах использования этой технологии и список литературы. Показана физико-химическая и математическая модель процесса.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0028.

# ЭЛЕКТРОЭКСТРАКЦИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ И ПЕРЕРАБОТКИ РУД, СОДЕРЖАЩИХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Головков Н.И.<sup>1</sup>, Сосновский С.А.<sup>2</sup>, Сачков В.И.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Сосновский С.А.<sup>2</sup>, к.ф.-м.н., с.н.с.

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

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

E-mail: ssa777@mail.ru

Вопросы эффективной переработки руд содержащих редкие и редкоземельные элементы в настоящее время остаются весьма актуальными. Выбор того или иного метода переработки обуславливается, прежде всего, химическим составом. Особенно затруднительна переработка руд с большим набором и высокой концентрацией минеральных веществ. В этих случаях вызывает интерес рассмотреть нестандартные методы переработки, с получением полезных продуктов. Таким методом в нашем случае является разложение предварительно подготовленных жидкостных нанодисперсных взвесей в низкотемпературном плазменном потоке с образованием перспективных, нетоксических соединений.

Рассмотрим переработку монацита. Так как в монацитовом концентрате содержание оксида церия  $Ce_2O_3$  составляет 42,0 - 49,5 массовых %, оксида лантана  $La_2O_3$  21,8-25,0 массовых %, по отношению к другим редкоземельным элементам, то представляет интерес исследовать участок переработки монацитового концентрата на примере электроэкстракционно - плазменной технологии. Данная технология привлекательна возможностью сокращения реагентов и стадий процесса. Технология состоит из комбинации двух методов. Методом, основанным на нестационарной, резонансной электрохимии и методом плазмохимии. Образование гидроксида церия и гидроксида лантана в католите электроэкстракционной установки сопровождается переходом нитрат-ионов в анолит с рекуперацией азотной кислоты (рис. 1.).

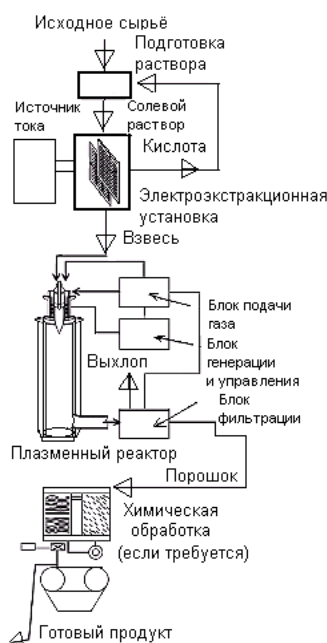


Рис. 1. Технологическая схема переработки

Для успешного решения проблемы предлагается комплексная переработка монацитового концентрата в щёлочно-карбонатных средах. Технологическая схема переработки включает операции вскрытия с использованием гидроксида калия, выделение тория и урана из кека в карбонатные растворы и их карбонатный экстракционный аффинаж, выделение редкоземельных элементов в азотнокислые растворы с их последующим разделением и переработкой

Расчёт равновесного состава продуктов реакции в условиях низкотемпературной плазмы проведен с использованием автоматизированной системы термодинамических расчетов TERRA. Правомочность использования термодинамически равновесного приближения оправдывается высоким уровнем концентрации энергии в рассматриваемых объемах и, следовательно, высокими скоростями протекания процессов превращения, мгновенно приводящими среду в состояние локального равновесия.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0028.

## ЭЛЕКТРО-МЕМБРАННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ИОНОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

Копцев М.О., Мухамбеталин Д.Б.,

Научный руководитель: Сохорева В.В., н.с.

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

E-mail: Maxkoptsev@gmail.com

Очистка и разделение редкоземельных металлов близких по массе является актуальной задачей в виду применения чистых металлов в катализаторах, магнитах, сплавы аккумуляторов, керамике и т. д. Одной из таких задач является разделение близких по массе изотопов  $^{177}\text{Lu}$  и  $^{176}\text{Yb}$ . Радионуклид  $^{177}\text{Lu}$  является перспективным для радионуклидной терапии. Одним из методов получения  $^{177}\text{Lu}$  является двухступенчатая реакция  $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$ . В ходе получения  $^{177}\text{Lu}$  остаются неконтролируемые примеси  $^{176}\text{Yb}$ , от которых требуется дальнейшая очистка. Получение изотопного материала, не содержащего примесей за короткий промежуток времени является технологией которую необходимо совершенствовать [1]. Основными способами очистки лютеция являются хроматография и амальгамный метод. Данные методы имеют свои недостатки, в частности не высокая скорость разделения хроматографией и загрязнение ртутью при амальгамном методе. Поэтому мембранный метод разделения может быть перспективным, химически чистым и энергетически мало затратным.

Для приготовления растворов, оксиды лантаноидов лютеция и иттербия переводились в соли путем растворения в соляной кислоте. Модельные растворы полярного диэлектрика содержащие соли лютеция и иттербия изготавливались из солей  $\text{Lu}_2\text{Cl}_3$  и  $\text{Yb}_2\text{Cl}_3$  в равных молярных соотношениях [2].

Для электро-мембранного разделения изготавливалась ассиметричные трековые мембраны. Изготовление трековой мембраны осуществлялось путем облучения пленки лавсан на циклотроне Р-7М альфа-частицами с энергией 28 МэВ. Облученные пленки дополнительно сенсибилизировались ультрафиолетом в течении 1 часа. Поры в облученных пленках формировались путем химического травления в натриевой щелочи NaOH [3]. Концентрацию и диаметр пор (рисунок 1) контролировали при помощи электронного микроскопа Hitachi «ТМ-1000».

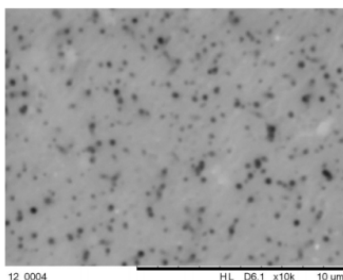


Рис. 1. Поверхность трековой мембраны с порами

Динамика переноса ионов через мембрану отслеживалась путем измерения Вольт-Амперной характеристики (ВАХ). На ВАХ мембраны, диаметр пор которых составляет 0,095 мкм, наблюдалось уменьшение тока в растворе соли иттербия. При этом ток для раствора соли лютеция с течением времени увеличивается. При одновременном прохождении через мембрану ионов лютеция и иттербия, ионный ток не уменьшался. В эксперименте с мембраной, диаметр пор которых около 0,05 мкм, ток в растворах солей лютеция и иттербия уменьшался как при раздельном прохождении, так и при одновременном прохождении ионов лютеция и иттербия через мембрану. Возможно, перенос ионов иттербия через мембрану, с диаметром пор 0,095 мкм, уменьшался из-за плотного заполнения пор. Для подтверждения данного результата, морфология поверхности мембраны, через которую проходили ионы лютеция и иттербия, была исследована при помощи метода Резерфордского обратного рассеяния. Результаты исследования показали, что на поверхности присутствуют атомы лютеция, а поры заполнены иттербием.

В заключении следует отметить, что выбор пористости мембраны, диаметра пор, а также плотности ионного тока позволит разделить даже ионы с близкими атомными массами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдырев П. П. и др. Электрохимический способ получения радионуклида Lu-177 высокой удельной активности // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. – 2016. – Т. 57. – №.3.
2. Chen L. et al. Comprehensive appraisal and application of novel extraction system for heavy rare earth separation on the basis of coordination equilibrium effect // Hydrometallurgy. – 2016. – Т. 165. – С. 351-357.
3. Чинзориг С., Мацымоха А. Г., Сохорева В. В. особенности формирования пор в пленках полиэтилентерефталат при облучении высокоэнергетическими протонами и  $\alpha$ -частицами // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва, 29 мая-1 июня 2017 г., г. Томск.—Томск, 2017. – 2017. – С. 500-501.

## СПОСОБ ПЕРЕРАБОТКИ РЕАКТОРНОГО ГРАФИТА В ОКСИДНО-КАРБОНАТНЫХ РАСПЛАВАХ

Шавалеев М.Р., Барбин Н.М., Терентьев Д.И.

Уральский институт ГПС МЧС России, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира 22

E-mail: marat-shavaleev@mail.ru

Применение атомных электростанций одно из перспективных и заманчивых направлений получения дешёвой электроэнергетики. Одним из значимых факторов дальнейшего эффективного развития атомной энергетики является обеспечение безопасного вывода из эксплуатации блоков АЭС и связанного с этим переработкой образующихся радиоактивных отходов, в частности реакторного графита. А учитывая тот факт, что в настоящее время наблюдается массовое техническое «устаревание» урано-графитовых энергоблоков вопрос о безопасной утилизации реакторного графита встает все острее.

Графитовые элементы со временем накапливают в себе небольшое количество урана ( $^{235}\text{U}$ ), элементов превращения ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и т. д.), радионуклиды (такие, как тритий и  $^{14}\text{C}$ ), а также продукты деления ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  и т. п.). Таким образом, радиоактивный графит сам является источником радиации, что создает дополнительные трудности при эксплуатации реактора и безопасной утилизации графитовой кладки. Графит активной зоны (блочный графит), половина графита бокового отражателя, весь графит верхнего отражателя и половина графита нижнего отражателя относятся к группе II твердых радиоактивных отходов (ТРО), а графитовые блоки кладки, загрязненные просыпями топлива и продуктами деления, к III группе ТРО [1].

Коллективом авторов [2] был предложен способ переработки реакторного графита в оксидно-карбонатных расплавах ( $\text{CuO-Na}_2\text{CO}_3\text{-K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CuO-Na}_2\text{CO}_3\text{-K}_2\text{CO}_3\text{-Li}_2\text{CO}_3$ ). Данный способ был предложен на основе полученных результатов компьютерного термодинамического моделирования при помощи программы «Терра», которая является эффективным и уникальным методом при исследовании разнообразных высокотемпературных процессов [3].

Сущностью предложенного способа является в создании требуемых условий, при нагревании облученного реакторного графита в оксидно-карбонатных расплавах, при которых углерод переходит в газообразное состояние и одновременно с этим радионуклиды (кроме  $^{14}\text{C}$ ) остаются в конденсированной фазе оксидно-карбонатного расплава.

На рис. 1 представлено изменение баланса конденсированного углерода в рассматриваемых системах ( $\text{CuO-Na}_2\text{CO}_3\text{-K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CuO-Na}_2\text{CO}_3\text{-K}_2\text{CO}_3\text{-Li}_2\text{CO}_3$ ) из которых видно, что тройная система карбонатов позволяет перерабатывать графит предложенным способом при температуре  $600^\circ\text{C}$ , тогда как двойная система – при  $800^\circ\text{C}$ .

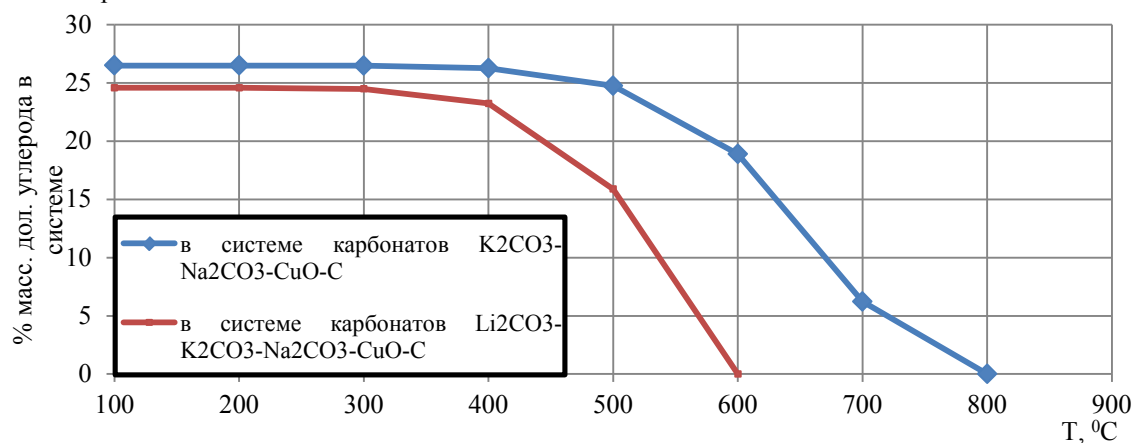


Рис. 1. График поведения баланса конденсированного углерода в рассматриваемых системах  
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скачек, М. А. Обращение с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС / М. А. Скачек. – М. : Изд. дом МЭИ, 2007. – 448 с.
2. Способ переработки беспламенным горением отходов реакторного графита : пат. 2644589 Рос. Федерация : МПК51 G 21 F 9/28 / Н. М. Барбин, М. П. Дальков, М. Р. Шавалеев ; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВО Уральский ГАУ, ФГБОУ Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России. - № 2015150583/15 ; заявл. 25.10.2015 ; опубл. 13.02.2018, Бюл. № 16. – 7 с.
3. Моисеев, Г. К. Применение термодинамического моделирования для изучения взаимодействий с участием ионных расплавов [Текст] / Г. К. Моисеев [и др.]. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 165 с.

## **КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОНН**

Сухарь П.А.

Научный руководитель: Орлов А.А., д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: pavel-suchar@yandex.ru

Ректификация – это важный и широко распространенный в промышленности тепло- и массообменный противоточный процесс разделения жидких гомогенных смесей на составляющие их компоненты. Ректификацию проводят в вертикальных цилиндрических устройствах – ректификационных колоннах, внутри которых для увеличения поверхности контакта фаз размещают контактные устройства – тарелки или насадки [1].

Большие энергетические затраты, которые требуются на организацию процесса, могут достигать 70% от общей стоимости разделения, являются одной из проблем процесса ректификации. Поэтому особенно актуально проектирование и оптимизация всевозможных ректификационных установок с целью нахождения оптимальной схемы разделительного процесса [2].

На основе ранее разработанного алгоритма для технологического и конструктивно-механического расчета тарельчатых и насадочных ректификационных колонн [3], создана компьютерная программа. Пользовательский интерфейс программы реализован с помощью графической платформы «Qt5».

Данная программа позволяет моделировать и оптимизировать процесс ректификации бинарных смесей с применением различных контактных устройств, а также производить расчет основных параметров и режимов работы ректификационных колонн.

Для подтверждения работоспособности программы произведен проверочный расчет тарельчатой колонны для разделения смеси «бензол-хлороформ».

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию/Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др. Под ред. Ю.И. Дытнерского, 2-е изд., перераб. и дополн. М.: Химия, 1991. – 496 с.
2. Компьютерный расчет процесса ректификации: Учеб. пособие/ Ф.Г. Гариева, А.А. Караванов, С.В. Снигирёв, В.И. Гаврилов. Казан.гос.технол.ун-т. Казань, 2006. 84 с.
- Лаптев А.Г., Конахин А.М., Минеев Н.Г. Теоретические основы и расчет аппаратов разделения гомогенных смесей: Учеб. пособие. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2007. – 426 с.

## **ПОИСК ЭФФЕКТИВНОЙ КОМБИНАЦИИ МЕТОДОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПОЛУЧЕНИЯ ТЯЖЕЛОЙ ВОДЫ**

Бережная А.Р.

Научный руководитель Орлов А.А., д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, г. Томск, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: arb13@tpu.ru

Тяжелой водой называют оксид дейтерия ( $D_2O$ ) с природным содержанием изотопов кислорода. Её применяют главным образом в качестве замедлителя нейтронов и теплоносителя в энергетических и исследовательских ядерных реакторах на тепловых нейтронах (тяжеловодные реакторы). Также перспективно использование тяжелой воды как источника  $D_2$  для термоядерного синтеза. Также тяжелая вода – источник дейтронов в ускорителях частиц, изотопный индикатор, растворитель в спектроскопии ядерного магнитного резонанса, она также замедляет биологические процессы, действует угнетающе на живые организмы [1]. Однако, несмотря на широкое применение, стоимость данного продукта довольно высока, порядка 200-250\$ за килограмм. Поэтому необходимы дальнейшие исследования, которые помогли бы снизить цену, ведь она непосредственно зависит от технологии производства. В зависимости от применения, а также экономических и технологических факторов выбирают наиболее эффективный метод наработки тяжелой воды в промышленных масштабах [2]. Выяснено, что достаточно эффективно использовать комбинацию двух методов, отдельно для начального и конечного концентрирования дейтерия. Так как первый этап наиболее энергоемок, то на нём необходимо использовать реакции изотопного обмена в системе вода-водород или вода-сероводород. Для конечного концентрирования подходят методы ректификации. В работе предложен вариант комбинации изотопного обмена в системе вода-сероводород, рассчитаны соответствующие установки и приведено сравнение данной комбинации с другими промышленными методами получения тяжелой воды.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Магомедбеков Э. П., Баранов С. В., Белки Д. Ю. Тяжелая вода – свойства, получение и применение в ядерной отрасли. М: ФГУП «Маяк», 2016.
2. Розен А. М. Теория разделения изотопов в колоннах. М.: Атомиздат, 1960. 436 с.

