

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



**ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА ЯДЕРНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**



Передовая инженерная школа
**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ**

ИЗОТОПЫ: ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ И ПРИМЕНЕНИЕ

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

7–9 ноября 2023 г.

Издательство
Томского политехнического университета
2023

УДК 621.039.8.002(063)

ББК 35.36л0

ИЗ8

ИЗ8 **Изотопы: технологии, материалы и применение** : сборник тезисов докладов VIII Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (7–9 ноября 2023 г.) / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2023. – 187 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 проводилось на базе Передовой инженерной школы
«Интеллектуальные энергетические системы»
и Инженерной школы ядерных технологий

Программный комитет

Председатель: Гоголев А.С. – и.о. проректора по науке и стратегическим проектам, к.ф.-м.н., ТПУ, Россия;

Заместитель председателя: Мышкин В.Ф. – д.ф.-м.н., профессор ОЯТЦ ТПУ, Томск, Россия

Члены программного комитета

Филимонов С.В. генеральный директор АО «ПО ЭХЗ», г. Зеленогорск, Россия

Lijun Wang Associate professor of Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing, China

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

Duisebayev B.O. Dr., Universal Design Technological Bureau LLP, Almaty, Kazakhstan

Sosnovskiy S.A. Professor, Shenyang Ligong University (SLU), Shenyang, China

Углов В.В. д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой, Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

Палкин В.А. д.ф.-м.н., профессор Уральского федерального университета, г. Екатеринбург, Россия

Ильин С.А. директор ЗРИ ОАО «Сибирский химический комбинат», г. Томск, Россия

Власов В.А. д.ф.-м.н., профессор, ректор ТГАСУ, г. Томск, Россия

Организационный комитет конференции

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

Заместитель председателя: Видяев Д.Г. – д.т.н., профессор ОЯТЦ ТПУ

Секретарь оргкомитета: Сукотнова В.В., инженер ОЯТЦ ТПУ

Члены организационного комитета

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

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

Ливенцов С.Н. – д.т.н., профессор ОЯТЦ ТПУ

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

Каренгин А.Г. – к.ф.-м.н., доцент ОЯТЦ ТПУ

Мышкин В.Ф. – д.ф.-м.н., профессор ОЯТЦ ТПУ

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

Новоселов И.Ю. – ассистент ОЯТЦ ТПУ

Побережников А.Д. – старший преподаватель ОЯТЦ ТПУ

Пленарное заседание

DUISEBAYEV B.O.

Замкнутые химические циклы для индустрии Узбекистана, Казахстана
и мира

PLEKHANOV V.G.

Изотопическое создание новых материалов

SOSNOVSKIY S.A.

Электрохимическое получение водорода в нестационарных условиях

ПРЕДИСЛОВИЕ

Инженерная школа ядерных технологий Томского политехнического университета, является одной из ведущих центров подготовки выпускников для атомной промышленности, проводит VIII Международную конференцию молодых ученых, аспирантов и студентов «Изотопы: технологии, материалы и применение». Конференция посвящена проблемам получения различными методами изотопной продукции, методов анализа веществ и примесей, создания моноизотопных и изотопно-модифицированных материалов, расширения областей использования изотопов, методов сепарации трудно разделяемых веществ, хранения и утилизации отходов изотопных производств.

В настоящее время разработаны методы разделения веществ по изотопному составу с высокой разделительной способностью и производительностью. Показана принципиальная возможность лазерного разделения изотопов почти всех химических элементов. Однако путь практической реализации различных технологий разделения изотопов оказался непростым. Главной преградой на пути широкомасштабной практической реализации лазерных методов по-прежнему остается низкая эффективность возбуждения рабочего газа. 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. Важным аспектом является повышение энерго- и ресурсоэффективности технологий 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 или размещаемые в активной зоне реактора для увеличения глубины выгорания топлива без ухудшения его термодинамических и механических свойств. Это обеспечивает более высокую эффективность и безопасность работы реактора.

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

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

топов и использования соединений заданного изотопного состава в различных отраслях. Конференция призвана активизировать научные исследования молодых ученых, обеспечить интеграцию усилий работников вузов, НИИ и промышленных предприятий в решении актуальных проблем ядерной энергетики. Конференция направлена на обсуждение новых технологий и научных направлений для повышения качества подготовки выпускников ВУЗов.

С уважением, оргкомитет конференции.

ИЗОТОПИЧЕСКОЕ СОЗДАНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Плеханов В.Г.

Fonoriton Sci. Lab., Garon Ltd, Tallinn 11413, Estonia

Экспериментальные данные современной физики выделяют три фундаментальных свойства атомного ядра. Это масса; спин и связанный с ним магнитный момент; объём, связанный с силой взаимодействия с окружением, через которые проявляется сущность изотопического эффекта. Настоящий доклад посвящён изотопическому созданию новых материалов, используя первую из трёх степеней свободы, т. е. массу.

Введение

Полупроводниковые гетероструктуры, включая сверхрешётки, квантовые проволоки и, особенно, квантовые точки являются в настоящее время предметом исследований громадного большинства исследователей в области физики полупроводников [1]. Однако, эти же низкоразмерные структуры современных устройств могут быть созданы на основе одного химического элемента различного изотопного состава [2, 3].

Изотопы – это разновидности атомов одного химического элемента, ядра которых имеют одинаковое количество протонов, но разное количество нейтронов. Современная физика выделяет три фундаментальных свойства атомного ядра: масса, спин и связанный с ним магнитный момент; и объём, связанный с силой взаимодействия с окружением, через которые проявляется суть изотопного эффекта. Результаты большого числа экспериментальных и теоретических работ, где детально исследован массовый изотопный эффект (эффект первого рода [4]) в разных веществах и разных состояниях от газообразного до твёрдого тела, создали основу нового направления нанонауки, по праву называемого изотопным материаловедением [2–7].

Наиболее ярко в твёрдом теле изотопный эффект, связанный с изменением массы ядра, проявляется на колебаниях кристаллообразующих частиц, что приводит к изменению их колебаний и свойств кристалла, обусловленных фононами. Говоря о динамике решётки, мы прежде всего имеем в виду влияние изотопного замещения на упругие, термические и колебательные свойства кристаллической решётки. Если изменение постоянной решётки составляет $\Delta a/a \approx 10^{-3} - 10^{-4}$, то изменение δc_{ik} упругих постоянных составляет уже несколько процентов.

Очень заметные и общие эффекты наблюдаются при изотопном замещении в фононном спектре, особенно в спектральном районе LO фо-

нонов. Сдвиг LO линий в спектрах комбинационного рассеяния света в алмазе лежит в пределах 50 см^{-1} , тогда как в кристаллах $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$ он превосходит 200 см^{-1} [8, 9]. Очистка полупроводниковых кристаллов от неосновных изотопов кристаллов алмаза, Ge, Si и других приводит к возрастанию коэффициента теплопроводности на порядки. Добавим, что изотопный эффект перенормирует также энергию электронных возбуждений твёрдых тел через электрон-фононное взаимодействие. Если в Ge при изотопном эффекте величина энергии межзонных переходов E_g изменяется на 1 мэВ, то в алмазе и в кристаллах $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$ на 15,4 [10] и 104 мэВ, соответственно (подробнее см. обзоры [8, 9]). Указанные выше довольно большие величины и они легко измеряются методами современной экспериментальной физики (ультразвук, Мандельштам-Бриллюэновское и комбинационное рассеяния света, рассеяние нейтронов, поглощение и отражение света в фундаментальной области).