# OBTAINING AND CHARACTERISTICS OF RADIATION-MODIFIED PROTON-EXCHANGE POLYPROPYLENE MEMBRANES

Mukhambetalin D.B., Koptsev M.O.

Scientific supervisor: V.V. Sokhoreva, research fellow

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

E-mail: dan\_1196@mail.ru

Currently, fuel cells (FCs) are attracting more and more attention, as they are an alternative to reducing the use of fuel with high efficiency and low/zero emissions. A fuel cell is an electric generating device in which chemical energy is converted into electrical energy. Proton-exchange membrane fuel cells (MEA) usually use hydrogen as a fuel. Transportation and storage of hydrogen, as well as the purity of hydrogen, significantly complicate the use of hydrogen-air FCs. Therefore, applications of FCs with direct methanol conversion (DMFC) are widely considered, since the liquid nature of methanol, as well as its simple refueling, makes it attractive for use as a fuel instead of hydrogen.

Patent research conducted by the authors between 1960 and 2020 showed that there was a significant increase in interest in direct methanol fuel cells (DMFCs) because they do not store any electricity directly generated by them. They have advantages over conventional batteries such as longer battery life, reduced weight and easy charging. A wide range of fuel cell applications can also provide an alternative for stationary and transport power sources. The main component of FC is a polymeric proton-exchange membrane. The current use of a commercial perfluorinated proton-exchange membrane of the "Nafion" type for a fuel cell with direct methanol conversion has a number of limitations. This is due to the high methanol permeability through the membrane, low proton conductivity and high cost.

In this work, the possibility (in order to reduce the methanol crossover) of changing the properties of polymer membranes made of non-fluorinated polymers – polypropylene (PP) and high-pressure polyethylene (LDPE) – was investigated using the method of radiation-chemical modification [1]. When polymeric materials are modified by radiation grafting of functional polar groups, their chemical structure and, accordingly, their physical properties change.

The object of research were PP and LDPE films, the nominal thickness of the sample was 20-50  $\mu\text{m}$ . As a monomer for radiation modification, 10 % of acrylic acid (high purity grade) was used in a solution of a polarized dielectric. For the modification process of polymeric materials, the direct grafting method and the "Post-effect" grafting method were used. Samples of polymeric materials were placed in specially designed containers, which were filled with a grafting solution. Oxygen was removed from the container by bubbling the solution with an inert gas (helium, argon). To create centers for initiation of grafting polymerization, irradiation was performed on a 28 MeV helium ion beam extracted into the air. For uniform irradiation, the sample container was rotated at a speed of 30 rpm.

Irradiation was performed on a Cyclotron R7M TPU accelerator at room temperature and a dose rate of 700-1000 kGy. The grafting degree was determined by gravimetric method [2]. The grafted samples were analyzed using UV and IR spectroscopy. The surface morphology of grafted membranes was studied using a "Hitachi" scanning electron microscope. The methanol permeability was measured using a gas-liquid diffusion cell. Conductivity measurements were performed by impedance spectroscopy in a specially designed cell.

As a result of the research, the following results were obtained: the PP (radiation-modified) membrane with a thickness of 50  $\mu\text{m}$  had a methanol permeability of  $1.45 \cdot 10^{-8}$   $\text{cm}^2/\text{s}$ , and a proton conductivity of 94 mS/cm. For comparison, a sample of the "Nafion-117" membrane with a permeability of  $2.5 \cdot 10^{-6}$   $\text{cm}^2/\text{s}$  and a proton conductivity of 60 mS/cm was studied.

In conclusion, it should be noted that radiation modification of commercially available non-fluorinated polymers can be considered as a good alternative to replacing the expensive polymer "Nafion" in fuel cells with direct conversion of methanol.

This research was supported by Tomsk Polytechnic University CEP grant Number 202/2020

## REFERENCES

1. Sokhoreva V. V., Golovkov V. M. Radiation-chemical effect of helium ions on kinetics of styrene accumulation in polymer matrix of proton-exchange membrane // *Petroleum Chemistry*. – 2015. – Vol. 55. – No. 5. – P. 397-400.
2. Васильев В. П. Аналитическая химия. В 2 ч. Ч. 1. Гравиметрический и титриметрический методы анализа: Учеб. для химико-технол. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 143 с.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОБРАЩЕНИЯ ПОТОКОВ ФАЗ ПРИ ИЗОТОПНОМ ОБМЕНЕ

Дорофеева Л.И., Басс В.И.

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

E-mail: vadim2@tpu.ru

Процессы изотопного обмена, основанные на физико-химических принципах выделения целевого изотопа из исходной смеси, используются для получения моноизотопной продукции, их практическая значимость определяется с учетом термодинамических коэффициентов разделения, условий реализации обменного процесса, способов обращения потоков фаз и массообменными характеристиками.

Поиск методов уменьшения затрат на процесс обращения потоков фаз, увеличения полноты выделения целевого компонента (коэффициента обогащения) – важнейшие направления для теоретических и экспериментальных исследований по разработке эффективных способов разделения.

Особенности разделения изотопов и ионов щелочных элементов в противоточной системе с электрохимическим обращением потоков фаз рассмотрены для двухфазных обменных систем ионит-раствор при электромиграции [1] изотопнозамещённых форм в процессе электродиализа. Математическая модель обменного процесса учитывает электрохимический способ обращения потоков фаз при движущемся потоке ионообменника в колонне.

Поток вещества, переносимого через поперечное сечение колонны, определяется с учётом ёмкости ионообменника ( $\Gamma$ , мг-экв./г), площади поперечного сечения аппарата ( $S$ ), линейной скорости движения твёрдой фазы ( $V$ , см/с) и плотности ионообменника ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>):

$$J = \rho \cdot \Gamma \cdot S \cdot V$$

Величина отбора обогащённого продукта ( $P$ ) определяется в зависимости от потока вещества, пропускаемого через ионообменную колонну и регулируется исходя из прироста концентрации по ступеням ( $\Delta n$ ):

$$\Delta C = \varepsilon \cdot C_1 (1 - C_1) \Delta n - \frac{P}{J} (C_p - C_1) \Delta n$$

Число ступеней определяется с учётом зависимости величины эквивалентной теоретической ступени от скорости переноса вещества [2] в фазе ионита (внутренняя диффузия), жидкой фазе (внешняя диффузия) и от перемешивания по высоте колонны (продольная диффузия):

$$h = \frac{\gamma_c}{\beta_m} V + \frac{1}{27} \left[ \frac{\lambda}{1 - \lambda} \right]^2 \frac{R^2}{D_c} V + \frac{D^*}{(1 - \gamma_c) V}$$

Здесь  $\beta_m$  – внутридиффузионный кинетический коэффициент,  $\gamma_c$  – доля общего количества катионов, приходящихся на раствор,  $D_c$  – коэффициент диффузии в фазе раствора,  $D^*$  – коэффициент продольного перемешивания.

Моделирование электроионитного процесса замещения ионных и изотопных форм в процессе электродиализа проводилась с учётом времени диффузии ионов через рабочую камеру электродиализатора, работающего в динамическом режиме подачи потока из обменной колонны, а также условий переноса в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Анализ кинетических характеристик транспорта ионов показывает, что скорость перемещения точки фронта концентрационной волны по межкамерному пространству зависит от ионообменной ёмкости ионита ( $C_E$ ), pH раствора [3], других характеристик процесса и хорошо описывается уравнением, учитывающим уменьшение концентрации замещаемых ионов при вытеснении зоной, обеднённой по легкому изотопу:

$$X_0^2 = - \frac{i}{F C_E} \frac{\alpha}{\left( 1 + \frac{(1 - \alpha) J}{A} \right)^2}$$

Здесь  $\alpha$  – отношение подвижностей,  $F$  – число Фарадея,  $J_A$  – доля иона  $A$ ,  $i$  – плотность тока.

Использование двухфазной ионообменной системы в качестве среды для электромиграционного разделения значительно расширяет область практического применения электроионитных процессов и является эффективным средством обращения потоков фаз.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вергун А.П., Дорофеева Л. И., Вергазов К. А. Электрорегенерация ионита при разделении изотопов в обменных противоточных колоннах. // Материалы Всероссийской научно-технической конф., В. 5 – Красноярск, 1999. – с. 190-191.
2. Дорофеева Л.И. Моделирование процессов разделения в обменных двухфазных системах // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции «Общество – наука – инновации» (Иркутск, 22.12.2019 г.). – Стерлитамак: АМИ, 2019. – с. 11-13.
3. Разделение изотопов и ионов с близкими свойствами в обменных процессах с электрохимическим обращением потока фаз [Электронный ресурс] / А.П. Вергун, И.А. Тихомиров, Л. И. Дорофеева // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]– 2003. – Т. 306, № 3. – С. 66-70.



*Секция 6*

**ИЗОТОПЫ В БИОЛОГИИ, МЕДИЦИНЕ И ЭКОЛОГИИ**

*Председатель: к.ф.-м.н., доцент Рыжакова Н.К.*

# СОРБЦИОННОЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ $^{137}\text{Cs}$ ИЗ МОРСКОЙ ВОДЫ

Бежин Н.А.<sup>1,2</sup>, Довгий И.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

<sup>2</sup>Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

E-mail: nickbezhin@yandex.ru

Одним из последствий аварии на Чернобыльской АЭС является загрязнение Черного моря радионуклидами техногенного происхождения, основным из которых является  $^{137}\text{Cs}$  с периодом полураспада 30,17 лет. Использование селективных сорбентов позволяет проводить быстрое извлечение и концентрирование  $^{137}\text{Cs}$  из больших объемов природных вод, что значительно упрощает аналитическую процедуру по сравнению с процессами соосаждения. При этом в мировой науке наблюдается эволюция и совершенствование сорбционных материалов. Если в одних из первых работ по извлечению  $^{137}\text{Cs}$  из морской воды использовался гексацианоферрат меди, то в настоящее время большее применение получили сорбенты на акрилатном носителе, импрегнированные молибдофосфатом аммония AMP-PAN и смешанным гексацианоферратом никеля-калия KNiFC-PAN. В тоже время высокие степени извлечения  $^{137}\text{Cs}$  из морской воды показывают сорбенты на основе целлюлозы и силикагеля.

Сведения о зависимости эффективности извлечения  $^{137}\text{Cs}$  от количества пропущенной морской воды позволяют рассчитывать полноту извлечения радионуклида для проб различного объема, что позволит еще более упростить процедуру радиоаналитического определения. Поэтому целью настоящей работы является сравнение эффективности извлечения цезия из морской воды промышленно-выпускаемыми сорбентами и построение кривых зависимости адсорбции от объема пропущенной морской воды.

Этой задаче наиболее соответствуют сорбенты, выпускаемые на территории Российской Федерации, по причине низкой стоимости и высокой коммерческой доступности. Нами изучались сорбенты: Анфеж, Никет, Уникет (ООО НПП «Экосорб»), ФСС, ФД-М (ООО НПП «Эктос-Атом»), Axionit RCs (АО «Аксион – Редкие и Драгоценные Металлы»), Термоксид-35, Термоксид-3А (АО ПНФ «Термоксид»), НКФ-Ц (УрФУ).

Были построены выходные кривые сорбции цезия (рис. 1) при различной скорости пропускания морской воды (3, 6, 15 и 30 мл/мин), отобранной в Севастопольской бухте Черного моря. Определены ДОЕ и ПДОЕ сорбентов. Установлено, что максимальное извлечение цезия к моменту появления в фильтрате ионов цезия достигается при использовании сорбентов марки ФД-М, Никет и Уникет, а к моменту уравнивания состава фильтрата с составом исходного раствора – сорбентов Никет и Уникет.

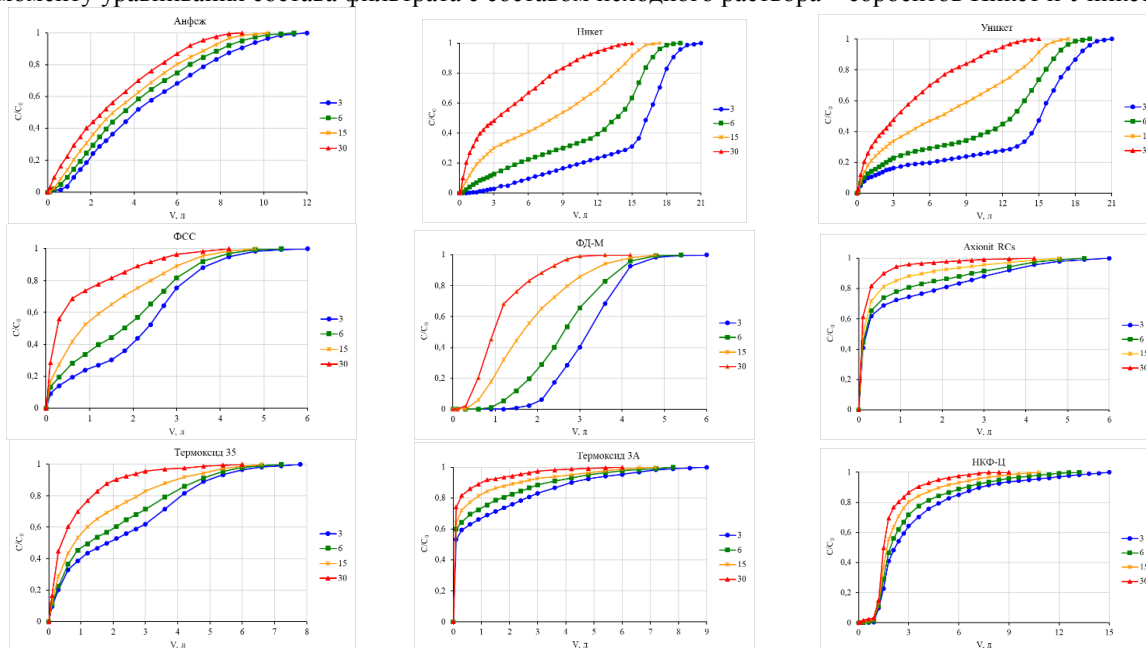


Рис. 1. Выходные кривые сорбции цезия при различных скоростях пропускания морской воды

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-33-60007 (конкурс «Перспектива»), государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Океанологические процессы» № 0827-2020-0003).

## ПУТИ ДИФФУЗИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛАХ

Ван Цайлунь

Научный руководитель: Мышкин В. Ф., д.ф.-м.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: caylun1224@gmail.com

Многообразие типов кристаллических решеток и их структурных особенностей обеспечивает различные механизмы сорбции радиоактивных отходов (РАО) на минералах, образующих глину. Чем больше энергия взаимодействия иона и кристаллита, тем надежнее фиксации на глине радионуклидов. Механизм взаимодействия между РАО и глинистыми минералами различен в зависимости от химических свойств радионуклидов, типа глинистых минералов и условий окружающей среды.

Различные химические свойства радионуклидов, типы глинистых минералов и различные условия окружающей среды определяют разные механизмы их взаимодействия. Существует два основных механизма взаимодействия радионуклидов, с обменом катионов из глины и из водного раствора. В первом случае происходит краевая адсорбция и далее ионный обмен между в межслоевом пространстве глины. Например, радиоактивные элементы щелочных металлов и щелочноземельных металлов ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) могут напрямую диффундировать между слоями глины путем катионного обмена, заменяя подвижные ионы. Во втором случае ион в основном взаимодействует с краевым центром и перемещается по поверхности [1].

На рис. 1 приведена картина распределения энергии связи иллита с ионами  $\text{Li}^+$  (a),  $\text{Rb}^+$  (b),  $\text{Cs}^+$  (c). Сравнение рисунков показывает, что схожи распределения по расчетной ячейке потенциальной энергии связи ионов  $\text{Rb}^+$  и  $\text{Cs}^+$  с кристаллитом иллита. Сравнение энергий связи ионов  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Cs}^+$  с кристаллитом иллита позволяют выявить имеющуюся закономерность - энергия связи изменяется в диапазоне 24,451-24,476 эВ. При этом геометрические размеры потенциальных ям и барьеров для  $\text{Rb}^+$  больше, чем для  $\text{Cs}^+$ . Необходимо отметить, что смежные потенциальные ямы для энергии связи иллита с ионами  $\text{Li}^+$  практически сливаются (см. рис. 1,а).