Каждое из перечисленных выше свойств, зависящих от изотопного состава материала, имеет практическое воплощение в существующих или развивающихся технологиях. Именно поэтому представляется целесообразным написать этого обзора, поскольку его появление позволит не только очертить хорошо известные результаты, но и сформулировать задачи, требующие первостепенного решения этого нового направления нанонауки – изотопного материаловедения. Таким образом изотопическое материаловедение это часть классического материаловедения и прямо описывает создание новых материалов, используя изотопический эффект. Наиболее прямой путь измерения макроскопических характеристик изотопически созданных новых материалов это контроль и измерение фононных и электронных состояний этих твердых тел.

2. Зависимость фундаментальных характеристик от изотопного состава материалов

2.1. Фононы

Простейшим видом движения в твердом теле является колебания атомов (кристаллообразующих частиц) вокруг положения равновесия. Из-за взаимодействия частиц друг с другом движение одного атома вовлекает в движение соседние атомы [9, 11]. Анализ показывает, что элементарной формой движения являются волны смещения атомов. Как известно квантование колебаний кристаллической решетки и после введения нормальных координат, гамильтониан задачи будет иметь вид:

$$\hat{H}(\mathbf{Q}, \mathbf{P}) = \sum_{j,q} \left[-\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{Q}_j^2(\vec{q})} + \frac{1}{2} \omega_j^2(\vec{q}) \mathbf{Q}_j^2(\vec{q}) \right]. \quad (1)$$

Приведенный гамильтониан, есть сумма, где каждое слагаемое имеет вид гамильтониана линейного гармонического осциллятора с ко-

ординатой $Q(q)$, частотой $\omega_j(q)$ и массой равной единице. Если гамильтониан системы состоит из суммы, каждое слагаемое которой зависит только от одной координаты и сопряженного ей импульса, то, как известно из квантовой механики, волновая функция системы равна произведению волновых функций, соответствующих каждому слагаемому, а энергия равна сумме соответствующих энергий. Отдельное слагаемое гамильтониана (1), соответствует, как сказано, линейному осциллятору:

$$-\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Q^2} + \frac{1}{2} \omega^2 Q^2 \Psi = \varepsilon \Psi. \quad (2)$$

Решая это уравнение, и находя собственные значения и собственные функции и выражая явно частоту, получим для двух атомов (с массами M_1 и M_2) в элементарной ячейке для случая $Ka \ll 1$:

$$\omega^2 \simeq 2C \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right), \quad (3)$$

и

$$\omega^2 = \frac{C}{2(M_1 + M_2)} K^2 a^2. \quad (4)$$

Учитывая, что $K_{max} = \pm\pi/a$, где a – период решетки, т. е. K_{max} отвечает границе первой зоны Бриллюэна:

$$\omega^2 = \frac{2C}{M_1} \text{ и } \omega^2 = \frac{2C}{M_2}. \quad (5)$$

Формула (3) описывает так называемую оптическую ветвь колебаний, тогда как (4) – акустическую (см. рис. 1, главы 4 в [3]). Обычно, в общем виде, последнюю формулу пишут в виде (подробнее см. [9]):

$$\omega = \sqrt{\frac{a}{M}}, \quad (6)$$

где a – так называемая силовая постоянная, M – масса атома (иона).

Отсюда становится понятно, что, как и в молекулярной физике, в твердом теле изотопический эффект прямо проявляется в колебательном спектре, который в зависимости от симметрии [12] регистрируется либо с помощью ИК-поглощения или методом комбинационного рассеяния [13–19].

Спектр комбинационного рассеяния света первого порядка алмаза содержит также одну линию с максимумом $\omega_{LTO(\Gamma)} = 1332,5 \text{ см}^{-1}$. На рис. 1 показан спектр рассеяния первого порядка кристаллов алмаза с разной концентрацией изотопов [16]. Как будет показано в работах [8, 9] и ширина линии рассеяния первого порядка в изотопически-смешанных кристаллах алмаза зависят нелинейно от концентрации изотопов x . Максимальный сдвиг этой линии составляет $52,3 \text{ см}^{-1}$, что соответствует двум предельным значениям: $x = 0$ и $x = 1$. Аналогичная структура спектров первого порядка рассеяния света и ее зависимость от изотопического состава теперь уже многократно наблюдалась не только в элементарных Si и α -Sn, но и составных полупроводниках

CuCl и GaN (см., подробнее [3, 8]). Уже эта краткая сводка данных показывает большую зависимость структуры спектров рассеяния света первого порядка в алмазе по сравнению с другими кристаллами (Si, Ge), что является предметом подробного обсуждения в работе [9].

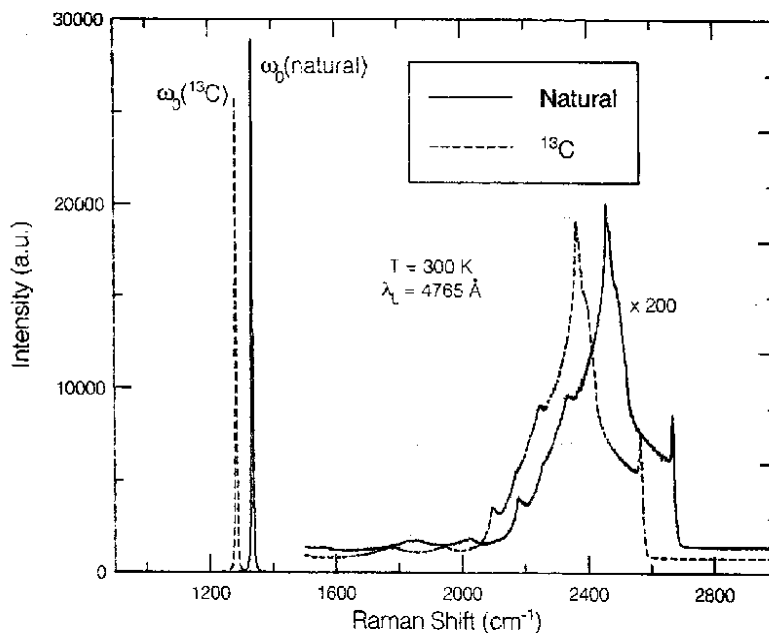


Рис. 1. Спектр комбинационного рассеяния первого и второго порядков натурального и синтетического (^{13}C) алмазов

Спектры комбинационного рассеяния света второго порядка натуральных и изотопически-смешанных кристаллов алмаза исследовались Кренко [17] и Хассом с сотрудниками [18]. Спектры комбинационного рассеяния света второго порядка ряда кристаллов синтетического алмаза с различной концентрацией изотопов показан на рис. 2. Приведенный спектр измерен с худшим разрешением ($\sim 4 \text{ см}^{-1}$), чем спектр рассеяния первого порядка. Такое обстоятельство, согласно авторам процитированной работы, вызвано слабым сигналом при измерении спектров КРС второго порядка.