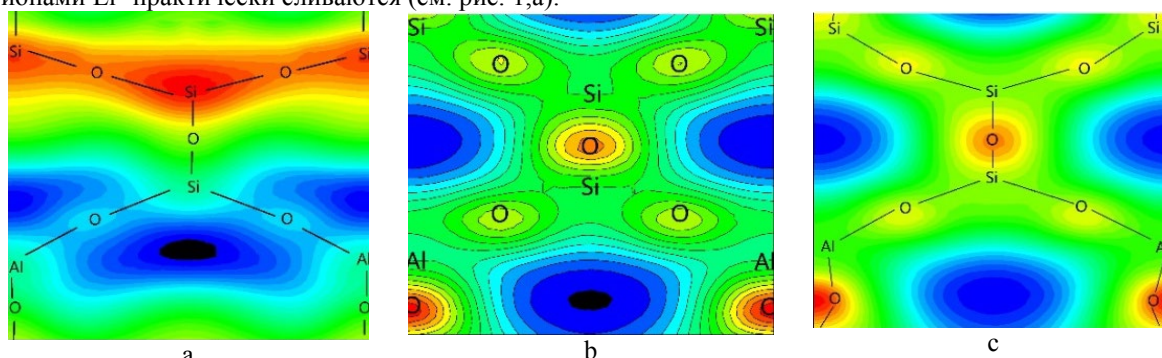


Рис. 1. Распределение по расчетной ячейке энергии связи иллита с ионами  $\text{Li}^+$  (a),  $\text{Rb}^+$  (b),  $\text{Cs}^+$  (c)

Области, имеющие энергию связи в некотором диапазоне, можно объединить в несколько групп. Для этого на рис. 1,б приведены линии, разделяющие 16 областей энергий связи, в которых энергия находится в диапазоне  $E_{i+1} - E_i = 1,7 \text{ эВ}$ . В таблице 1 приведены статистические данные областей равных энергий, в которой вместо общей части всех чисел «244» использован «\_».

Таблица 1. Распределение по расчетной ячейке энергии связи иона  $\text{Rb}^+$  и иллита

№ зоны	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12-15	16
минимальная энергия, эВ	_76.1	_74.4	_72.8	_71.1	_69.5	_67.8	_66.1	_64.5	_62.8	_61.2	_59.5	_52.9	_51.2
доля площади, %	7,6	11,3	5	7,1	8,8	8,4	18,5	13,4	6,7	7,6	2,5	2,2	0,8

Основная часть времени ион  $\text{Rb}^+$  находится над областью «1», где энергия связи не превышает 24476,1 эВ. При этом площадь области с минимальной энергией не превышает 7,6% от общей площади расчетной ячейки. Поэтому с высокой вероятностью можно считать, что начальной точкой перехода при диффузии является область «1». Расчетные коэффициенты диффузии ионов щелочных металлов значительно меньше экспериментально определяемых величин. Это указывает на невозможность диффузии ионов щелочных элементов внутри кристаллита сухого иллита.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупская В. В., Бирюков Д. В., Белоусов П. Е., Лехов В. А., Романчук А. Ю., Калмыков С. Н. Применение природных глинистых материалов для повышения уровня ядерной и радиационной безопасности объектов ядерного наследия // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 2 (3). — С. 30—43.

## ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ РАО В МИНЕРАЛЕ ИЛЛИТА

Ван Цайлунь

Научный руководитель: Мышкин В. Ф., д.ф.-м.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: caylun1224@gmail.com

Иллит - глинистый минерал, характеризующийся октаэдрическими центрами оксида алюминия, расположенными между двумя тетраэдрическими минеральными листами диоксида кремния и одной шестой частью ионов  $\text{Si}^{4+}$ , были заменены из тетраэдрических положений ионами  $\text{Al}^{3+}$ , приводят к отрицательно заряженным поверхностям. Помимо их физических свойств, таких как пластичность, поведение при набухании или низкая проницаемость, одной из наиболее важных характеристик глинистых минералов является их обычно сильная катионная адсорбция [1].

В докладе приводятся результаты моделирования по пяти возможным траекториям распространения катионов в сухом иллите. Очевидно, что возможна диффузия по широкому коридору вдоль направления выстраивания атомов Al. Максимальная величина барьера по «долине» потенциальной энергии 23539,6 эВ, а в перпендикулярном направлении - 23538,6 эВ при максимальной величине энергетической ямы 23541,8 эВ, минимальный барьер по «по долине» составляет 23541,5 эВ. Анализ кривых на рис. 1, b показывает, что вероятность скачка между двумя энергетическими ямами зависит от исходной координаты иона. Очевидно, что энергетическое состояние конечной точки прыжка не оказывает существенного влияния на вероятность перехода через энергетический барьер при диффузии.

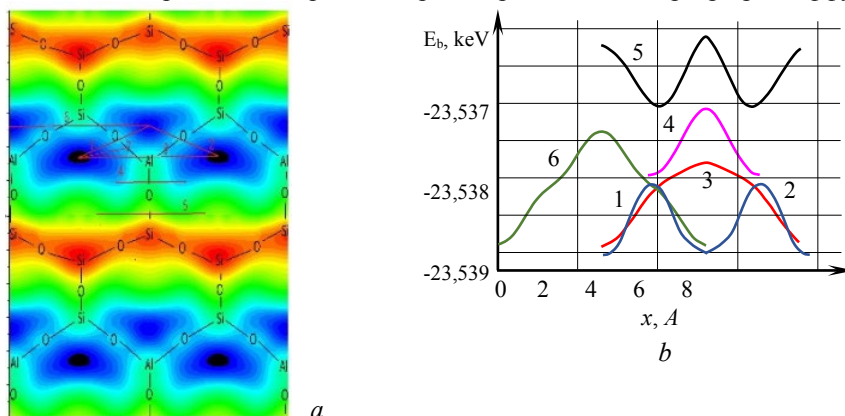


Рис. 1. Графики распределения энергии связи  $\text{Li}^+$  с иллитом (a), по некоторым направлениям (b)

Рассчитаны коэффициенты диффузии ионов  $\text{Li}^+$  между в межслойном пространстве иллита по заданным линиям, показанным на рис. 1, a. Эти данные приведены в таблице 1. Аналогичные данные для ионов более тяжелых щелочных элементов значительно меньше (в  $10^{10}$  и более раз), чем для ионов  $\text{Li}^+$ . Из величин коэффициентов диффузии ионов различных щелочных металлов следует следующее заключение – в сухом минерале иллита, не содержащем воду в межслоевом пространстве, невозможна диффузия  $\text{Li}^+$ . В указанных условиях диффузия ионов других щелочных элементов затруднена.

Таблица 1. Коэффициенты диффузии  $\text{Li}^+$  по различным направлениям в минерале иллите

траектория	1	2	3	4	5	6	7
$D, \text{m}^2/\text{c}$	$4,84 \cdot 10^{-18}$	$4,84 \cdot 10^{-18}$	$3,20 \cdot 10^{-25}$	$1,38 \cdot 10^{-22}$	$2,34 \cdot 10^{-24}$	$2,28 \cdot 10^{-33}$	$3,19 \cdot 10^{-25}$

Из таблицы 1 видно, что коэффициент диффузии  $\text{Li}^+$ , при наличии в расчетной ячейке лишь одного иона вместо трех, по наиболее «эффективной» для диффузии траектории в сухом минерале иллите составляет  $D = 4,84 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2/\text{c}$ . С учетом того, что коэффициенты внутренней диффузии по другим направлениям значительно меньше, эффективный коэффициент диффузии, определяемый прыжковым механизмом, значительно отличаются от данных экспериментальных исследований  $10^{-12} \text{ m}^2/\text{c}$  [2]. Это указывает как на невозможность диффузии  $\text{Li}^+$  в сухом иллите. Возможна миграция радионуклидов по внешней поверхности кристаллита глины, которая также представляется маловероятной. Однако, наличие воды в межслойном пространстве значительно облегчает процесс диффузии катионов. При отсутствии микрофильтрации также необходимо учитывать вероятность проникновения иона внутрь кристаллита, а также пористость глинистой массы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maria Marques Fernandes, Nóra Vér, Bart Baeyens, Predicting the uptake of Cs, Co, Ni, Eu, Th and U on argillaceous rocks using sorption models for illite, Applied Geochemistry 59 (2015) 189–199.
2. Melkior T., Yahiaoui S., Thoby D. at all. Diffusion coefficients of alkaline cations in Bure mudrock // Physics and Chemistry of the Earth– № 32. –2007 – P. 453–462.

# ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИИ НА БАРЬЕРНЫЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛА ИЛЛИТА

Ван Цайлунь, Еремеев Р.С.

Научный руководитель: Мышкин В. Ф., д.ф.-м.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: saylun1224@gmail.com

Глинистые минералы широко используются при захоронении радиоактивных отходов (РАО). РАО могут разрушать структуру минерала с образованием вакансий атомов. Такие вакансии возможны также в природных глинах. Например, в диоктаэдрических смектитах одна треть октаэдрических позиций может быть вакантна. Таким образом, октаэдрический лист с вакантными цис-узлами называется цис-вакантной (ЦВ) конфигурацией (рис. 1,а), а с вакантными транс-узлами называется транс-вакантной (ТВ) конфигурацией (рис. 1,б). Природные диоктаэдрические смектиты охватывают широкий диапазон пропорций ЦВ и ТВ структур, и обычно монтмориллониты являются ЦВ, а иллиты - ТВ [1].

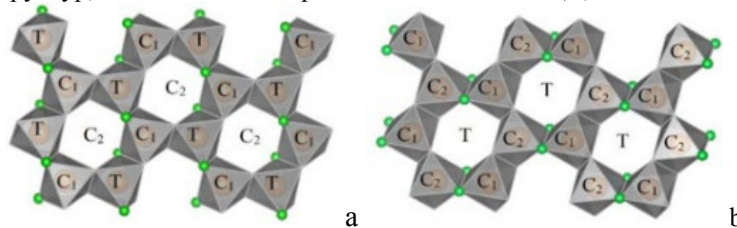


Рис. 1. Октаэдрический лист (а) цис-вакантной конфигурации и (б) транс-вакантной конфигурации в диоктаэдрических смектитах [2]. Зеленые круги – ОН, С1, С2 - цис-октаэдр, Т – транс-октаэдр

Моделировали энергию взаимодействия иона лития с кристаллитом иллита, имеющего вакансию в структуре. Карта распределения энергии связи иона лития со структурой иллита, в которой отсутствует один атом кремния в тетраэдрическом слое, приведена на рис. 2. На рис. 2, а приведены схема элементарной ячейки, содержащей вакансию кремния, двумерное распределение энергий связи в ячейке с вакансией. В целом картина аналогична с распределением энергии в бездефектном иллите.

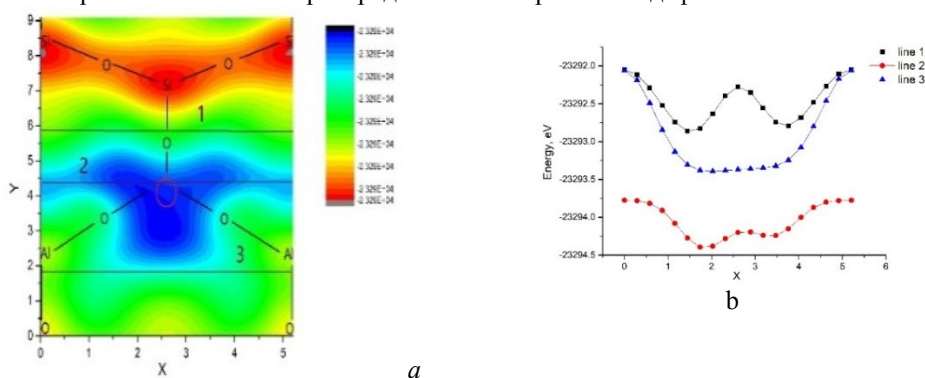


Рис. 2. Энергия связи  $\text{Li}^+$  с иллитом, имеющим вакансию в узле кремния: а – двухмерная картина распределения энергии вокруг вакансии, б – распределение энергии связи по заданным направлениям

При наличии вакансии области низких энергий взаимодействия с ионом соседних элементарных ячеек соединяются. Это означает, что появляется направление с более низким энергетическим порогом, чем в неразрушенной структуре, представляющим собой канал для «быстрой» диффузии межслоевого иона. Такой скачок при диффузии возможен на третью позицию, в отличие от второй для целостной структуры иллита. При малых флюэнсах количество таких внутренних вакансий незначительно и влиянием вакансии на эффективную величину коэффициента диффузии можно пренебречь.

При переходе через область с высокой энергией по направлению 1, содержащей кислород (цепь атомов: Si-O- вакансия) перепад энергии составляет 0,5976 эВ, а возле вакансии (цепь атомов: вакансия) – 0,1979 эВ. Вакансия приводит к существенному уменьшению энергетического барьера между соседними структурами, формирующими энергетическую яму.

Очевидно, что одновалентные ионы щелочных элементов также могут быть захвачены в потенциальную яму вакансии атома без образования химической связи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tsipursky, S.I.; Drits, V.A. The distribution of octahedral cations in the 2:1 layers of dioctahedral smectites studied by oblique-texture electron diffraction. *Clay Miner.* 1984, 19, 177–193.
2. Wang, X.; Li, Y.; Wang, H. Structural Characterization of Octahedral Sheet in Dioctahedral Smectites by Thermal Analysis. *Minerals* 2020, 10, 347.

# ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ НАКОПЛЕНИЯ КОЛЛОИДНОГО ГЕПТАСУЛЬФИДА РЕНИЯ

Исаева Е.А.

Научный руководитель: Егоров Н.Б., к.х.н., доцент

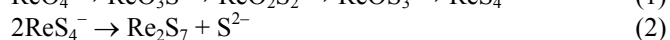
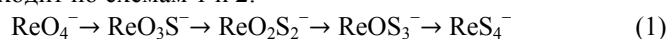
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: egorov@tpu.ru

В клиническую практику раннего лечения онкологических заболеваний все шире внедряются радионуклидные методы с применением нанокolloидных радиофармпрепаратов, позволяющих улучшить диагностику распространенности опухолевого процесса. Все известные нанокolloидные препараты изготавливаются на основе соединений, образующих устойчивые гидрозолы. Наночастицы гептасульфида рения ( $\text{Re}_2\text{S}_7$ ), меченные гамма-излучающими радионуклидами ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ,  $^{186}\text{Re}$ ) успешно применяются для непрямо́й лимфосцинтиграфии и в технике интраоперационной хирургии. Являясь рентгеноаморфными, они хорошо адсорбируют другие атомы и молекулы, а неправильная форма и подходящий размер позволяют использовать их в качестве объекта ультрафагоцитоза.

Существует несколько способов получения  $\text{Re}_2\text{S}_7$ , из которых два метода получения  $\text{Re}_2\text{S}_7$  являются наиболее известными и изучаются давно. В первом методе применяется токсичный сероводород, наличие которого недопустимо в медицинских препаратах, а во втором методе-тиосульфатном, который представляется более предпочтительным, так как позволяет избежать применения токсичного сероводорода, образуется значительное количество элементарной серы, которая адсорбирует коллоидный  $\text{Re}_2\text{S}_7$ , что снижает его выход и требует дополнительной нейтрализации раствора и его очистки от элементарной серы, а также получению полидисперсных систем с частицами различными по размерам – от нанометров до микрометров. В то время как оптимальными размерами частиц  $\text{Re}_2\text{S}_7$  считаются частицы с диаметром от 20 нм до 140 нм.

Для преодоления недостатков прежних способов синтеза мы впервые предлагаем использовать фотохимический метод, который осуществляется без использования токсичных реагентов и в слабокислой среде. Для фотохимического получения  $\text{Re}_2\text{S}_7$  мы предлагаем использовать водные растворы, содержащие перренаты и тиосульфаты щелочных металлов или аммония. Предполагается, что образование  $\text{Re}_2\text{S}_7$  происходит по схемам 1 и 2.



Целью настоящей работы являлось изучение кинетики накопления продуктов фотолиза при УФ-облучении водных растворов, содержащих перренаты и тиосульфаты щелочных металлов или аммония, а также влияние на их накопление различных добавок хиреагентов.