Следует заметить, что результаты, полученные в работе [18] для алмаза природного изотопного состава ($[^{13}\text{C}] = 1,1 \%$) хорошо согласуются с предыдущими исследованиями спектров комбинационного рассеяния света кристаллов натурального алмаза (см., также [10]). Элементарные полупроводники (C, Si, Ge, $\alpha\text{-Sn}$) имеют структуру алмаза. Такие структуры характеризуются трёхкратно вырожденными колебаниями в Γ -точке зоны Бриллюэна. Как уже отмечалось такие колебания активны в спектрах комбинационного рассеяния, но не в спектрах ИК-поглощения [12]. Поскольку Ge имеет пять стабильных изотопов, то

разумно следовало бы наблюдать пять линий в спектрах комбинационного рассеяния первого порядка. Однако в эксперименте наблюдается только одна линия, частота которой обратно пропорционально $M^{-0.5}$, где M усредненная масса пяти изотопов. Отсутствие Андерсоновской [19, 20] локализации фононов обусловлено малым изменением массы изотопов германия. Аналогично и для других элементарных полупроводников. Обычно для этих целей сравниваются зоны соответствующих возбуждений (для оптических фононов ширина зоны в германии $W \sim 100 \text{ см}^{-1}$) и величина массовой флуктуации, выраженная в энергетических единицах, для германия последняя величина порядка $\Delta \approx 12 \text{ см}^{-1}$. Из соотношения этих величины видно, что ширины зоны фононов в Ge значительно превосходит флуктуацию масс [20]. Отсюда следует, что при изотопическом замещении в Ge изменения потенциала слишком малы. По этой причине динамика решётки хорошо описывается в приближении когерентного потенциала [8].

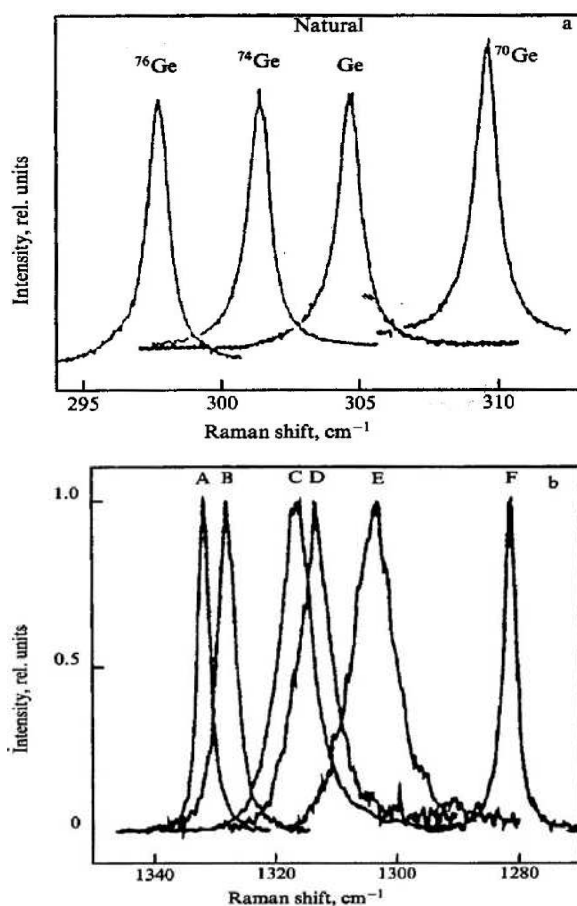


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния первого порядка кристаллов германия [8] и алмаза [16] с разной концентрацией изотопов

Простейшими дефектами в кристаллической решетке, нарушающими ее трансляционную симметрию, являются изотопы образующих кристалл элементов. В большинстве случаев влияние изотопов на колебательный спектр является малым и не учитывается при расчетах дисперсионных кривых. Иначе обстоит дело в системе $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$. Как показано в целом ряде работ [3, 9, 15] большое изменение массы при замене водорода на дейтерий в названной системе смещает всю оптическую зону колебаний на величину 250 см^{-1} (см. рис. 9 в [9]). Отсюда ясно, что и малые концентрации изотопов могут вызывать существенные эффекты, особенно в явлениях, связанных с движением самих дефектов [21]. В случае малых концентраций основные эффекты заключаются в появлении различных индуцированных дефектами процессов. Например, ИК-поглощение идеальной решетки состоит в гармоническом приближении из одного дельта-образного пика на частоте оптического фонона. При этом введение дефектов снимает правило отбора по волновому вектору, благодаря чему возникает дополнительное поглощение во всей области частот (с интенсивностью, пропорциональной концентрации дефектов). Изменение массы атома вызывает появление трех типов особенностей в фононном спектре [20, 21]: локальных, щелевых и квазилокальных (резонансных) колебаний. Колебания первого типа имеют частоты, расположенные выше максимальной частоты фононного спектра кристаллических колебаний и возникают при достаточно сильном уменьшении массы атома (иона). Частоты колебаний второго типа лежат в щели между оптической и акустической зонами. Эти колебания могут возникать как при уменьшении, так и при возрастании массы. Колебания-резонансы возникают, если масса дефекта значительно превосходит массу замещенного иона; они характеризуются острыми максимумами в функции распределения частот в области $\omega \ll \omega_{\text{max}}$.

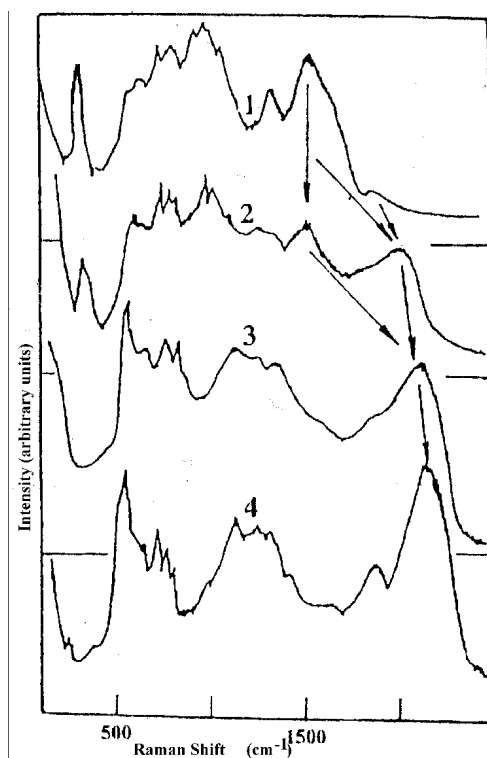
Ранее экспериментально было показано [22], что изотопическое замещение тяжелого изотопа лёгким в системе $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$ приводит к очень сильному потенциалу рассеяния, что вызывает локализацию оптических фононов. Последнее прямо наблюдается в спектрах комбинационного рассеяния света кристаллов LiD при комнатной температуре (см. рис. 3). Несмотря на то, что, согласно номограмме экситонных состояний [23] исследуемый кристалл следует считать чистым LiD , тем не менее в спектре КРС его отчетливо наблюдается высокочастотный пик в области 1850 см^{-1} . Наблюдаемый пик не имеет аналога в спектрах КРС чистого кристалла LiH , природа которого обусловлена локальным колебанием иона водорода в кристаллах LiD . Расчетное значение лежит в интервале от 917 см^{-1} до 948 и 995 см^{-1} [9, 21]. Наблюдаемый в спектрах КРС пик при $\approx 1850 \text{ см}^{-1}$, как видно хорошо согласуется с удвоен-

ной величиной наиболее последовательно рассчитанного значения $\omega_{\text{лок}} = 917 \text{ см}^{-1}$. Хотя актуальная концентрация ионов Н в исследуемых кристаллах LiD очень низка (согласно [23] положение максимума линии $n = 1s$ в спектрах отражения и люминесценции соответствует чистому кристаллу LiD) однако, как видно, из рис. 14 в [9] все же достаточно для наблюдения локальной моды в спектрах КРС второго порядка.

Если содержание примеси (изотопа) в кристалле возрастает до такого предела, что становится существенным взаимодействие между примесными атомами (изотопами), то о такой системе принято говорить как о смешанном кристалле с различной степенью разупорядочения [21]. На рис. 3 согласно результатам работы [22] представлены спектры КРС второго порядка смешанных кристаллов $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$ при комнатной температуре. Ясно видно, что с дальнейшим увеличением концентрации водорода $x > 0.15$, в спектрах наблюдается уменьшение интенсивности максимума $2\text{LO}(\Gamma)$ фононов кристалла LiD с одновременным ростом интенсивности самого высокочастотного пика смешанных кристаллов $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$. Природа последнего обусловлена перенормированными $\text{LO}(\Gamma)$ колебаниями в смешанном кристалле [22]. Таким образом, сравнение структуры спектров КРС кривых 1 и 2 рис. 3 позволяет заключить, что в области концентраций $0,1 < x < 0,45$ [20–23] в спектре КРС одновременно наблюдается пики $\text{LO}(\Gamma)$ чистого LiD и $\text{LO}(\Gamma)$ – фонона смешанного кристалла $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$. С дальнейшим ростом $x > 0.45$ можно отметить два эффекта в спектрах КРС смешанных кристаллов. Первый связан с существенной перестройкой акустооптической части спектра. Это вытекает из сравнения структуры спектров, представленных кривыми 1–3 на рис. 3. Второй эффект обусловлен дальнейшим сдвигом в высокочастотную сторону самого высокочастотного пика смешанных кристаллов, связанного с возбуждением $\text{LO}(\Gamma)$ фононов. Пределом этого сдвига является спектральное положение самого высокочастотного пика в спектре чистого кристалла LiH. Особенно наглядно это просматривается при сравнении кривых 2 и 4 на рис. 3.

Завершая описание спектров КРС, следует отметить, что резонансное возрастание интенсивности самого высокочастотного пика наблюдается во всех смешанных кристаллах при $x > 0,15$ (см., подробнее [24]). Как видно из рис. 3 в области концентраций $x < 0.45$ наблюдается двухмодовый характер $\text{LO}(\Gamma)$ фононов. Это прямо противоречит предсказаниям CPA-модели [25], согласно которой для концентраций $x \sim 0,5$ ширина зоны оптических колебаний (W) должна быть меньше сдвига (Δ) частоты поперечного оптического фонона, т. е., $\Delta > W$. Однако, выполненные расчёты в работах [20, 21] показывают для кристаллов LiH (LiD) обратное соотношение, т. е., $W > \Delta$. Согласно [22] наблюдаемое расхождение результатов эксперимента и предсказаниями теории в рамках CPA-модели [25] связано

в первую очередь с сильным потенциалом рассеяния фононов, обусловленным большим изменением масс при замещении водорода дейтерием. В пользу сказанного свидетельствует также наблюдение локальной моды в этих системах. Последнее согласуется с результатами работ [14, 18] где подчеркивалось, что наблюдение локальной моды в спектрах КРС является прямым экспериментальным доказательством сильного потенциала рассеяния фононов при изотопическом замещении. Именно с этим связано в первую очередь невозможность описать экспериментальные результаты, полученные на смешанных кристаллах $\text{LiH}(\text{D})$, в CPA-модели при слабом рассеянии фононов. С другой стороны, необходимо подчеркнуть, успешность CPA-модели для случая слабого рассеяния фононов в кристаллах германия и алмаза [8]. Для двух последних кристаллов параметр малости теории при изотопическом замещении действительно мал, тогда как для смешанных кристаллов $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$ он $\sim 0,5$, т. е., не мал. Таким образом, представленные в настоящем разделе экспериментальные результаты свидетельствуют, во-первых, о сильном потенциале рассеяния в первую очередь оптических фононов в кристаллах $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$ и, во-вторых, о недостаточности CPA-модели в согласованном описании таких результатов.



*Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния второго порядка кристаллов $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$ при комнатной температуре:
 $1 - x = 0,2$; $2 - x = 0,42$; $3 - x = 0,76$; $4 - x = 1$.
 Стелки показывают эволюцию пика $\text{LO}(\Gamma)$ фонона в смешанных кристаллах*

Большое различие электронных поляризуемостей ионов водорода ($a^- = 1,68$) и лития ($a = 0,029$) в гидриде лития (и его изотопов) до сих пор остается одним из главных источников затруднения в выработке единой модели для последовательного и удовлетворительного описания дисперсионных кривых и упругих постоянных [22, 23]. Многочисленные попытки преодолеть эти трудности заставили уже Лапласа обратить серьезное внимание на последовательный учет ангармонизма в динамике решетки LiH [26]. Экспериментальное наблюдение многофононных LO повторений в спектрах люминесценции свободных экситонов в кристаллах $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$, а также в спектрах резонансного комбинационного рассеяния при гелиевых температурах прямо свидетельствовали о сильном ангармонизме названной системы. Качественное описание ангармонизма фононов [21] в этих кристаллах находят дальнейшее подтверждение в прямых расчётах динамики решётки кристаллов LiH и его изотопа LiD в работах [27, 28]. Приведённые фононные спектры ярко свидетельствуют о появлении новых материалов при изотопическом замещении атомов (ионов).

2.2. Электронные возбуждения

Непрямые переходы в фундаментальном спектре поглощения кристаллов алмаза, германия, кремния, фосфида галлия приводят к наличию ступенек, обусловленных участием актуальных фононов в этом процессе (подробнее см. следующий параграф). Отсутствие тонкой структуры экситонов благодаря отмеченному обстоятельству в спектрах фундаментального поглощения не позволяют получить ярких эффектов, связанных с изотопическим эффектом (см., подробнее [7, 9]).

Гораздо ранее, чем для перечисленных выше кристаллов, был выполнен целый цикл экспериментальных работ, посвященных спектроскопии экситонов большого радиуса с прямыми электронными переходами LiH (LiD) [29], Cu_2O [30, 31], ZnO [32, 33], CdS [34], где применялось изотопическое замещение. Благодаря тонкой структуре экситонных спектров поглощения (отражения) впервые было продемонстрировано не только изменение величины энергии межзонных переходов E_g , но и детально исследован закон изменения E_g от концентрации различных изотопов [3]. Более того, впервые на системе $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$ [29] была обнаружена зависимость энергии связи экситона Ванье-Мотта E_b от изотопического эффекта, которая нелинейно зависит от концентрации изотопов [35].