В работе использовали тиосульфат натрия ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , ч.д.а.), тиосульфат калия ( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , Sigma-Aldrich), тиосульфат аммония ( $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ , Sigma-Aldrich), перренат аммония ( $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ , ч.д.а.). Перренаты натрия ( $\text{NaReO}_4$ ) и калия ( $\text{KReO}_4$ ) получали из порошка рения марки AP-0 через рениевую кислоту.

Накопление продуктов фотолиза в растворах, согласно данным спектрофотометрии, происходит линейно, что позволяет предположить, что кинетика накопления продуктов фотолиза описывается уравнением нулевого порядка. При этом скорость накопления продуктов фотолиза зависит от типа солей, используемых для облучения. Наименьшая скорость накопления продуктов фотолиза у натриевых соединений. Она в  $\sim 1,7$  раза меньше по сравнению, чем у аммониевых соединений, и в  $\sim 1,3$  раза меньше по сравнению с калиевыми соединениями. Разность в скорости накопления продуктов фотолиза, по всей видимости, связана с различной скоростью образования первичных продуктов фотолиза тиосульфат-ионов при облучении водных растворов тиосульфатов аммония, калия или натрия. Образующиеся при фотолизе первичные радикал-ионы далее вступают во взаимодействие с перренат-ионами с образованием тиоперренатов, имеющих различную степень замещения.

С помощью спектрофотометрии (по изменению оптической плотности) была проведена проверка некоторых ионов и соединений на выход тиоперренатов при фотолизе растворов, содержащих  $6 \times 10^{-3}$  моль/л  $\text{NaReO}_4$  и 0,4 моль/л  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ . Определяли влияние следующих соединений – тиоацетамид и тиомочевина, а также ионов  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{CNS}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  и  $\text{PO}_4^{3-}$ . Растворы соединений добавляли в концентрации  $3 \times 10^{-3}$  моль/л. Результаты показывают, что добавка к фотолизуемому раствору  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , тиоацетамида или тиомочевины снижают выход тиоперренатов, добавка  $\text{CNS}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  не влияют на выход, а добавка  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{S}^{2-}$  или  $\text{SO}_3^{2-}$  незначительно повышают выход тиоперренатов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90217.



# МОДЕЛЬ ФЛУКТУАЦИИ НЕЙТРОННОГО ФОНА В ГЕОСИСТЕМАХ

Масенко С.А.

Научный руководитель: Беденко С.В., к. ф.-м. н., доцент  
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: Mongusch-S@mail.ru

Использование атомной энергии в мирных целях позволяет обеспечить в должной мере возрастающие потребности в электроэнергии в связи с ростом технического прогресса, где каждый дом имеет большое количество потребителей энергии такие как: холодильники, микроволновки, компьютеры, телевизоры, смартфоны и др. Однако рост использования ядерных источников энергии требует постоянного контроля над ними. Актуальным требованием к атомной энергетике является повышение безопасности систем, эксплуатирующих источники энергии. Для этого необходимо повысить точность регистрации частиц и мониторинг флуктуации радиоактивного фона в экосистеме, который сигнализирует о наличии радиоактивных веществ в окружающей среде. Существующие работы [1,2,3], связанные с регистрацией актинидов в почве основаны на практическом методе отбора проб с длительной их подготовкой к измерению. Описанная в настоящей работе модель выхода нейтронов из мелкозернистой смеси применима для флуктуации нейтронного фона в геосистемах и позволит определять наличие актинидов в почве, иловых отложениях в более короткие сроки. Физический расчет модели производился в программной среде Phits, разработанной группой институтов JAEA, RIST, KEK. Данная среда позволяет моделировать перенос частиц с использованием метода Монте-Карло в широком диапазоне энергий с применением библиотек ядерных данных [4].

Для верификации модели рассматривались источники с мелкозернистой смесью диоксидов Am, Pu и Be. Данные источники нашли широкое применение из-за минимальных габаритных размеров и относительного длительного срока эксплуатации, который определяется в частности периодом полураспада. Выход нейтронного излучения из таких источников обеспечивается реакцией  $(\alpha, n)$ , а также они имеют свой характерный спектр, который изменяется в зависимости от размера зерен, состава и наличием примеси легких элементов в смеси. Из представленных на рынке источников радиоизотопных источников выбрали Amersham X.14 с известным составом активной части и конструкционного материала. Габаритные размеры активной капсулы составляли в диаметре 2,52 см и в высоту 5,52 см. Относительный вес, входящих в состав элементов мелкозернистой смеси активной части, указан в работе [5]. Толщина оболочки капсулы источника 0,24 см, выполненной из нержавеющей стали [Amersham/Searle 1976], которая имеет следующий состав (% wt): C – 0.004; Mn – 1.59; P – 0.011; S – 0.008; Si – 0.37; Cr – 16.96; Ni – 13.61; Mo – 2.29; Fe – 65.16.

Выход нейтронов в активной части определялся реакцией  $(\alpha, n)$  и спонтанным делением. Спектр нейтронов радиоизотопного источника рассчитан в 52 группах. Интегральный поток нейтронов в активной части составил  $2,03 \cdot 10^7$  см<sup>2</sup>. Наибольшая доля нейтронов в спектре приходится на диапазон энергии 4-6 МэВ. Интегральный ток нейтронов с поверхности источника составил  $1,69 \cdot 10^7$  см<sup>2</sup>, что хорошо согласуется с реальным значением в работе [6].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Romanchuk Anna Yu, Vlasova Irina E., Kalmykov Stepan N. Speciation of actinides in groundwater samples collected near deep nuclear waste repositories // Journal of Environmental Radioactivity — 2018 — Vol. 192 — pp. 334—341.
2. Camacho A. Distribution of uranium isotopes in surface water of the Llobregat river basin (Northeast Spain). // Journal of Environmental Radioactivity — 101 — 2010.
3. Walencik A. Long lived natural radioactive elements in spa waters of southern Poland. // Acta physica polonica — 2 — 2013.
4. T.Furuta, T. Sato. Implementation of tetrahedral-mesh geometry in Monte Carlo radiation transport code PHITS. // Phys. Med. Biol., — 62 — 4798-4810 — 2017.
5. Tsujimura, Norio; Yoshida, Tadayoshi. Calculation of anisotropy factors for radionuclide neutron sources // JAEA-Research 2008-034 — pp. 43.
6. A. Saeeda, Sherif S. Nafeea, Salem A. Shaheena, Gehan A. Raouf b, Y. Al-Hadeethi, Salahuddin M. Kamal, M.A.N. Razvi. Calculating the ambient dose equivalent of fast neutrons using elemental composition of human body // Applied Mathematics and Computation. – 2016 – Vol. 274 – pp. 604-610.

## ИЗОТОПЫ В ГЕОЛОГИИ И ГЕОХИМИИ

Еремеев Р. С.<sup>1,2</sup>, Хорохорин Д. М.<sup>1,2</sup>, Ван Цайлунь<sup>1</sup>

Научный руководитель: Мышкин В.Ф.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., профессор

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

<sup>2</sup>ФГУП «Горно-химический комбинат», 660049, г. Железногорск, ул. Ленина, 53

E-mail: gos100@list.ru

Известно, что радиоактивные изотопы имеются во всех природных объектах. Одни изотопы были присущи природным объектам всегда (<sup>235</sup>U, Th), другие в небольшом количестве формировались в результате взаимодействия природных атомов с космическим излучением (<sup>36</sup>Cl и <sup>14</sup>C). Благодаря ионизирующему излучению радиоактивных изотопов ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) определенной энергии, эти компоненты можно идентифицировать. Это позволяет широко использовать изотопы как определенные индикаторы различных природных процессов.

Установлено, что в природе между U (материнским изотопом) и продуктами его распада (дочерними изотопами) устанавливается так называемое радиоактивное равновесие. Так, между U и Ra оно составляет  $3,4 \cdot 10^{-7}$ , тогда как между радоном и радием этот показатель составляет  $1,484 \cdot 10^{-5}$ .

Радиоактивные изотопы встречаются во всех материальных объектах. Они были, есть и будут всегда: от космоса до живых систем нашей планеты. Этот тезис относится и к воде: от мирового океана до воды в живых организмах. Вода стала одним из основных объектов исследования с самого начала открытия радиоактивных изотопов. Первый обзор о радиоактивности гидросферы и некоторых её особенностях был опубликован В.И. Вернадским в «Очерках геохимии» в Париже в 1924 г.

Во всех исследованиях по определению активности Rn в воде обращалось внимание на то, что этот радиоактивный газ обнаруживается в повышенных количествах только в подземных водах и его мало в поверхностных водоемах из-за его летучести. Разработка методов анализа вод на Ra позволила оценить, что его концентрация в водах находится на уровне  $10^{-16}\%$ , но в некоторых редких случаях в глубинных водах нефтегазоносных районов его концентрация может достигать уровня  $10^{-7}\%$ . Такая концентрация Ra была установлена в Республике Коми, на Челекене, Апшероне, в Фергане.

Одним из индикаторов возможного скопления больших масс урана в недрах были радиоактивные изотопы в водах, в том числе Rn и Ra, как продукты распада U, так и сама концентрация урана в воде.

Это был новый толчок в развитии гидрогеохимического метода поисков полезных ископаемых. Возникло новое направление в гидрогеологии – радиогидрогеология. Это отрасль гидрогеологии, занимающаяся изучением радиоактивности природных вод, условиями их формирования и распространения. Практически всегда наблюдается присутствие урана в водах малых рек, бассейн питания которых расположен в полях развития пород, обогащенных ураном или расположения урановых или урансодержащих проявлений. Обогащение речных вод ураном, а также сопутствующими ему элементами спутниками (Mo, Pb), используется в гидрогеохимическом методе поисков урановых месторождений. Гидрогеохимический метод прогнозирования и поиска урановых месторождений является обязательным рекомендованным методом в комплексе специализированных геологоразведочных работ.

Показатель отношения Th/U является важным геохимическим индикатором. Для родственных химических элементов, судьба которых близка в эндогенных магматических и высокотемпературных флюидных процессах - оба в этом случае 4-х валентные с близкими ионными радиусами. Концентрация различна в водной среде в экзогенных условиях - валентность Th и его ионный радиус остаются без изменения, а U становится 6-валентным и образует уранилионный комплекс. Растворимость в воде при этом становится различной на порядки.

Термальные источники имеют ториевую природу радиоактивности. Например, источник на территории Баргузинского заповедника имеет Th/U = 9,3. Большие значения торий-уранового отношения получены также в холодных углекислых соленых водах Терсинского месторождения минеральных вод Кузнецкого Алатау, которое определяется нижефоновыми концентрациями урана. Обнаруженные здесь концентрациями Th составляют десятки нг/л.

Низкими показателями Th/U (<0,001), как правило, характеризуются пресные воды, формирующиеся в геологических структурах, в пределах которых известны урановые месторождения.

Наилучшие условия для накопления U и Th в водах среди источников в Туве отмечаются в холодных слабокислых радоновых углекислых соленых водах родника Арыскан. Здесь благодаря наличию зон уникальной уран-торий редкоземельной минерализации, концентрации U в водах достигают 1,23 мг/л, а Th – 0,00052 мг/л.

Интересно, что по величине Th/U вода живых организмов также отличается и колеблется от 0,08 до 0,9, достигая своего максимума в жидкости из селезенки. Вероятной причиной преобладания Th над U в селезенке может быть различные формы их нахождения в растворе.



## IMPROVING FLUOROQUINOLONES EFFECTIVENESS WITH MAGNESIUM ISOTOPE $^{25}\text{Mg}$

Letuta U.G.

Orenburg State University, Pobedy av, 13, Orenburg, Russia. 460018

E-mail: shevulyana@yandex.ru

The biological effects of stable isotopes can be caused by differences in atomic mass and magnetic properties of nucleus. Differences of nuclear mass are the origin of isotope fractionation in biology (mass-dependent isotope effects): living organisms consume and use light and heavy isotopes of the same chemical element differently. Another type of biological effects caused by differences in the magnetic characteristics of isotope nuclei was called magnetic-isotope effects and was discovered first *in vitro* on enzymatic reactions at the beginning of the 21st century [1]. Magnetic-isotope effects are of the greatest interest since their magnitude exceeds the effects of isotope fractionation by several times [1]. The reason for this lies in the peculiarities of magnetic isotopes. For example, the nuclei of  $^{25}\text{Mg}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{67}\text{Zn}$  have a non-zero spin and magnetic moment, which can affect the quantum chemical state of the nearest molecular environment and change the rate constants of enzymatic reactions. *E. coli* bacteria have been occurred an amazing and unique property – magnetic sensitivity, which does not require the presence of special organelles or intracellular inclusions like magnetite [2]. In connection with these discoveries, it is of particular interest to obtain and accumulate experimental data on the effect of magnetic isotopes of chemical elements on bacteria. One of the main physiological properties of bacteria – antibiotic resistance - also turned out to be magnetically sensitive [3]. Combined effect of antibiotics and magnesium isotopes on bacteria leads to an increase or decrease in the effectiveness of antibacterial drug. The observed effects depend on the antibiotic action target and the presence of a nuclear magnetic moment of magnesium isotope.

The aim of this work is to find a way increasing the efficiency of fluoroquinolones using magnesium isotopes. The interaction of antibiotics this group with the target - enzymes gyrase and topoisomerase IV, turns them into toxic. As a result, the bacterial chromosome is damaged, and the bacterium dies. Experimental data on growth kinetics, CFU, and cell morphology have been obtained, indicating an increased sensitivity of bacteria to certain fluoroquinolones in the presence of magnetic magnesium isotope. For example, when microorganisms grow in a liquid minimum M9 medium with a ciprofloxacin concentration of 1/2 of the minimum inhibitory one, the growth rate of bacterial culture in the presence of  $^{25}\text{Mg}$  magnesium decreases by 80% compared to the control, while for other cells it is not more than 50%. The mechanisms of the  $^{25}\text{Mg}$  magnetic isotope effect and its effect on enzymatic activity of magnesium-dependent enzymes involved in protecting cells from antibiotics action are discussed. A method for potentiating ciprofloxacin and levofloxacin with magnetic isotope of magnesium is proposed.

This work was financially supported by the Council for grants of the President of the Russian Federation, the application of SP-225.2019.4, and by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. FSGU-2020-0003.

### REFERENCES

1. Buchachenko A.L. Magnetic Isotope Effect in Chemistry and Biochemistry. – New York: Nova Science, 2009. – 149 p.
2. Letuta U.G., Berdinskiy V.L. Magnetosensitivity of bacteria *E. coli*: Magnetic isotope and magnetic field effects // Bioelectromagnetics. – 2017. - № 38- P. 581–591.
3. Magnetic isotope effect of magnesium  $^{25}\text{Mg}$  on *E. coli* resistance to antibiotics / U.G. Letuta, A.S. Vekker, T.A. Kornilova et. al. // Doklady Biochem. Biophys. – 2016. - № 469. - С. 281–283.

## ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ОСЕДАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ВЫБРОСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Тайлашева К.А., Рогова Н.С., Яковлева Ю.А.

Научный руководитель: Рыжакова Н.К., к.ф.-м.н., доцент

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

E-mail: rogova@tpu.ru

В настоящее время достоверно установлено, что наибольшую опасность для здоровья человека представляют частицы с размерами, не превышающими несколько десятков мкм. Особую опасность представляют мелкодисперсные выбросы металлургической и топливо-энергетической промышленности, так как они содержат тяжелые металлы.

Методы исследования загрязнения воздуха включают в себя экспериментальное изучение и математическое моделирование переноса частиц. Экспериментальный метод требует большого объема временных и финансовых ресурсов, тогда как математическое моделирование лишено данных

недостатков. Для решения задач массопереноса в турбулентной атмосфере широко используется диффузионно-конвективная модель [1], одним из основных параметров в которой является скорость оседания частиц  $u_z$ .

Для оценки скорости оседания  $u_z$  частиц выбросов, движущихся в турбулентной атмосфере, в данной работе использован полуэмпирический метод, основанный на математической обработке измеренных вдоль выбранного направления от точечного высотного источника загрязнения функций распределения загрязняющих веществ, содержащихся в выбросах предприятий. В качестве точечных высотных источников загрязнения были использованы алюминиевый завод (г. Красноярск) и угольная ТЭЦ (г. Новосибирск).