Поскольку при изотопическом замещении изменяется только фононная волновая функция, то в уравнении Шредингера значения энергии электронных уровней должны были бы остаться без изменения. Од-

нако, это не так, поскольку при изотопическом замещении изменяется не только фононный спектр, но и константа электрон-фононного взаимодействия [9]. Именно благодаря этой причине уже значения энергии чисто электронного перехода в молекулах гидрида и дейтерида были различны [35]. Этот эффект становится еще заметнее при переходе к твердому телу. Качественное согласие с этим выводом было получено в 30-х годах в работе Капустинского с соавторами [36]. Сравнение спектров поглощения тонких пленок LiH и LiD, измеренных при комнатной температуре показало [36], что длинноволновый (как теперь ясно, экситонный) максимум сдвигается в коротковолновую сторону на 64.5 мэВ при замене H на D. Этот принципиальный результат не получил тогда последовательного и глубокого объяснения, что несколько не умаляет его фундаментального значения и в наши дни. Как будет показано ниже, этот эффект становится еще убедительнее при низких температурах.

Спектры зеркального отражения смешанного и чистого кристаллов LiD, сколотых в сверхтекучем гелии, представлены на рис. 4. Там же для сравнения нанесен и спектр отражения кристаллов LiH с чистой поверхностью, а также указано разрешение спектрального прибора

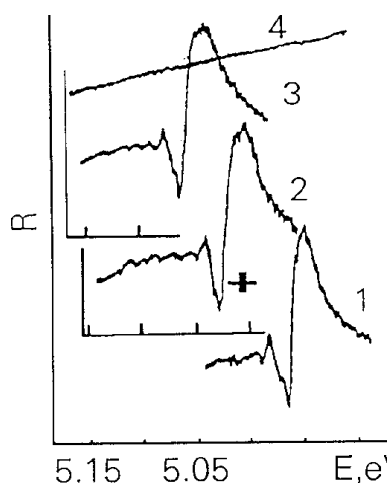


Рис. 4. Спектр зеркального отражения кристаллов LiH (1), $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$ (2), LiD (3) при 4.2 К, распределение интенсивности света от лампы через установку без кристалла (4)

Все спектры получены на одной и той же установке и в одинаковых условиях. С ростом концентрации дейтерия наблюдается уширение [3] и коротковолновый сдвиг [9] длинноволнового максимума. Как ясно видно из рис. 4 все спектры обладают одинаковой длинноволновой структурой. Это обстоятельство позволяет связать ее природу с возбуждением основного (1s) и первого возбужденного (2s) состояний экситона. Значение энергий экситонных максимумов чистых и смешанных

кристаллов при 2 К собраны в табл. 1. Определенная по водородоподобной формуле энергия связи экситонов E_b и энергия межзонных переходов E_g также приведены в табл. 1. Определенная по температурному тушению интенсивности пика отражения 2s состояния в LiD энергия ионизации его равна 12 мэВ. Эта величина неплохо согласуется со значением ΔE_{2s} найденным по водородоподобной формуле. Более того, со значением $R_{\text{эк}} = 50$ мэВ для LiD хорошо согласуется энергия активации теплового тушения интенсивности люминесценции свободных экситонов в этих кристаллах [3, 9].

Возвращаясь к результатам рис. 4 трудно не заметить возрастание величины энергетического расстояния между 1s и 2s уровнями экситона $\Delta \mu_{1s}$ [35, 37], которая в рамках водородоподобной модели обуславливает возрастание экситонного ридберга при изотопическом замещении. При 100%-ом замещении водорода дейтерием величина экситонного ридберга (в рамках модели Ванье-Мотта) возрастает на 20 % – от 40 до 50 мэВ, тогда как величина E_g – на 2 % (см. ниже рис. 10) и составляет при 2–4.2 К $\Delta E_g = 103$ мэВ. Эта величина зависит от температуры и при комнатной температуре составляет 73 мэВ [35], что неплохо согласуется с $\Delta E_g = 64.5$ мэВ, найденным в работе Капустинского и др. [36]. Непрерывное изменение величины экситонного ридберга наблюдалось ранее и в кристаллах твердых растворов A_3B_5 [38, 39] и A_2B_6 [35]. Изотопическое замещение легкого изотопа (^{32}S) тяжелым (^{34}S) в кристаллах CdS [34] приводит к уменьшению экситонного ридберга, что авторы гипотетически связывали с вкладом ближайших электронных зон (см. также [35]), которых, однако, нет в случае LiH. Одномодовый характер экситонных спектров отражения смешанных кристаллов $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$ качественно согласуется с результатами модели виртуального кристалла (см., например, [3, 40]), являясь одновременно предельным ее выражением, поскольку разность потенциалов ионизации (ξ) для этого соединения равна нулю. Согласно модели виртуального кристалла при $\xi = 0$ должно выполняться условие $\Delta E_g = 0$, что противоречит результатам эксперимента на кристаллах $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$. К настоящему времени изменение величины E_g при изотопическом замещении наблюдалось уже на целом ряде широкощелевых и узкощелевых полупроводниковых соединениях (подробнее см. [9]). Для сравнения еще раз укажем, что для кристаллов LiH величина изменения энергии E_g составляет 103 мэВ ($\approx 831 \text{ см}^{-1}$). Видно, что перенормировка изотопическим эффектом величины E_g в LiH на порядок больше, чем в алмазе, хотя значение ширины запрещенной зоны для алмаза ($E_g = 5.48$ эВ, $\hbar\omega_{LO} = 0.165$ мэВ, [41]) превосходит величину E_g в LiH. В заключении добавим, что при замене ^7Li на ^6Li величина E_g уменьшается на 97 см^{-1} (см. табл. 1).

Таблица 1

Значения энергии максимумов в экситонных спектрах зеркального отражения моноизотопных и смешанных кристаллов $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$ при 2 К, а также экситонного ридберга E_b и межзонных переходов E_g (все значения даны в мэВ)

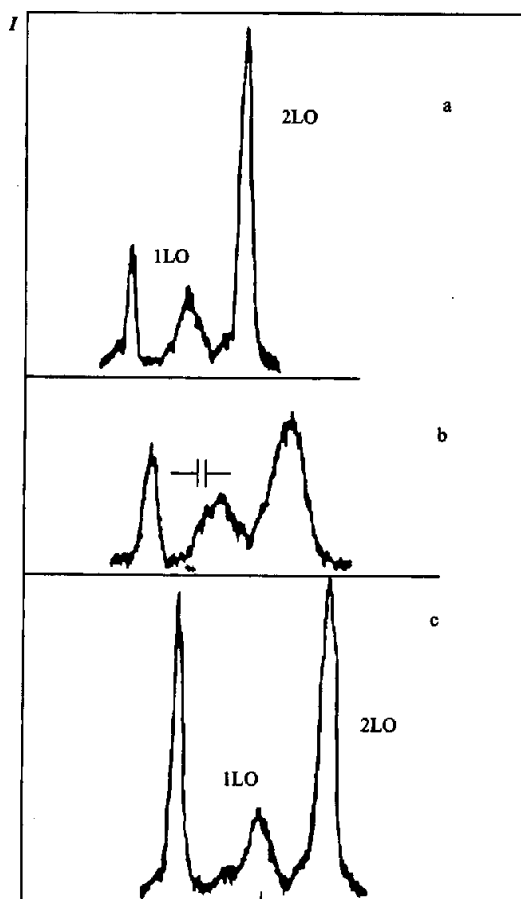
	LiH	$\text{LiH}_{0,82}\text{D}_{0,18}$	$\text{LiH}_{0,40}\text{D}_{0,60}$	LiD	Li^6H (78 К)
E1	4950	4967	5003	5043	4939
E2	4982	5001	5039	5082	4970
E_b	42	45	48	52	41
E_g	4992	5012	5051	5095	4980

Более детально влияние изотопического эффекта на низкотемпературные экситонные спектры отражения и люминесценции кристаллов CdS было исследовано в работах [42, 43]. В работе [42] изучено влияние изотопического замещения Cd на экситонные спектры, тогда как в работе [43] было детально исследовано изотопическое замещения серы, которые подробно описаны в обзорах [8, 9].

Однако тот факт, что задача перенормировки энергетического спектра экситона Ванье-Мотта не имеет точного решения даже в предельных случаях приводит зачастую в тому, что результаты, полученные разными авторами, не согласуются друг с другом. Начиная с классических работ Хакена [44] в этом направлении, все работы могут быть разделены на две большие категории в зависимости от того кулоновское взаимодействие учитывается между «голыми» электронами и дыркой, либо между ними в поляронном состоянии. Другими словами, сначала учитывается взаимодействие с LO-фононами зонных электронов и дырок, а затем учитывается кулоновское взаимодействие между «одетыми» в поляризационные шубы электроны и дырки. Изучение экситон-фононного взаимодействия в кристаллах с изотопическим эффектом позволяет получить не только совершенно новую информацию в этом направлении, но и экспериментально восстановить значение фрелиховской и кулоновской констант взаимодействия. Повторим, что при 100%-ом замещении водорода дейтерием энергия экситона изменяется от 42 до 52 мэВ [3].

Спектр фотолюминесценции свободных экситонов кристаллов LiH, сколотых в сверхтекучем гелии при 2К состоит из узкой бесфононной линии излучения (в лучших образцах её полуширина составляет $\Delta E < 10$ мэВ) и её более широких фононных повторений. Фононные повторения обусловлены излучательной аннигиляцией свободных экситонов с одновременным излучением от одного до пяти продольных оптических (LO)

фононов (см. рис. 1 в [47]). Поскольку энергия LO фононов слабо зависит от волнового вектора q [20] спектр излучения отражает первоначальное энергетическое распределение экситонов. Приведённый в [47] показывает спектр фотолюминесценции свободных экситонов в кристаллах LiH и LiD при 2К. Заметим хорошее совпадение спектров фотолюминесценции с ранее фрагментарно опубликованными [35]. Спектр излучения свободных экситонов в смешанных кристаллах обладает идентичной структурой, что прямо демонстрирует рис. 5.



*Рис. 5. Спектр люминесценции свободных экситонов в кристаллах, сколотых в сверхтекучем гелии:
 a – LiH; b – LiHxD1-x; c – LiD при 2 К.
 Указано разрешение спектрального прибора*

Максимум бесфононной линии излучения в кристалле LiH находится почти в резонансе с линией отражения экситона в основном состоянии, что указывает на прямой переход X_1-X_4 в зоне Бриллюэна [15]. Линии фононных повторений образуют эквидистантную серию, сдвинутую в низкоэнергетическую область относительно бесфононной линии излучения свободных экситонов. Энергетическое расстояние между

этими линиями составляет в случае кристаллов LiH 140 мэВ, что равно энергии LO фонона в Г-точке зоны Бриллюэна [28]. Обращаясь к спектрам люминесценции свободных экситонов кристаллов LiD необходимо отметить следующие особенности:

1. Коротковолновой сдвиг (на 103 мэВ) спектра фотолюминесценции как целого.

2. Уширение бесфононной линии излучения экситонов по сравнению с аналогичной линией кристаллов LiH.

3. Как и в случае кристаллов LiH, спектр люминесценции кристаллов LiD обладает развитой структурой, энергетическое расстояние между ней составляет 104 мэВ, что равно энергии LO фонона в Г-точке зоны Бриллюэна (см., также [28]).

Сравнение экспериментальных результатов по спектрам люминесценции и РКРС [48] изученных кристаллов (различающихся только одним нейтроном) позволяет сделать следующие выводы:

1. Добавление одного нейтрона (использование кристаллов LiD вместо LiH) увеличивает энергию экситона в основном состоянии на макроскопическую величину равную 103 мэВ.

2. Вторая макроскопическая величина, равная 36 мэВ, связана с уменьшением энергии LO фонона в кристаллах LiD, т. е. опять же при добавлении одного нейтрона.

3. Согласно динамики решётки изученных кристаллов их акустические фононы имеют одну и ту же энергию, что прямо доказывается идентичной структурой спектров рассеяния этих кристаллов [48]. Ещё одно важное обстоятельство – небольшое изменение энергии LO фононов (36 мэВ) по сравнению с изотопическим сдвигом бесфононной линии излучения свободных экситонов (103 мэВ). Приведённые обстоятельства свидетельствуют о не электрон – фононном механизме ренормализации энергии элементарных возбуждений в кристаллах с изотопическим эффектом [49].

Как уже ранее отмечалось ещё одним интересным объектом являются кристаллы алмаза и графена, которые имеют макроскопические величины изменения оптических характеристик при изотопическом замещении. Спектры катодолюминесценции натурального (^{12}C) и синтетического (^{13}C) кристаллов алмаза при 77К согласно данным [50] показаны на рис. 6.

Пики А, В и С обусловлены излучением свободных экситонов с одновременным излучением продольных акустических и продольных оптических фононов имеющих волновой вектор $\pm k = 0,76 X$ [50]. Изотопический сдвиг спектра как целого составляет $14 \pm 0,7$ мэВ. Более детально кристаллы алмаза различного изотопического состав изучена в работе Watanabe и др. [51]. Результаты этих исследований представлены на рис. 7.

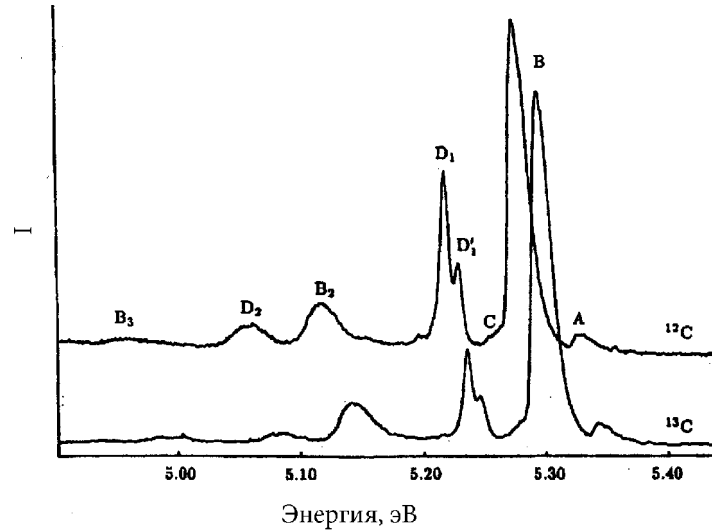


Рис. 6. Спектры катодолуминесценции природного (^{12}C) и обогащенного (^{13}C) при 77 К [57]