Выбросы высотных источников загрязнения могут переноситься на расстояния более 10-15 км. На больших расстояниях от предприятий количество загрязняющих веществ в воздухе сравнительно невелико, поэтому для проведения измерений требуются большие времена экспозиции. В данном случае для измерения функций распределения загрязняющих веществ выбросов предприятий используется метод активного биомониторинга с помощью мхов, период экспозиции для которого составляет от нескольких недель до нескольких лет. В нашем исследовании использован эпифитный мох *Pylaisia polyantha* (Hedw.) [2].

Функции распределения загрязняющих веществ, содержащихся в выбросах предприятий, вдоль выбранного направления были изучены для разных периодов экспозиции. Концентрации химических элементов в образцах мха были измерены методом НАА на исследовательском реакторе ИРТ-Т ТПУ.

На основе проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Полной ясности о механизмах перемещения мелкодисперсных частиц в вертикальном направлении в турбулентной атмосфере пока нет. Одним из основных механизмов оседания частиц может являться их движение в вертикальных восходящих или нисходящих потоках.

2. Скорость перемещения мелкодисперсных частиц выбросов промышленных предприятий к земной поверхности в несколько раз больше, чем скорость оседания частиц в неподвижном воздухе. Это различие связано с влиянием турбулентности атмосферы, а также возможным влиянием вертикальных нисходящих потоков.

3. У сравнительно крупных и тяжелых частиц выбросов ТЭЦ наблюдается движение преимущественно вниз, т.е. к поверхности земли, а в зоне влияния АЗ часть частиц перемещается преимущественно вверх.

4. Скорость ветра является одним из основных природных факторов, влияющих на скорость оседания частиц выбросов предприятий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
2. Рыжакова Н. К., Борисенко А. Л., Меркулов В. Г., Рогова Н. С. Контроль состояния атмосферы с помощью мхов-биоиндикаторов // Оптика атмосферы и океана, 2009 – т. 22, – №1. – С. 101-104.

## **ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ**

Тайлашева К.А., Рогова Н.С., Яковлева Ю.А.

Научный руководитель: Рыжакова Н.К., к.ф.-м.н., доцент

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

E-mail: rogoва@tpu.ru

Загрязнение воздуха является одной из актуальных проблем экологического состояния атмосферы, поэтому изучение распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе является особенно важной задачей. Турбулентная диффузия наряду с конвективным переносом являются главными транспортными механизмами переноса промышленных выбросов в приземном слое атмосферы. Для описания пространственного распределения мелкодисперсных частиц выбросов в турбулентной атмосфере широко используется диффузионно-конвективная модель, одним из основных параметров которой является коэффициент вертикальной турбулентной диффузии  $k_z$  [1].

Величина коэффициента  $k_z$  зависит от состояния атмосферы и степени неоднородности подстилающей поверхности [2]. Для моделирования турбулентной диффузии используют полуэмпирические формулы, полученные для определенных состояний атмосферы, т.е. для небольших периодов наблюдения. Однако, с точки зрения изучения и прогнозирования пространственных распределений загрязняющих веществ основной интерес представляют усредненные за длительные периоды значения вертикальных коэффициентов турбулентной диффузии.

Для оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии был использован полуэмпирический метод, основанный на математической обработке измеренных вдоль выбранного

направления от точечного высотного источника загрязнения функций распределения загрязняющих веществ, содержащихся в выбросах предприятий [3].

Для эксперимента были использованы угольная ТЭЦ, находящаяся в г. Новосибирск и алюминиевый завод, находящийся в г. Красноярск. Измерение функций распределения было проведено с помощью метода мхов-трансплантатов для разных периодов экспозиции. Определение содержания химических элементов в образцах мха проведено в научных подразделениях Томского политехнического университета: нейтронно-активационным методом на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т и методом атомно-эмиссионной спектроскопии на спектрометре iCAP6300 Duo научно-аналитического центра.

Для оценок вертикального коэффициента турбулентной диффузии  $k_z$  использованы функции распределения только тех химических элементов, для которых наблюдается зависимость концентраций химических элементов во мхах от расстояния, характеризующаяся наличием максимума. Данное условие необходимо для использования при оценках  $k_z$  аналитического решения диффузионно-конвективного уравнения, полученного для монодисперсных выбросов. В расчетах параметров переноса по формулам при определении средней скорости ветра использованы данные Gismeteo, приведенные для высоты 10 м за разные периоды экспозиции при НАА и АЭС.

В работе показано, что усредненные значения  $k_z$  возрастают с увеличением средней скорости ветра и степени неоднородности подстилающей поверхности. Выявленные для длительных промежутков времени закономерности хорошо согласуются с результатами, полученными при малых периодах наблюдения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
2. Лайхтман Д.Л. Физика пограничного слоя атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 342 с.
3. Ryzhakova (Rizhakova), Nadezhda Kirillovna. Use of moss biomonitors for turbulent transport coefficient estimation for industrial emissions [Electronic resource] / N. K. Ryzhakova (Rizhakova), A.L. Borisenko, V.O. Babicheva // Atmospheric Pollution Research. - 2017 - Vol. 8 - №. 5. - p. 997-1004.

### **БИОМОНИТОРИНГ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЫБРОСОВ КРУПНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Рогова Н.С., Бирюков К.П., Тайлашева К.А.

Научный руководитель: Рыжакова Н.К., к.ф.-м.н., доцент

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

E-mail: rogoва@tpu.ru

Контроль загрязнения атмосферного воздуха является одной из важнейших задач индустриально развитых стран. Особый интерес представляют зоны влияния крупных предприятий топливно-энергетической и металлургической промышленности, простирающиеся на расстояния более 10-15 км. В Российской Федерации измерение содержания вредных веществ проводят на подфакельных постах, которые перемещаются в соответствии с направлением факела источников выбросов [1]. Данный способ контроля является трудоемким, к тому же измеряются разовые концентрации ограниченного числа вредных веществ.

В настоящее время широкое применение нашел метод биомониторинга загрязнения атмосферного воздуха с помощью мхов [2, 3]. Традиционно мхи отбирают в точках, равномерно распределенных на исследуемой территории. В Томском политехническом университете разработан менее трудоемкий способ биомониторинга, основанный на измерении уровня загрязнения вдоль какого-либо направления. На основе полученной зависимости и розы ветров можно прогнозировать размеры зон влияния предприятий и расстояния с максимальным уровнем загрязнения вдоль других направлений.

В работе представлены пространственные распределения загрязняющих веществ в зонах влияния угольной ТЭЦ (г. Новосибирск) и алюминиевого завода (г. Красноярск). Распределения получены методом регрессионного анализа концентраций химических элементов в образцах мхов, экспонированных на разных расстояниях от предприятий вдоль выбранных направлений. В исследовании использованы периоды экспозиции, равные 2, 8 и 11 месяцев в зоне действия алюминиевого завода, 2 и 8 месяцев – в зоне влияния ТЭЦ. Измерения проведены в научных подразделениях ТПУ на исследовательском реакторе ИРТ-Т и атомно-эмиссионном спектрометре iCAP6300 DUO научно-аналитического центра. В исследовании определены: методом АЭС концентрации 21 химического элемента (Al, Ag, B, Ba, Be, Bi, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Pb, Sn, Si, Sr, Ti, V, W, Zr.); методом НАА – 22 элемента (Sm, Mo, Ce, Ca, Lu, U, Tb, Th, Cr, Yb, Hf, Ba, Sr, Nd, Br, As, Sb, Cs, Sc, Rb, Fe, Zn, Ta, Co, Na, Eu, K, La).

В зоне влияния угольной ТЭЦ обнаружено большое содержание As, Ca, Ce, Cs, Hf, La, Lu, Mo, Sb, Sc, Sm, Tb, Th, U, Yb, Zn, для которых максимальные концентрации выше фоновых концентраций в несколько раз и более. В зоне влияния Красноярского алюминиевого завода максимальные

концентрации, превышающие фоновые значения в несколько раз и более, обнаружены для Ca, Cr, Cs, Eu, Hf, La, Lu, Mo, Na, Nd, Sb, Sc, Sm, Ta, Tb, Th, U, Yb, Zn. Фоновые концентрации измерены во мхах, отобранных на расстоянии более 50 км от промышленных центров.

Размеры зон влияния предприятий оцениваются как расстояния, на которых концентрации химических элементов в образцах мхов убывают до фоновых значений. Зона влияния ТЭЦ для большинства элементов простирается на расстояние до 8-10 км. Для более легких и мелких частиц выбросов АЗ размеры зоны влияния больше и для большинства элементов составляет от 10 до 20 км. Расстояния с максимальными уровнями загрязнения увеличиваются с ростом скорости ветра, усредненной за период экспозиции. Эти расстояния для большинства элементов в зоне влияния ТЭЦ составляют от 2 до 3.5 км, в зоне влияния АЗ несколько больше – от 2.5 до 4 км.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 52.04.186-89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы (Часть I. Разделы 1-5)
2. Deljanin I., et al. Lead spatio-temporal pattern identification in urban microenvironments using moss bags and the Kohonen self-organizing maps // Atmospheric Environment. – 2015. – V. 117. – p. 180 – 186.
3. Boquete M.T. et al. Analysis of temporal variability in the concentrations of some elements in the terrestrial moss *Pseudoscleropodium purum* // Environmental and Experimental Botany. – 2011. – V. 72. – №. 2. – p. 210-216.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

Ложников Ф.И.<sup>1</sup>, Ставицкая К.О.<sup>2</sup>, Альмяков П.Э.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Рыжакова Н.К.<sup>2</sup>, к.ф.-м.н., доцент.

<sup>1</sup>Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

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

E-mail: philiplozhnikov13@mail.ru

Радиоактивный газ радон –222 дает самый большой вклад (до 70 %) в дозу за счет природных источников облучения [1]. В нашей стране в соответствии с нормативными документами перед проведением строительных работ на земной поверхности проводят измерения плотности потока радона (ППР) [2]. Однако, в последние годы данный подход к оценке радоноопасности участков застройки подвергается критике, так как за время применения этого критерия накопилось большое количество экспериментальных данных, указывающих на значительные вариации плотности потока радона. Одной из основных причин изменчивости значений ППР является вариабельность физических свойств поверхностных грунтов и меняющиеся во времени атмосферные условия, в том числе разные режимы увлажнения грунтов [3]. Обзор результатов измерения ППР показывает, что наиболее сильное влияние на выход радона оказывают тип грунта, его влажность и пористость. Однако, каких-либо систематических исследований о влиянии различных факторов на ППР не проведено. В данной работе на основе результатов измерений ППР на поверхности одиннадцати пород разного типа с помощью регрессионного и дисперсионного анализа изучено влияние плотности, различных характеристик влажности и пористости грунтов на выход радона.

Измерения ППР проводили в летний период 2020 года на одиннадцати экспериментальных площадках г. Томска. Выбранные виды грунтов типичны для осадочных пород, характерных для большинства населенных территорий. Измерения ППР проводили методом угольных адсорберов с помощью измерительного комплекса Камера-01. Методом режущего кольца отбирали пробы грунта для определения следующих характеристик - естественная, весовая, объемная влажности, коэффициент влажности, пористость, коэффициент водонасыщения и плотность сухого грунта.

Проведенный однофакторный дисперсионный анализ показал значимое различие ППР, измеренных на поверхности одиннадцати типов осадочных пород. В результате регрессионного и дисперсионного анализа показано, что для некоторых типов пород наибольшее влияние на ППР оказывает естественная влажность, пористость и плотность. В связи с этим обнаруженные зависимости предполагается положить в основу разработки нового метода оценки радоноопасности участков застройки. Данный подход позволит не проводить трудоемких измерений ППР, а также при необходимости предусмотреть меры противорадоновой защиты на стадиях проектирования и строительства зданий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90044.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H.Alonso, J.G.Rubiano, “Assessment of radon risk areas in the Eastern Canary Islands using soil radon gas concentration and gas permeability of soils” J. Science of The Total Environment, vol.664, pp.449-60, 2019.
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ – 99), СП 2.6.1.799-99, Минздрав РФ, 2000.

3. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. Федеральное медико-биологическое агентство, Федеральное гос. унитарное предприятие Научно-технический центр радиационно-технической безопасности и гигиены ФМБА России. М.: Перо, 2016. 394 с. ISBN 978-5-906883-94-0.

## СОДЕРЖАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ (К, U, Th) В ПОЧВАХ ТОМСКОГО РАЙОНА

Матина П.Н.<sup>1</sup>

Научный руководитель: Колотков Г.А.<sup>2</sup>, к.т.н., с.н.с.

<sup>1</sup>Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 66

<sup>2</sup>Институт Оптики Атмосферы сибирского отделения РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, 1

E-mail: matina\_polina@mail.ru

Миграция и накопление радиоактивных элементов – это сложные процессы, на которые влияет множество факторов природной среды. Индикаторные химические элементы в различных компонентах ландшафта образуют единую структуру геохимического пространства. Естественные радиоактивные элементы могут использоваться при решении многих научных вопросов, таких как изучение различных геохимических процессов, оценка экологической обстановки и радиационного фона, и разработки новых методов разведки месторождений полезных ископаемых. Целью данного исследования является изучение и сравнительный анализ содержания радиоактивных элементов в почвах разных населенных пунктов.

Изучение радионуклидного состава почв проводилось в рамках первого этапа реализации гранта КИАС РФФИ 20-35-90046 Аспиранты. Для измерений содержания таких элементов, как калий (K), уран (U), торий (Th) и полной гамма-активности использовались полевые гамма-спектрометрические методы, а именно портативный гамма-спектрометр GS 512. Набирается база данных по K, U, Th, которая в настоящий момент содержит около 30 проб, и будет расширяться. Образцы почв отобраны с верхних горизонтов почвенного профиля, так как радионуклиды распределяются довольно равномерно по всему профилю.

Уровень содержания K, U и Th в почвах изученной территории находится в ранге значений, характерных для почвенного покрова других областей (таблица 1).

Таблица 1. Содержание естественных радионуклидов в почвах исследуемого района (2020 г.)

Населенный пункт	K (%)	U (г/т)	Th (г/т)
п. Светлый	1,3	2,9	8,6
п. Кузовлево	1,1	3,3	4,6
п. Надежда	1	3,9	5,9
д. Георгиевка	1	2,9	3,7
д. Наумовка	1	2,1	4,3
42 км дороги Томск-Самусь	1,2	1,2	6,0
п. Самусь	0,8	1,4	2,6
Усредненные значения по почвам Западно-Сибирской низменности	1,7	1,5	6,5

Радиоактивность почвообразующих пород определяет среднее содержание естественных радионуклидов в почве. Содержание тория в почвах регионов Сибири устойчиво, а содержание урана возрастает в аридном климате. Районы, подверженные влиянию ПЯТЦ отличаются повышенным содержанием изотопов урана в природных средах, в том числе и почвах.

Территория исследования находится в зоне влияния СХК по «розе ветров», и на эту же территорию вытянута ось радиоактивного следа, образовавшегося в результате аварии 1993 г.

Анализ полученных данных показал, что наблюдается превышение содержания урана в почвах, по сравнению со усредненными значениями по почвам Сибири. Вышефоновые содержания урана в почвах (с превышением регионального фона в два раза и более) обнаружены в пробах в п. Кузовлево (3,3 г/т) и п. Надежда (3,9 г/т).

## СВЕРХТОНКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР МАГНИТНЫХ ИЗОТОПОВ В МОЛЕКУЛАХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Каепкулова Э.И.

Научный руководитель: Бердинский ВЛ., д.ф.- м.н., доцент

Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13

E-mail: 79378363895@mail.ru

Стабильные магнитные изотопы – изотопы, обладающие ядерным спином и ядерным магнитным моментом, например,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{25}\text{Mg}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{67}\text{Zn}$  и др., позволяют регистрировать спектры ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и используются в радиоспектроскопии. В стабильных и в свободных радикалах – «обломках» молекул – магнитные моменты атомных ядер взаимодействуют с магнитными моментами неспаренных электронов. Это взаимодействие называется сверхтонким взаимодействием (СТВ). Оно приводит к расщеплению линий электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и позволяет идентифицировать пространственную и электронную структуру радикалов [1]. В радикальных парах и в ион-радикальных парах СТВ индуцирует синглет-триплетную конверсию, что изменяет реакционную способность радикалов по отношению к клеточной и внеклеточной рекомбинации в жидкостях [2]. В последствии было обнаружено и доказано влияние магнитных моментов атомных ядер изотопов  $^{25}\text{Mg}$ ,  $^{67}\text{Zn}$  и др. на скорости ферментативных процессов *in vitro* и *in vivo* [3-5].