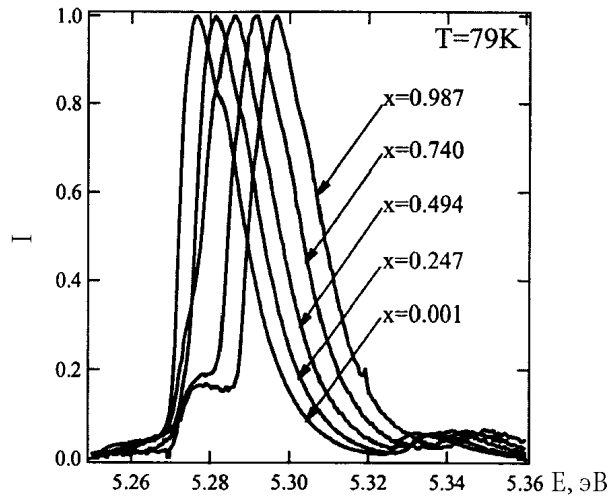


Рис. 7. Спектры катодолуминесценции кристаллов алмаза $^{12}\text{C}_x^{13}\text{C}_{1-x}$ разного изотопического состава, указанного около каждой кривой

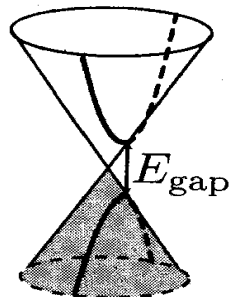


Рис. 8. Схематическое представление металлического (сплошная линия) и полупроводникового (штриховая линия) состояния графена при замене ^{12}C на ^{13}C

Приведённые результаты свидетельствуют о возможности создания новых материалов с помощью изотопов. Это особенно важно с точки зрения управления макроскопическими характеристиками новых материалов. Ещё более наглядно это видно при изотопическом создании из графена с металлической проводимостью полупроводниковый материал (см. рис. 8).

Именно изотопическое создание полупроводникового графена открывает новое направление при замене кремниевой электроники на графеновую (подробнее см [52]).

Список использованной литературы

1. Ж.И. Алфёров, История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП, **32**, 3 – 18 (1998).
2. А.А. Berezin, Isotopic engineering // J. Phys. Chem. Solids **50**, 5 – 8 (1989).
3. В.Г. Плеханов, Изотопический эффект: физика и приложение. Palmarium Academic Press, Saarbrücken, Deutschland, 2014.
4. Частное сообщение, 2014.
5. E.E. Haller, Isotopically engineered semiconductors // J. Appl. Phys. **77**, 2857 – 2878 (1995).
6. А.А. Berezin, Stable isotopes in Nanotechnology // Nanotech. Perceptions **5**, 27 – 36 (2009).
7. V.G. Plekhanov, Isotope – based materials science // Universal J. Mat. Sci. **1**, 87 – 147 (2013).
8. M. Cardona, M.L.W. Thewalt, Isotope effects on the optical spectra of semiconductors // Rev. Mod. Phys. **77**, 1173 – 1224 (2005).
9. V.G. Plekhanov, Elementary excitations in isotope – mixed crystals // Phys. Rep. **410**, 1 – 235 (2005).
10. H. Watanabe, T. Koretsune, S. Nakascina, et al., Isotope composition dependence of the band – gap energy in diamond // Phys. Rev. **B88**, 205420 – 5 (2013).
11. М. Борн, Х. Кунь, Динамическая теория кристаллических решёток (ИИЛ, Москва, 1958).
12. M. Lax, E. Burstein, Infrared lattice absorption in ionic and homopolar crystals // Phys. Rev. **97**, 39 – 52 (1955).
13. В.Ф. Агекян, А.М. Аснин, В.М. Крюков и др., Изотопический эффект в германии // ФТТ **31**, 101 – 104 (1989).
14. H.D. Fuchs, P. Etchegoin, M. Cardona et al., Vibrational band modes in germanium: isotopic – disorder induced Raman scattering // Phys. Rev. Lett. **70**, 1715 – 1718 (1993).

15. V.G. Plekhanov, Isotope Effects in Solid State Physics, in Semiconductors and Semimetals, Vol. 68, R.K. Willardson and E. Weber (eds.) (Academic Press, San Diego, 2001).
16. H. Hanzawa, N. Umemura, Y. Nisida and H. Kanda, Disorder effect of nitrogen impurities, irradiation induced defects and ^{13}C composition on the Raman spectrum in synthetic diamond // *Phys. Rev.* **1354**, 3793 – 3799 (1996).
17. R.M. Chrenko, ^{13}C – doped diamond: Raman spectra // *Appl. Phys.* **63**, 5873 – 5875 (1988).
18. K.C. Hass, M.A. Tamor, T.R. Anthony and W.F. Banholzer, Effect of isotopic disorder on the phonon spectrum of diamond // *Phys. Rev.* **1344**, 12046 – 12053 (1991).
19. P.W. Anderson, Absence of Diffusion in Certain Random Lattices // *Phys. Rev.* **109**, 1492 – 1505 (1958).
20. V.G. Plekhanov, Isotope effects on the lattice dynamics // *Mater. Sci. Eng.* **R35**, 139 – 238 (2001).
21. В.Г. Плеханов, Динамика решётки изотопически смешанных кристаллов // *Опт. и спектр.* **82**, 105 – 137 (1997).
22. V.G. Plekhanov, Experimental evidence of strong phonon scattering in isotopical disordered systems: The case of $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$ // *Phys. Rev.* **1359**, 8874 – 8877 (1995).
23. В.Г. Плеханов, Изотопические эффекты и эффекты разупорядочения в спектроскопии экситонов большого радиуса // *УФН*, **167**, 577 – 604 (1997).
24. V.G. Plekhanov, Phonons in mixed $\text{LiH}_x\text{D}_{1-x}$ crystals // *Phys. Lett.*, **A148**, 281 – 284 (1990).
25. R.J. Elliott, J.A. Krumhansl, P.L. Leath, The theory and properties of randomly disordered crystals and physical systems // *Rev. Mod. Phys.* **46**, 465 – 543 (1974).
26. D. Laplaze // *J. Phys. C: Sol. St. Phys.* **10**, 3499 – 3520 (1977).
27. H.F. Zhang, Y. Yu, Y.N. Zhoo et al., Ab initio electronic, dynamic, and thermodynamics properties of isotopic lithium hydrides (^6LiH , ^6LiD , ^6LiT , ^7LiH , ^7LiD and ^7LiT) // *J. Phys. Chem. Sol.* **71**, 976 – 982 (2010).
28. H. Dammak, E. Antoshchenkova, M. Hayonn et al., Isotope effects in lithium hydride and lithium deuteride crystals by molecular dynamics simulations // *J. Phys.: Condens. Mat.* **24**, 435402 – 6 (2012).
29. В.Г. Плеханов, Т.А. Бетенекова, В.А. Пустоваров, Экситоны и некоторые особенности экситон – фононного взаимодействия // *ФТТ* **18**, 3297 – 3299 (1976).
30. Ф.И. Крейнгольд, К. Лидер, К.И. Соловьев, Изотопический сдвиг экситонных линий в спектре поглощения Cu_2O // *Письма в ЖЭТФ* **23**, 679 – 681 (1986).