Спиновый гамильтониан сверхтонких взаимодействий  $\hat{H}_{\text{сн}}$  предполагает взаимодействие ядерного спина  $\hat{I}$  лишь с одним электронным спином  $S = 1/2$  с константой взаимодействия  $a$

$$\hat{H}_{\text{сн}} = a \cdot \hat{S} \cdot \hat{I}.$$

На первый взгляд, эта форма гамильтониана  $\hat{H}$  не допускает сверхтонких взаимодействий в диамагнитных молекулах с заполненными электронными оболочками и с суммарным электронным спином  $\hat{S} = \hat{S}_1 + \hat{S}_2 = 0$ . Однако антисимметрия полной волновой функции  $\Psi(r_1, r_2)$  диамагнитных молекул требует раздельного описания взаимодействий отдельных электронов с ядерным спином  $\hat{I}$ . При этом «полный» гамильтониан сверхтонких взаимодействий должен включать и спиновые и пространственные переменные  $\hat{r}_1$  и  $\hat{r}_2$  и изначально иметь вид [1]

$$\hat{H} = \left( \frac{8\pi}{3} \right) g_n \beta_n g_e \beta_e [ \hat{S}_1 \delta(r_1 - r_A) + \hat{S}_2 \delta(r_2 - r_A) ]. \quad (1)$$

Здесь  $r_A$  – координаты ядра магнитного изотопа,  $\delta(r_i - r_A)$  –  $\delta$ -функция. Вычисления матричных элементов гамильтониана (1)

$$\langle \Psi_T(r_1, r_2) | \hat{H} | \Psi_S(r_1, r_2) \rangle$$

с пространственными волновыми функциями синглетного  $\Psi_S(r_1, r_2) = 2^{-1/2} \varphi_1(r_1) \varphi_1(r_2) |S\rangle$  и триплетного  $\Psi_T(r_1, r_2) = 2^{-1/2} \{ \varphi_1(r_1) \varphi_2(r_2) - \varphi_2(r_1) \varphi_1(r_2) \} |T_{\pm,0}\rangle$  состояний доказывают, что для системы из двух электронов с антисимметричными волновыми функциями сверхтонкое взаимодействие способно переводить систему из синглетного в триплетное состояние, а спиновый гамильтониан должен иметь вид

$$\hat{H}_{\text{СТВ}} = a_1 (\hat{S}_1 - \hat{S}_2) \hat{I}, \quad (2)$$

где «новая» константа СТВ

$$a_1 = (8\pi/3) g \beta g_n \beta_n \varphi_u(r_A) \varphi_g(r_A).$$

Доказано, что спиновый гамильтониан сверхтонкого взаимодействия (2) способен «смешивать» синглетные и триплетные состояния в диамагнитных молекулах и молекулярных комплексах и индуцировать синглет триплетную конверсию в активных центрах ферментов в магнитных полях, соответствующих квазипересечению триплетных и синглетных термов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Керрингтон А., Мак-Лечлан Э. Магнитный резонанс и его применение в химии. – Москва. Мир, 1969. – 448 с.
2. Buchachenko A.L. Beauty and Fascination of Science. – Singapore. Springer Nature Ltd, 2020. – 188 p
3. Buchachenko A.L. Magnetic Isotope Effect in Chemistry and Biochemistry. – New York: Nova Science, 2009. – 149 p.
4. Letuta U.G., Berdinskiy V.L. Magnetosensitivity of bacteria *E. coli*: Magnetic isotope and magnetic field effects // Bioelectromagnetics. – 2017. – № 38- P. 581–591.
5. Magnetic isotope effect of magnesium  $^{25}\text{Mg}$  on *E. coli* resistance to antibiotics / U.G. Letuta, A.S. Vekker, T.A. Kornilova et. al. // Doklady Biochem. Biophys. – 2016. – № 469. – С. 281–283.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНДЕКСОВ ХАУНСФИЛДА ОТ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ ПЛАСТИКОВЫХ ОБРАЗЦОВ

Бушмина Е.А.<sup>1</sup>, Зубкова Ю.А.<sup>1</sup>, Милойчикова И.А.<sup>1,2</sup>

Научный руководитель: Стучебров С.Г.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., доцент

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт онкологии Томского НИМЦ РАН, 634009, г. Томск,  
пер. Кооперативный, 5  
E-mail: eab60@tpu.ru

На сегодняшний день лечение онкологических заболеваний проводят при помощи лучевой терапии. Одними из устройств для получения гамма-излучения, которое используется в лучевой терапии, являются гамма-терапевтические установки [1]. Для достижения эффективного результата лечения существует необходимость в проведении дозиметрической верификации плана облучения. Данные процедуры обычно проводят с использованием фантомов, изготовленных из тканеэквивалентного материала [1].

Особое внимание приковано к индивидуальным гетерогенным фантомам, которые позволят более точно проводить контроль облучения. Однако создание таких фантомов требует решения ряда задач, таких как скорость и точность изготовления из тканеэквивалентных материалов. Отвечая данным требованиям, индивидуальные фантомы предлагается создавать посредством аддитивных технологий [2]. Такой подход позволяет воссоздать анатомию человека с помощью 3D-моделирования [2].

Как известно индексы Хаунсфилда являются одной из основных характеристик, используемых при планировании облучения. Они определяют ослабление рентгеновского излучения по отношению к дистиллированной воде. Для имитации разных органов и тканей тела человека с заданными значениями индексов Хаунсфилда необходимо не только выбрать тканеэквивалентный материал, но и определить параметры печати для каждого элемента. Одним из таких параметров является коэффициент экструзии.

Коэффициент экструзии – это скорость продавливания пластика через формирующее отверстие 3D-принтера и его количество. Данный параметр печати позволяет плавно регулировать плотность заполнения объекта материалом. В данной работе была исследована зависимость индексов Хаунсфилда объектов, изготовленных методом послойного наплавления из ПЛА пластика (полилактид), от коэффициента экструзии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khan F.M., Gibbons J.P. Khan's the physics of radiation therapy. – Fifth edition. – Lippincott Williams & Wilkins, 2014. – 572 p.

Красных А.А. и др. Оценка возможности изготовления материалов, пригодных для устройств быстрого прототипирования, с заданными КТ-индексами // Ядерная физика и инжиниринг, 2017. – Т. 8. – № 1. – С. 91-95.2.

## СОЗДАНИЕ ФАНТОМА ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ ПРОЦЕДУРЫ ОБЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕДИЦИНСКОГО ПУЧКА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ИСТОЧНИКА <sup>60</sup>Со

Зубкова Ю.А., Бушмина Е.А., Черепенников Ю.М.

Научный руководитель: Стучебров С.Г., к.ф.-м.н., доцент

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

E-mail: yaz8@tpu.ru

Одним из инструментов лучевой терапии являются гамма-терапевтические установки для дистанционного облучения. Медицинский пучок создается радионуклидным источником <sup>60</sup>Со. Средняя энергия такого пучка составляет 1,25 МэВ [1].

В подобных установках источник представлен в виде цилиндра, диаметр выходного отверстия которого составляет 1-2 см. Такой источник не является геометрически точечным и вокруг него возникает геометрическая полутень [1, 2]. Система формирования поля облучения для стандартного гамма-терапевтического аппарата представляет собой набор коллиматоров, конструкция которых позволяет создавать только прямоугольные поля. Для формирования полей более сложных форм, повторяющих контур новообразования, используются стандартные свинцовые блоки, устанавливаемые вручную [1, 2]. Как следствие применение таких блоков требует обязательной верификации, как точности их установки, так и сформированного ими дозового поля вблизи критических органов.

В связи с тем, что в основе проведения процедур лучевой терапии лежит главный принцип в доставке максимальной дозы ионизирующего излучения на злокачественные клетки опухоли с минимальной лучевой нагрузкой на окружающие здоровые клетки организма, возникает необходимость в проведении дозиметрических процедур контроля и верификации планов облучения на гамма-терапевтических установках. Стандартные водные или пластинчатые фантомы являются гомогенными и упрощают геометрию тела пациента [1]. Решением данной проблемы может стать применение гетерогенных тканеэквивалентных дозиметрических фантомов.

Для создания подобных фантомов было предложено использовать технологии трехмерной печати [3]. Для реализации этого решения в данной работе было проведено преобразование томографических

данных пациента в формате DICOM в трехмерную STL-модель. Таким образом, была создана модель тела человека, пригодная для создания дозиметрического фантома с помощью технологий трехмерной печати. Применение предложенных фантомов позволит экспериментально определить дозное распределение вблизи критических органов для процедур облучения на гамма-терапевтическом аппарате.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10052).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khan F.M., Gibbons J.P. Khan's the physics of radiation therapy. – Fifth edition. – Lippincott Williams & Wilkins, 2014. – 572 p.
2. Черняев А.П., Лыкова Е.Н., Поподько А.И. Медицинское оборудование в современной лучевой терапии: Учеб. Пособие. – М.: ООП физического факультета МГУ, 2019. – 101 с.
- Красных А.А. и др. Разработка способа экспериментальной верификации дозиметрического планирования лучевой терапии // Сборник материалов XII Всероссийской конференции молодых ученых-онкологов, посвященной памяти академика РАМН НВ Васильева «Актуальные вопросы фундаментальной и клинической онкологии», 27–28 апреля 2017 г., г. Томск / Под ред. Е.Л. Чойзнонова, Э.В. Галажинского, Н.В. Чердынцевой. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2017. – С. 150.

### **ИЗУЧЕНИЕ СЕЗОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА Г. ТОМСКА ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ**

Рогова Н. С., Яковлева Ю.А., Бирюков К. П.

Научный руководитель: Рыжакова Н.К., к.ф.-м.н., доцент

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

E-mail: rogoва@tpu.ru

В Европейских исследованиях при активном биомониторинге чаще всего используют наземные мхи. При трансплантации мхов с условно чистых территорий на урбанизированную мхи помещают в сетчатые мешки из химически нейтральных материалов (техника «мох-мешок»). Однако мох высыхает во время экспозиции и часто осыпается. Для преодоления данных недостатков мхи размещают на специальной поддержке, устанавливают полив и затенение. Такие приспособления делают данный способ трудоемким и дорогостоящим для достаточно больших территорий [1,2]. С этой точки зрения для мониторинга более целесообразно использовать обитающие на коре деревьев эпифитные мхи, так как для их размещения не требуются устройства для поддержки. В данном исследовании для трансплантации использован эпифитный мох *Pyloisia polyantha* (Hedw.) Schimp., который распространен в природе и обладает высокими аккумуляционными способностями. Для данного вида мха авторами разработан простой в применении метод трансплантации [3]. Целью работы является изучение влияния сезонных условий на концентрации химических элементов в образцах-трансплантатах эпифитного мха *Pyloisia Polyantha*.

Для исследования влияния сезонных условий на концентрации химических элементов в образцах-трансплантатах в 2017 г. на территории г. Томск были выбраны 2 участка, отличающиеся уровнем техногенной нагрузки. На первом этапе исследования планшеты в количестве 29 штук разместили в июне, время экспозиции в летний период составило 19 недель. На втором этапе исследования планшеты в количестве 18 штук разместили в октябре, период экспозиции в зимний период составил 30 недель.

В исследуемых образцах мха с помощью НАА определены следующие элементы: As, Ba, Br, Ca, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hf, K, La, Lu, Mo, Rb, Sb, Sc, Sm, Tb, Th, U, Yb, Zn; погрешность измерений составляла 10-15%. Статистическая обработка проведена только для тех химических элементов, концентрации которых выше фоновых. Как показали результаты наших исследований, фоновый диапазон концентраций для мха *Pyloisia polyantha* можно установить в пределах 50% от средних значений концентраций, измеренных в фоновых образцах с помощью НАА.

На первом участке концентрации всех выше перечисленных элементов, исключая Hf, Rb, Sm, для зимнего периода больше, чем для летнего. Повышенные концентрации Co, Cs, Lu, Sb, Tb, U, Yb можно объяснить тем, что вблизи этого участка находятся частные дома с печным отоплением и автомагистраль. Для Hf, Rb, Sm наоборот, концентрации для летнего периода оказались выше. Повышенное содержание Hf, Rb, Sm в летний период обусловлено тем, что эти рассеянные в земной коре элементы содержатся в частицах пыли, которая в большом количестве присутствует в атмосферном воздухе вблизи автомагистрали с интенсивным движением.

Содержание Lu в зимний и летний период на более чистом втором участке примерно одинаково и совпадает с содержанием этого элемента на первом участке в летний период. Отсюда можно сделать вывод о том, что в зоне влияния Томск-Северской промышленной агломерации, где располагаются выбранные участки, в атмосферном воздухе содержатся повышенные концентрации Lu. Содержание Th и Cs на втором участке, также как и на первом участке, выше в зимний период, что, скорее всего, связано с отопительным сезоном.

Проведенный анализ показал, что сезонные условия не влияют на процессы жизнедеятельности



эпифитного мха *Pylaisia Polyantha*, трансплантированного на планшеты. С помощью эпифитного мха-трансплантата *Pylaisia Polyantha* на урбанизированных территориях можно проводить сезонные оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fernández J.A., Ares A., Rey-Asensio A., Carballeira A., Aboal J.R. Effect of growth on active biomonitoring with terrestrial mosses // *Journal of Atmospheric Chemistry*. – 2009. – 63(1). – p. 1–11.
2. Zechmeister H.G., et al. Pilot study on road traffic emissions (PAHs, heavy metals) measured by using mosses in a tunnel experiment in Vienna, Austria // *Environmental Science and Pollution Research International*. – 2006. – 13(6). – p. 398–405.
- Rogova N.S., Ryzhakova N.K., Borisenko A.L. Effect of placement conditions for active monitoring of trace element with the epiphytic moss // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2018. – 190 (12). – 733.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА РАДИОИЗОТОПНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ С ЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

Сабитова Р.Р.<sup>1</sup>

Научный руководитель: Беденко С.В.<sup>2</sup>, к.ф.-м.н, доцент

<sup>1</sup>Национальный ядерный центр Республики Казахстан, 071100,

г. Курчатов, ул. Красноармейская, 10

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

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

В настоящее время радиоизотопные источники нейтронов широко применяются в лабораторных исследованиях, для задач прикладной ядерной физики и медицины. Как правило, определение энергетических спектров подобных источников затруднено из-за различающейся структуры и состава активной части источника. Например, в Am-Be нейтронных источниках размер зерен смеси варьируется от 1 до 10 мкм, что приводит к неточности в величине нейтронного выхода. Решение данной проблемы осуществляется с помощью гибридного моделирования.

В данной работе определялся спектр выхода нейтронов с поверхности AmBe-источника с учетом зернистости смеси. В качестве исходных данных взяты капсула Amersham X-14 [1] и полученные с помощью Sources-4c спектры для гомогенной (0мкм) и гетерогенной мелкодисперсной (8 мкм) смеси из AmO<sub>2</sub> и Be [2]. Начальная расчетная мощность источника –  $1,5 \cdot 10^7$  н/с и  $7,37 \cdot 10^6$  н/с соответственно. Расчеты показали, что с увеличением диаметра частиц AmO<sub>2</sub> спектр нейтронов менее 4 МэВ слегка смещается в сторону более низких энергий, что указывает на увеличение ( $\alpha$ , n)-реакций с <sup>17,18</sup>O в результате чего меньшее количество альфа-частиц достигает материала бериллия.

Далее в MCNP5 для обоих вариантов был рассчитан перенос частиц, в результате которого нейтронная мощность в среднем увеличилась на 6,4%, из которого 97,7% - в результате реакции (n,2n); 2,3% - при быстром делении. На дальнейшее образование нейтронов теряется около 3% нейтронов.

Энергетический спектр источника, состоящего из мелкодисперсной смеси имеет схожий интегральный выход нейтронов, но различается при переходе от относительных единиц к физическим примерно в 2 раза. Следовательно, с присутствием в геометрии зернистости появляется эффект самопоглощения альфа-частиц. Расчеты показали, что качество прессования и смешивания т.е. структура смеси должна быть учтена при проведении расчетных работ, поскольку она влияет на результат.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Norio TSUJIMURA, Tadayoshi YOSHIDA. Calculation of Anisotropy Factors for Radionuclide Neutron Sources // *JAEA-Research 2008-034*
2. Nedis-Serpent simulation of a neutron source assembly with complex internal heterogeneous structure / S.V. Bedenko, G. N. Vlaskin, N. Ghal-Eh [et al.] // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2020 . – Vol. 160 . – [109066, 8 p.]

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОГО СОЧЕТАННОГО КУРСА ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ РАКА ТЕЛА МАТКИ

Здерева М.А.<sup>1</sup>, Нгуен Туан Ань<sup>1</sup>, Тургунова Н.Д.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Милойчикова И.А.<sup>1,2</sup>, к.ф.-м.н., доцент

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт онкологии Томского НИМЦ РАН, 634009, г. Томск, пер. Кооперативный, 5

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

Рак тела матки находится в лидирующей позиции в рейтинге по количеству больных из всех злокачественных опухолей женских половых органов, он занимает второе место в структуре всей

женской онкопатологии [1]. Для наиболее результативной борьбы с таким заболеванием применяют комбинированное лечение, которое состоит из хирургического вмешательства и последующим проведением послеоперационной сочетанной лучевой терапии.

Главной проблемой проведения сочетанного курса является поиск оптимального сочетания топометрической подготовки с планированием и доставкой лечения для достижения основной цели – максимального облучения очага с минимальным поражением здоровых тканей [2].

Целью данной работы является оптимизация проведения послеоперационного сочетанного курса лучевой терапии у пациентов с раком тела матки для снижения дозовой нагрузки на критические органы с учетом современных подходов к топометрии и дозиметрическому планированию.

В работе была сделана выборка из 10 пациенток с раком тела матки, получавших послеоперационный сочетанный курс лучевой терапии в виде комбинации дистанционной и внутриволостной лучевой терапии [3]. Для сравнения дозовых нагрузок от разных методик облучения в системе планирования были созданы два плана для дистанционного облучения: конвенциональное – для гамма-терапевтического аппарата Theratron Equinox 80 (источник –  $^{60}\text{Co}$  с  $E_\gamma = 1,25$  МэВ); конформное – для медицинского ускорителя Elekta Synergy. Для сравнения и анализа дозовых нагрузок на критические органы от сеанса внутриволостной лучевой терапии в системе планирования HDRplus были созданы три плана облучения для аппарата MultiSource (источник –  $^{60}\text{Co}$  с  $E_\gamma = 1,25$  МэВ) с учетом различной топометрической подготовки: базовый план без дополнительных средств визуализации, план построенный на снимках, полученных с помощью рентгеновского аппарата С-Дуга и план построенный на данных компьютерной томографии.

Полученные результаты показали, что для снижения дозовых нагрузок на критические органы при проведении дистанционного этапа необходимо использовать конформное облучение. Для проведения топометрической подготовки внутриволостного этапа облучения необходимо использовать компьютерную томографию для визуализации внутренних структур, что поможет провести оценку дозовых нагрузок и выбрать оптимальный способ экранирования критических органов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Злокачественные новообразования в России в 2018 году (заболеваемость и смертность) / Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2019. – 250 с.
2. Солодкий В. А., Ставицкий Р.В. Рак шейки матки. – Москва: ГАРТ, 2011. – 159 с.
3. Клинические рекомендации. Рак тела матки и саркомы матки [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://cr.rosminzdrav.ru/#!/schema/320> (дата обращения: 12.10.2020).

## **РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ НАГРЕВА НОВООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СЕАНСОВ ЕМКОСТНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ**

**Разумова А.С.<sup>1</sup>, Булавская А.А.<sup>1</sup>, Григорьева А.А.<sup>1</sup>**

Научный руководитель: Милойчикова И.А.<sup>1,2</sup>, к.ф.-м.н., доцент

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт онкологии Томского НИМЦ РАН,

634009, г. Томск, пер. Кооперативный, 5

E-mail: asr26@tpu.ru

Одной из наиболее актуальных проблем медицины является лечение онкологических заболеваний. Основными подходами в лечении является: лучевая терапия, химиотерапия и хирургическое вмешательство. Радионуклид  $^{60}\text{Co}$  нашел широкое применение как для проведения брахитерапии так и дистанционной лучевой терапии. Для повышения чувствительности опухолевых клеток к лучевой терапии используются радиосенсибилизаторы, одним из которых является гипертермия [1]. Это вид лечения онкологических заболеваний, связанный с нагревом новообразований. Во время сеансов гипертермии необходимо контролировать температуру нагрева, однако инвазивное измерение температуры является затруднительным в силу своего травмирующего характера. В работе [2] предложено решение, заключающееся в применении специальных фантомов, которые имитируют различные свойства тканей и органов.

В рамках исследования были разработаны фантомы, моделирующие реальные электрические свойства нормальных тканей и опухоли, которые использовались для определения уровня нагрева различных тканей для реального курса локальной гипертермии. Аппарат локальной гипертермии Celsius TCS применялся для нагрева фантома. Нагрев происходит путем передачи энергии по принципу ёмкостного сопряжения в электромагнитном поле частотой 13,56 МГц. Для контроля температуры использовалась термометрическая система Celsius TempSens, укомплектованная четырьмя

оптоволоконными датчиками, которые в дальнейшем помещались в наиболее информативные и важные точки, расположенные в опухоли и нормальной ткани.

Разработанные тканеквивалентные фантомы являются статичными и в них отсутствуют механизмы регулирования температуры. При отсутствии кровотока температура ткани постоянно увеличивается со временем. Это связано с тем, что в данной модели ткани отсутствует единственный механизм потери тепла – кровоток [3]. При наличии кровотока температура ткани не увеличивается постоянно, но стремится к постоянному значению в большом промежутке времени. Это предельное значение зависит как от подводимой теплоты, так и от кровотока. В данной работе значения прироста температуры с учетом влияния потока крови на уровень нагрева были оценены на основе экспериментальных данных, измеренных для статичных фантомов путем пересчета по формуле, полученной из классического биотеплового уравнения Гарри Пеннеса [4]. Было определено, что при проведении сеансов локальной гипертермии достигается терапевтическая температура, при которой наблюдается сенсбилизация опухоли к лучевой терапии. Область нормальных тканей при этом нагревается в пределах нормы и не превышает допустимого уровня.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bruggmoser G. et al. Guideline for the clinical application, documentation and analysis of clinical studies for regional deep hyperthermia // *Strahlentherapie und Onkologie*, 2012. – V. 188. – №. 2. – P. 198-211.
2. Чойнзонов Е.Л. и др. Измерение температурного поля в фантоме головного мозга с имитацией глиобластомы при транскраниальной высокочастотной гипертермии // *Медицинская техника*, 2017. – №. 5. – С. 34-37.
3. Gabriel S., Lau R.W., Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues // *Physics in Medicine & Biology*, 1996. – V. 41. – №. 11. – P. 2271.
4. Szasz O., Szasz A. Heating, efficacy and dose of local hyperthermia // *Open Journal of Biophysics*, 2016. – V. 6. – №. 1. – P. 10-18.

## DEVELOPMENT OF THE STATISTICAL METHODS FOR X-RAY DETECTOR CHARACTERIZATION TO USE IN CT

Filatov N.A., Gogolev A.S., Chistyakov S.G., Alekseev N.V.

Scientific adviser: Gogolev A.S.

Tomsk Polytechnic University, Lenin Avenue 30, 634050 Tomsk

E-mail: filatovna@tpu.ru

To design an X-ray tomographic system, the most important thing is to select devices, which are best suited to particular task that may vary depending on the sample type, required spatial resolution, components contrast and ROI of the samples. In general, by only using specification of the device it's difficult to archive all the information which is needed to make optimal choice, thus, developing of methods that could give more complete information about devices in context of a particular task, might be actual. In the current work, we offer methods for X-ray detectors characterization based on statistics analysis. The following parameters are considered: crosstalk, quantum efficiency, single pixel deviation, matrix pixels heterogeneity.

As is known, when an X-ray photon interacts with scintillator, the result light pulses are formed not only at interacted pixel, but neighbors elements are affected too, as well as charge is distributed for direct conversation detectors. This effect, which is called as crosstalk, degrades spatial resolution and depends on scintillation layer thickness, pixel size, technical designing of the detector. Since the signal in neighbor elements is repeated for crosstalk degree, the SNR for those pixels partially must not be increased. By calculating of SNR shortage between all pixels, it's became possible to get crosstalk degree, which is used in this work.

The general impact on single pixel comes from detector quantum efficiency, which depends on incident spectrum and can be calculated as follows:

$$DQE = \frac{SNR_{incident}^2}{SNR_{detected}^2}$$

where  $SNR_{incident}$  and  $SNR_{detected}$  are relation for incident and detected spectra integrals respectively. However, there is detector internal noise, that increases single pixel deviation, then the complete equation takes the form:

$$SNR = \frac{S}{\sqrt{\sigma_R^2 + S^2}}$$

where  $S$  – the detector signal and  $\sigma_R$  – the deviation which is formed by the detector internal noise.

In an attempt to get uniformity response for detector pixels one can use flat-field correction filter [1]. However, the more incident spectrum differs from that which was obtained at flat-field filter calibration, the more pixel heterogeneity appears. As opposed to single pixel deviation, pixel heterogeneity is not affected by averaging. In the current work, we offer to obtain a lot of frames for spectra which are close to real conditions in order to separate single pixel deviation from matrix pixels heterogeneity.

By using the developed method the detectors Ximea CCD OnSemi KAI-11002(16000) 11 MPix, Ximea sCMOS Gpixel GSENSE5130 15 Mpix, Shad-o-Box 3K HS are tested. Recently released Ximea on sCMOS sensor shows best result for crosstalk – 12 % against 45% and 60% for Ximea on CCD and Shad-o-Box 3K HS respectively, but worst result for matrix pixels heterogeneity for hardened spectra, which makes it difficult to use it for density samples.

#### REFERENCES

1. So E. Park, Jaegon Kim, Mohamed Hegazy, Min H. Cho, Soo Y. Lee. A Flat-Field Correction Method for Photon-Counting-Detector-based Micro-CT: *Proc SPIE*, Volume 9033, 90335N.

## РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХЛОРООРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ПОТОКЕ НЕФТИ

Чистяков С.Г., Филатов Н.А., Гоголев А.С., Алексеев Н.В.

Научный руководитель: Гоголев А.С., к.ф.м.н.

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

E-mail: csg@tpu.ru

Хлорорганические соединения, присутствующие в нефтях, нефтепродуктах, химических реагентах, вызывают коррозию оборудования, "отравляют" катализаторы и др., что приводит к сбою в работе оборудования и пагубно сказывается в целом на работе соответствующих заводов, а в случае трубопроводной транспортировки нефти может привести к экологической катастрофе при его прорыве и, соответственно, к колоссальным убыткам по устранению результатов аварии. Способов и устройств для экспресс определения таких соединений в сырой нефти обладающих необходимой чувствительностью на текущий момент не существует [1].

В данной работе рассмотрена возможность использования двухволновой волнодисперсионной интроскопии [2] для измерения количества примесей хлорорганических соединений с точностью мене 200 ppm. Преимущество предлагаемой технологии над имеющимися рентгеновскими способами заключается в том, что не требуется специальная пробоподготовка, а устройство может быть реализовано в виде поточного анализатора. Принципиальная схема реализации способа показана на рис. 1.

1.

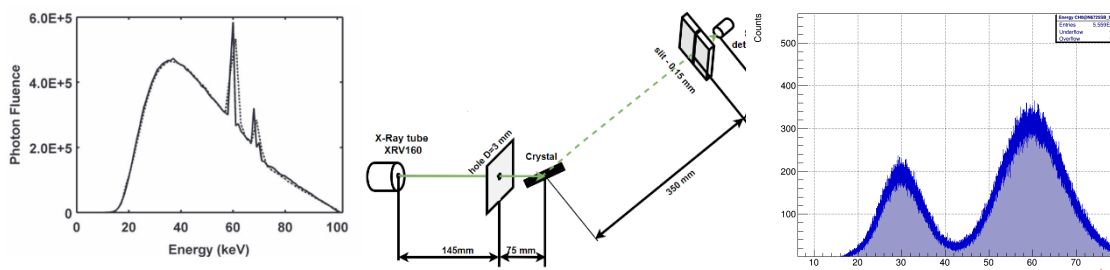


Рис. 1. Получение двух энергетических линий. Кристалл-анализатор настроен на угол Брэгга для 30 кэВ, линия 60 кэВ появляется на детекторе за счет 2-го дифракционного максимума и характеристической линии вольфрама.

Для определения примесей хлорорганики с массовой долей 200 ppm необходимо обеспечить относительную статистическую ошибку регистрации фотонов больше, чем изменение в интенсивности линий спектра за счет присутствия хлора. Если количество фотонов с энергией 30 keV, прошедших через чистую нефть и зарегистрированных детектором  $N_{OIL\ 30} = 10^6$ , то статистическая относительная ошибка будет  $\sigma = \sqrt{N} = 1000$ . Поэтому, для достижения минимального теоретического  $SNR=1$ , необходимо, чтобы выполнялось условие изменения регистрируемых фотонов для линий  $\Delta N_{30}$  и  $\Delta N_{60} > 1000$ . Для трубы диаметром 5 см и плотностью нефти  $\rho=0.8$  г/см<sup>3</sup> и линейными коэффициентами поглощения  $\mu_{30\ OIL} = 0.211175$  см<sup>-1</sup> и  $\mu_{60\ OIL} = 0.149602$  см<sup>-1</sup>, получим что, начальное количество фотонов должно быть  $N_{0\ 30} = N_{0\ 60} = 2.875e+06$ . Соответственно, через чистую нефть пройдет  $N_{OIL\ 60} = 1.36051e+06$  фотонов для линии 60 keV. В случае, когда в нефти присутствует примесь хлорорганики с линейными коэффициентами поглощения для хлора  $\mu_{30\ Cl} = 7.68934$  см<sup>-1</sup> и  $\mu_{60\ Cl} = 1.39302$  см<sup>-1</sup>, и в массовой доли хлора 200 ppm, начальная интенсивность линий спектра будет ослаблена до уровня  $N_{OIL+Cl\ 30} = 9.9255+05$  и  $N_{OIL+Cl\ 60} = 1.35882e+06$  фотонов. В итоге изменения в спектральных линиях будут  $\Delta N_{30} = 7450$  и  $\Delta N_{60} = 1690$  фотонов. Отсюда получаем, что соотношения сигнал/шум для линий спектра будут  $SNR_{30} = 7.45$  и  $SNR_{60} = 1.69$ .

Расчет показывает, что при соответствующей загрузке детектора возможна регистрация примесей хлорорганики в нефти в потоке не реже 1 раза в секунду и с точностью не менее 200 ppm.

Чувствительность способа зависит от времени экспозиции и при необходимости за разумное время может достигать 10 ppm.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков Е.А. Определение хлора в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов. - Мир нефтепродуктов. 2019. - №7. - с.39.
2. A Gogolev, R Rezaev, Yu Cherepennikov, A Vukolov, T Gogoleva, Estimation of the sensitivity in dual wave X-ray absorptiometry - Journal of Physics: Conference Series, 732(2016), RREPS2015.

### ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫСУШИВАНИЯ ОБРАЗЦОВ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ RA-226

Альмяков П. Э., Черепнев М. С., Епанчинцев Д. П.

Научный руководитель: Рыжакова Н.К., к.ф.-м.н., доцент.

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

E-mail: al.pa2014@yandex.ru

Значительный вклад в фоновое излучение вносит радон-222 и продукты его распада. В соответствии с нормативными документами в Российской Федерации перед проведением строительных работ проводят радиационно-экологические изыскания, в том числе определяют радоноопасность территорий застройки [1]. Радон образуется в результате радиоактивного распада Ra-226, принадлежащего семейству  $^{238}\text{U}$ . Поэтому одним из основных критериев радоноопасности территорий во многих странах используется удельная активность  $^{226}\text{Ra}$  [2]. В РФ построены региональные карты радоноопасности, основанные на данных о содержании урана/радия в приповерхностном рыхлом слое. Однако, в основании фундаментов зданий, располагающихся обычно на глубинах 2–3 м, залегают плотные породы, удельная активность  $^{226}\text{Ra}$  которых может отличаться. В связи с этим возникает необходимость измерения активности радия-226 в коренных породах разного типа.

Обзор научной литературы, в том числе и зарубежной, показывает, что до настоящего времени не существует аттестованной методики пробоподготовки образцов пород к гамма-спектрометрии. В частности, отсутствуют рекомендации о температуре высушивания образцов. В работе представлены результаты измерения удельной активности радия в образцах суглинка, белой глины и сланца, высушенных при температурах 90, 100, 110 и 120°C, а также удельная активность радия в образцах суглинка, отобранного в поверхностном слое и на глубинах 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 м. Удельную активность радия-226 измеряли в геометрии сосуда Маринелли с объемом 1л с помощью  $\gamma$ -спектрометра на основе полупроводникового германиевого детектора GEM-76 (рис.5) с разрешением 1.85 кэВ для энергии 1.33 МэВ и 0.85 кэВ для энергии 122 кэВ. Измерения проводили в условиях радиоактивного равновесия с радоном по наиболее интенсивным линиям дочерних продуктов распада радона –  $^{214}\text{Pb}$  (295,21; 351,92 кэВ) и  $^{214}\text{Bi}$  (609,32 кэВ). Перед измерениями грунты тщательно высушивали и измельчали. Время выдержки герметично закрытых сосудов составляло две – три недели, время измерения одного образца несколько часов в зависимости от активности радия; статистическая погрешность измерений не превышала 15%. Для обработки аппаратурных гамма-спектров использована программа «Genia-2000», разработанная компанией CANBERRA.

Для суглинка и сланца зависимости удельной активности радия от температуры высушивания в исследованном диапазоне не выявлено. Для глины наблюдается значительное увеличение активности при увеличении температуры до 110-120°C (Рис.1). Возможно, этот результат связан с высокой гигроскопичностью глины, в связи с чем высушивание до температур  $\leq 100^\circ\text{C}$  не позволяет полностью удалить влагу из образцов. Необходимы дальнейшие исследования по разработке методики высушивания образцов глины.

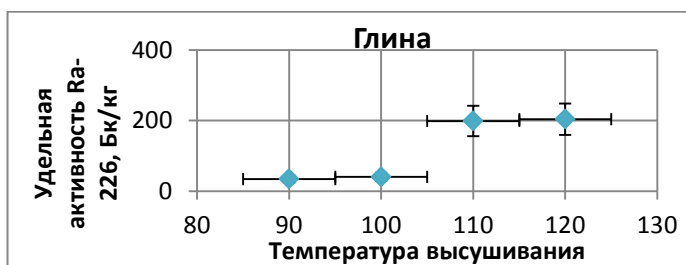


Рис.1. Зависимость удельной активности радия от температуры высушивания

Удельная активность радия-226 суглинков в поверхностном слое в два раза меньше, чем на глубинах от 0,5 метров до 2 метров. Поэтому удельная активность радия, измеренная в рыхлых поверхностных слоях, не может быть использована для оценки радоноопасности участков застройки, так как в основании фундаментов зданий располагаются плотные коренные породы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ – 99), СП 2.6.1.799-99, Минздрав РФ, 2000.
- 2 M.A. Smethurst, The predictive power of airborne gamma ray survey data on the locations of domestic radon hazards in Norway: A strong case for utilizing airborne data in large-scale radon potential mapping, //Journal of Environmental Radioactivity, 2017, V.(166-2), P. 321-340.

### РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ IN-VIVO ТЕРМОМЕТРИИ СЕАНСОВ ЛОКАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ В РАМКАХ КОМБИНИРОВАННОГО ЛЕЧЕНИЯ

Седелникова Т.А.<sup>1</sup>, Григорьева А.А.<sup>1</sup>, Милойчикова И.А.<sup>1,2</sup>

Научный руководитель: Милойчикова И.А.<sup>1,2</sup>, к.ф.-м.н., доцент

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт онкологии Томского НИМЦ РАН,  
634009, г. Томск, пер. Кооперативный, 5

E-mail: sedelnikova.tatyana99@mail.ru

В современной клинической онкологии утверждается тенденция использования комплексных методов борьбы с онкологическими заболеваниями с целью повышения эффективности лечения злокачественных новообразований. [1]. Широкое распространение нашли сочетания лучевой и химиотерапии с оперативным вмешательством. Распространенными источниками облучения являются гамма-терапевтические аппараты для дистанционной и контактной радиотерапии. Однако современная высокотехнологичная медицинская помощь в области лучевой терапии требует применения дополнительных радиомодификаторов.

В качестве модификатора, избирательно усиливающего чувствительность опухолевых клеток в лучевой и химиотерапии используется локальная гипертермия, т.е. нагрев опухоли в определенном температурно-экспозиционном режиме [2]. Во время сеанса гипертермии необходимо учитывать фактические температуры [3], достигаемые в тканях, как следствие необходимо проводить *in-vivo* термометрию. Для проведения корректной термометрии необходимо помещать датчик непосредственно в опухоль. Как следствие возникает необходимость его стерилизации, что может повлиять на работоспособность и срок службы датчика. Решением данной проблемы становится применение стерильных запаянных катетеров [4].

В данной работе была разработана методика проведения *in-vivo* термометрии сеансов локальной гипертермии с применением стерильных запаянных катетеров. Были получены экспериментальные результаты по измерению уровня нагрева новообразования при проведении сеансов локальной гипертермии в рамках комбинированного лечения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чиссов В.И. и др. Руководство по онкологии. – ООО «Медицинское информационное агентство», 2008. – 840 с.
2. Чойнзонов Е.Л. и др. Измерение температурного поля в фантоме головного мозга с имитацией глиобластомы при транскраниальной высокочастотной гипертермии // Медицинская техника, 2017. – №. 5. – С. 34-37.
3. Sahinbas H., Rosch M., Demiray M. Temperature measurements in a capacitive system of deep loco-regional hyperthermia // Electromagnetic biology and medicine, 2017. – V. 36. – №. 3. – P. 248-258.
4. Григорьева А.А. и др. Исследование влияния материалов медицинских катетеров на эффективность *in-vivo* термометрии // Функциональные материалы: разработка, исследование, применение: сборник тезисов докладов V Всероссийского конкурса научных докладов студентов, г. Томск, г. Тамбов, 22-23 мая 2018 г. – Томск, 2018. – 2018. – С. 49.

### СОЗДАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ КОЛЛИМАТОРОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕДИЦИНСКИХ ПУЧКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ИСТОЧНИКА <sup>60</sup>Co

Григорьева А.А.<sup>1</sup>, Булавская А.А.<sup>1</sup>, Милойчикова И.А.<sup>1,2</sup>

Научный руководитель: Стучебров С.Г.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., доцент

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



<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт онкологии Томского НИМЦ РАН,  
634009, г. Томск, пер. Кооперативный, 5  
E-mail: agrigorieva@tpu.ru

Использование радиоактивных изотопов в медицине, в частности в онкологии, на сегодняшний день повсеместно распространено и применяется как для диагностики, так и для терапии злокачественных новообразований в виде радиофармпрепаратов и облучателей [1]. С особым успехом радиоактивные изотопы используются в терапевтических установках для дистанционной лучевой терапии (ЛТ). Наиболее распространенным радионуклидом в установках подобного типа является <sup>60</sup>Co, имеющий продолжительный период полураспада (5,27 лет) и энергию излучения гамма-квантов 1,25 МэВ, достаточную, чтобы вызвать функциональные и анатомические изменения в тканях и органах тела человека [2]. Так, к настоящему моменту, в России используется 420 установок для дистанционной лучевой терапии, из них 270 являются гамма-терапевтическими установками на базе <sup>60</sup>Co [3].

При проведении сеансов лучевой терапии на гамма-терапевтических установках, необходимо подводить максимально возможную дозу облучения на патологический очаг, учитывая индивидуальные анатомические особенности каждого пациента с целью защиты здоровых тканей и органов человека [1, 4]. Таким образом, форма поля облучения для дистанционной ЛТ должна быть максимально приближена к конфигурации патологического очага. Основным недостатком гамма-аппаратов для ЛТ является отсутствие многопесткового коллиматора в системе формирования поля. Для того чтобы обеспечить конформные условия облучения, необходимо применять дополнительные устройства коллимирования полей облучения при проведении сеансов ЛТ гамма-излучателями.

Решением данной проблемы может стать изготовление индивидуальных коллимирующих устройств методами трехмерной печати. Использование технологий трехмерной печати позволит изготовить модификационные устройства для медицинского назначения за короткий срок. Применение подобного рода технологий в онкологии очень важно, поскольку некоторые онкологические заболевания характеризуются очень высокой динамикой прогрессирования и высокой реакцией на терапию. В свою очередь, подобные модификационные устройства, изготовленные методами трехмерной печати, повысят точность доставки дозы при проведении сеансов на гамма-терапевтических установках, обеспечат защиту критических органов и увеличат эффективность лечения в целом.

В рамках данной работы предлагается изготовить индивидуальный коллиматор методами трехмерной печати для формирования пучков гамма-излучения <sup>60</sup>Co медицинского назначения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10052).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bernier J., Hall E.J., Giaccia A. Radiation oncology: a century of achievements // Nature Reviews Cancer, 2004. – V. 4. – №. 9. – P. 737.
2. Audi G., Wapstra A.H., Thibault C. The AME2003 atomic mass evaluation:(II). Tables, graphs and references // Nuclear physics A, 2003. – V. 729. – №. 1. – P. 337-676.
3. Рахманин Ю.А., Костылев В.А. Анализ технического и технологического оснащения лучевой терапии в России // Альманах клинической медицины, 2006. – №. 12.
- Gerber D.E., Chan T.A. Recent advances in radiation therapy // Am Fam Physician, 2008. – V. 78. – №. 11. – P. 1254-1262.

## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ВЫВОДА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МЕДИЦИНСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

Милойчикова И.А.<sup>1,2</sup>, Булавская А.А.<sup>1</sup>, Черепенников Ю.М.<sup>1</sup>

Научный руководитель: Стучебров С.Г.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., доцент

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт онкологии Томского НИМЦ РАН,  
634009, г. Томск, пер. Кооперативный, 5  
E-mail: miloichikova@tpu.ru

Для проведения лучевой терапии используются разные виды установок, например, такие как гамма-терапевтические аппараты с радионуклидным источником <sup>60</sup>Co для дистанционной и брахитерапии, рентгеновские аппараты для близкофокусной терапии, и медицинские ускорители для высокоточного конформного облучения [1]. Для проведения лучевой терапии поверхностных и неглубоко залегающих новообразований широко используются электронные пучки медицинских ускорителей [1, 2]. С повышением требований к точности доставки дозы необходимо применять дополнительные модификаторы поля облучения. Для формирования границ фигурных полей облучения, медицинские аппараты дополнительно комплектуются набором металлических блоков. Однако, ограниченный состав таких наборов не позволяет формировать пучки произвольной сложной формы. Данные блоки устанавливаются оператором вручную для каждого сеанса облучения, что ведет к увеличению времени

подготовки к лечению, а человеческий фактор вносит погрешность в точность доставки дозы [1]. Для модуляции глубинного распределения дозы используются тканеэквивалентные болусы, которые располагаются в непосредственном контакте с пациентом, либо металлические компенсаторы, которые располагаются на заданном расстоянии от поверхности кожи [3].

Болус и компенсатор необходимо изготавливать индивидуально для каждого пациента. Авторами [4] предложено использовать технологии трехмерной печати для изготовления подобных элементов, формирующих глубинное распределение медицинского электронного пучка. При выборе материалов необходимых для печати подобных объектов, разработке их геометрии и оценке сформированного ими дозного распределения, необходимо проводить численное моделирование с применением метода Монте-Карло [5].

В рамках данной работы была создана численная модель системы вывода электронного пучка медицинского ускорителя с использованием инструментария Geant4 [5]. Получены результаты численного моделирования глубинного распределения дозы и поперечного профиля электронного пучка с номинальной энергией 12 МэВ в водном фантоме.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khan F.M., Gibbons J.P. Khan's the physics of radiation therapy. – Fifth edition. – Lippincott Williams & Wilkins, 2014. – 572 p.
2. Hogstrom K.R., Almond P.R. Review of electron beam therapy physics // *Physics in Medicine & Biology*, 2006. – V. 51. – №. 13. – P. R455.
3. Mahdavi H., Jabbari K., Roayaei M. Evaluation of various boluses in dose distribution for electron therapy of the chest wall with an inward defect // *Journal of Medical Physics/Association of Medical Physicists of India*, 2016. – V. 41. – №. 1. – P. 38.
4. Miloichikova I. et al. Feasibility of clinical electron beam formation using polymer materials produced by fused deposition modeling // *Physica Medica*, 2019. – V. 64. – P. 188-194.
5. Allison J. et al. Recent developments in Geant4 // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016. – V. 835. – P. 186-225.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА И ПЛОТНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Чернова О.С., Григорьева А.А., Черепенников Ю.М.

Научный руководитель: Стучебров С.Г., к.ф.-м.н., доцент

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: osc6@tpu.ru

Медицинская визуализация позволила достичь высокой эффективности диагностики онкологических заболеваний. Основными высокоэффективными методам медицинской визуализации являются магниторезонансная томография, позитронно-эмиссионная томография и компьютерная томография [1].

Компьютерная томография – метод, основанный на облучении исследуемого объекта рентгеновским излучением под разными углами. За счет высокой точности данный метод является наиболее эффективным при диагностике различных заболеваний головного мозга, легких, сердечно-сосудистой системы и других органов [2]. Контроль работы томографа проводится на специализированных макетах, называемых фантомами, которые должны иметь области с разной рентгеновской плотностью для имитации различных структур человеческого тела.

В данной работе было проведено облучение образцов разной рентгеновской плотности импульсным источником рентгеновского излучения с целью определения плотностей материалов, из которых изготовлены фантомы, и параметров их изготовления путем сравнения его рентгеновского снимка со снимками тестовых образцов. В ходе обработки результатов была составлена таблица, включающая в себя данные RGB-профилей образцов материалов и тестовых моделей.

В результате был определен состав исследуемого фантома путем сравнения плотности просвечивания тестовых образцов и его материалов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10052).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аврунин О.Г., Семенец В.В., Борисовна Щ.А Методы визуализации внутримозговых структур на современном этапе // *Радиоэлектроника и информатика*, 1999. – №4 (9). – С. 107-108.
2. Марусина М.Я., Казначеева А.О. Современное состояние и перспективы развития томографии // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2007. – №42. – С. 3-13.

## ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ



## СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА

Булавская А.А., Григорьева А.А., Стучебров С.Г.

Научный руководитель: Стучебров С.Г., к.ф.-м.н., доцент  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: bulavskaya@tpu.ru

Основные требования к современным методам измерения распределения интенсивности ионизирующего излучения в поперечной плоскости пучка заключаются в следующем: достаточное пространственное разрешение результатов измерения; малое время набора и обработки данных; минимизация возмущения пучка в процессе измерения. Большинство существующих подходов, таких как матричные детекторы [1], пленочные дозиметры [2], флуоресцентные экраны [3], не отвечают совокупности всех этих требований.

В связи с этим существует необходимость разработки метода, позволяющего создавать устройства, которые будут измерять распределение интенсивности ионизирующего излучения в поперечной плоскости пучка с высоким пространственным разрешением в режиме реального времени, с минимальными потерями ионизирующего излучения в рабочем теле детектора. Такой метод не должен предполагать использование расходных материалов, которые необходимо заменять после одного или нескольких измерений, при этом система должна быть устойчива к внешним электромагнитным возмущениям, которые характерны при работе ускорительной техники.

Данная работа направлена на разработку метода, позволяющего регистрировать распределение интенсивности ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка. Предлагается проводить многократное линейное сканирование пучка при разных углах сканирующего проволочного детектора в поперечном сечении пучка. Полученные данные математически преобразовываются в зависимость интенсивности потока излучения от координат в измеряемой плоскости. В работе представлены результаты экспериментов по измерению распределения интенсивности рентгеновского излучения в поперечном сечении пучка предлагаемым методом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10052).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Létourneau D. et al. Evaluation of a 2D diode array for IMRT quality assurance // *Radiotherapy and oncology*, 2004. – V. 70. – №. 2. – P. 199-206.
2. Borca V.C. et al. Dosimetric characterization and use of GAFCHROMIC EBT3 film for IMRT dose verification // *Journal of applied clinical medical physics*, 2013. – V. 14. – №.2. – P. 158-171.
- 3.** Monti A.F., Frigerio G. Dosimetric verification of 6 and 18 MV intensity modulated photon beams using a dedicated fluoroscopic electronic portal imaging device (EPID) // *Radiotherapy and oncology*, 2006. – V. 81. – №. 1. – P. 88-96.

Научное издание

**ИЗОТОПЫ: ТЕХНОЛОГИИ,  
МАТЕРИАЛЫ И ПРИМЕНЕНИЕ**

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

**Издано в авторской редакции**

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

Подписано к печати 20.10.2020. Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 8,00. Уч.-изд. л. 6,42.

Заказ 2667. Тираж 50 экз.

ООО «Офсет-центр». 634029, г. Томск, пер. Плеханова, 11