31. Ф.И. Крейнгольд, К.Ф. Лидер, К.И. Соловьев, Влияние изотопического замещения на экситонный спектр в кристаллах Cu_2O // ФТТ **19**, 3158 – 3160 (1977).
32. Ф.И. Крейнгольд, Зависимость энергии межзонных переходов в ZnO от энергии нулевых колебаний // ФТТ **20**, 3138 – 3140 (1978).
33. Ф.И. Крейнгольд, Б.С. Кулинкин, Влияние изотопического замещения на энергию межзонных переходов кристаллов ZnO // ФТТ **28**, 3164 – 3166 (1986).
34. Ф.И. Крейнгольд, К.Ф. Лидер, М.Б. Шабаета, Влияние изотопического замещения серы на экситонный спектр в кристалле CdS // ФТТ **26**, 3940 – 3941 (1984).
35. V.G. Plekhanov, Giant Isotope Effect in Solids (La Jolla, CA, Stephan University Press, 2004) (ISBN:1889545694).
36. А.Ф. Карустинский, Л.М. Шамовский, К.С. Вайушкина, Thermochemistry of isotopes // Acta Physicochemistry (USSR) **7**, 799 – 810 (1937).
37. А.А. Ключихин, В.Г. Плеханов, Изотоп – эффект на уровнях экситона Ванье – Мотта // ФТТ **22**, 585 – 587 (1980).
38. Р.Д. Нельсон, Экситоны в полупроводниковых сплавах, в, Экситоны, Э.И. Рашба, М.Д. Стердж (ред.) (Наука, Москва, 1985) с. 230 – 254.
39. P.J. Pearah, W. Masselink, M. Klein, Low – temperature optical absorption in AlGaInAs grown by molecular – beam – epitaxy // Phys. Rev. **1332**, 3857 – 3862 (1985).
40. Y. Onodera, Y. Toyozawa, Persistence and amalgamation types in the electronic structure of mixed crystals // J. Phys. Soc. Japan **24**, 341 – 355 (1968).
41. В.С. Вавилов, А.А. Гиппиус, Е.А. Конорова, Электронные и оптические процессы в алмазе (Наука, Москва, 1985).
42. J.M. Zhang, T. Ruf, R. Lauck et al., Isotope effects on exciton energies in CdS // Phys. Rev. **1357**, 9716 – 9722 (1998).
43. T.A. Meyer, M.L.W. Thewalt, R. Lauck et al., Sulfur isotope effect on the excitonic spectra of CdS // Phys. Rev. **1369**, 115214 – 5 (2004).
44. Н. Накен, Quantum Field Theory of Solids (North – Holland, Amsterdam, 1976).
45. В.Г. Плеханов, Экситонная спектроскопия кристаллов с изотопическим составом // Оптика и спектр. **79**, 778 – 799 (1995).
46. А.А. Ключихин, Перенормировка спектра экситонов Ванье – Мотта Фрелиховским взаимодействием // ФТТ **22**, 1690 – 1699 (1980).
47. В.Г. Плеханов, Необходимые дополнения // УФН **189**, 1015 – 1016 (2019).

48. В.Г. Плеханов, Изотопические эффекты в динамике решётки // УФН **173**, 711 – 738 (2003).

49. V.G. Plekhanov, Hadron – Lepton Interaction (LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrucken, Germany, 2021).

50. A.T. Collins, S.C. Lawson, G. Davies, H. Kanda, Indirect energy gap of ^{13}C diamond // Phys. Rev. Lett. **65**, 891 – 894 (1992).

51. H. Watanabe, T. Koretsune, S. Nakashine et al., Isotope compotion dependence of the band – gap energy in diamond // Phys. Rev. **B88**, 204420 – 5 (2023).

V.G. Plekhanov, Remarkable properties of isotope effect // J. Phys. & Opt. Sci., **3**, 1 – 6 (2021).

Секция 1

**МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ
И ОЧИСТКИ ВЕЩЕСТВ**

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

СОДЕРЖАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В АТМОСФЕРНОМ АЭРОЗОЛЕ НА ПРАВОМ БЕРЕГУ СЫР-ДАРЬИ В ПРЕДЕЛАХ ХУДЖАНДА

Рахматов М.Н.

*Научный руководитель: Абдуллаев С.Ф., д.ф.-м.н., профессор
Худжандский государственный университет
им. акад. Бободжона Гафурова,
735700, г. Худжанд, проезд Мавлонбекова 1, Республика Таджикистан
E-mail: muhamadi.rahmatov@yandex.com*

Проблема экологического состояния окружающей среды с каждым годом приобретает всё большую актуальность. Одним из ключевых факторов, серьезно влияющих на здоровье человека, является атмосферный аэрозоль (АА). В данной работе поставлена задача определить распределение радиоактивных изотопов в пробах атмосферного аэрозоля на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда. Для территории Северного Таджикистана такими источниками загрязнений являются транспорт, цементные заводы, открытое хвостохранилище, расположенные в Дигмае и др. На территории Ферганской долины все выбросы и сбросы загрязняющих веществ в окружающую среду остаются в долине. Кроме того, Таджикистан расположен в глобальном поясе, через который передвигается пыль с крупнейших пустынь Африки и Азии, и эта пыль, пришедшая издалека, также частично осаждается в пространстве Согдийской области [1, 2].

Целью данного исследования является получение данных, необходимых для анализа и количественной оценки содержания радиоактивных изотопов (источников гамма-излучения) в почвах и пылевого аэрозоля для выявления радиоактивных аномалий, объективной оценки и прогноза развития радиационной ситуации на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда. В связи с этим, в настоящей работе, обсуждаются новые результаты исследования содержания и изучения концентрации радиоактивных изотопов (^{40}K , ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{226}Ra , ^{228}Th , ^{228}Ac) в АА в пределах Худжанда. Исходя из цели исследования, сформулированы следующие задачи: исследовать особенности распределения радиоактивных изотопов в атмосферном аэрозоле, сравнить полученные результаты исследований АА на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда с юго-центральной частью Таджикистана.

Гамма-радиометрический анализ радиоактивных изотопов проводился с помощью детектора фирмы «Канберра» на основе сверхчистого германия с относительной эффективностью в 10 %.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что концентрация ^{40}K в атмосферном аэрозоле колеблется от 1214 до 1684,2 Бк/кг, при среднем значении – 1449,1 Бк/кг. Полученные данные показывают, что во всех образцах АА концентрация радиоактивных изотопов на правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда выше, чем в юго-центральной части страны, за исключением ^{137}Cs и ^{226}Ra . Из результатов анализа содержание радиоактивных изотопов значения ^{40}K – в 1,93 раза, ^{210}Pb – в 4,3 раза, ^{212}Pb – в 2,35 раза, ^{214}Pb – в 3 раза ^{214}Bi – в 2,77 раза, ^{228}Ac – в 1,34 раза выше в частицах пылевого аэрозоля на правом берегу Сыр-дарьи в пределах Худжанда, чем в юго-центральной части страны. В пробах атмосферного аэрозоля на правом берегу Сыр-дарьи в пределах Худжанда изотопы Th-228 и U-235 не обнаружены.

На правом берегу Сыр-Дарьи в пределах Худжанда аэрозольное загрязнение воздуха связано с выбросами автотранспорта, промышленных предприятий и переносом частиц аэрозоля с поверхности открытых хвостохранилищ данного региона [2]. Изучение радиоактивного загрязнения атмосферы региона взвешенными частицами актуально для понимания и решения проблем регионального и глобального трансграничного переноса воздушных масс. Движением воздушных масс аэрозоль переносится на большие расстояния и оказывает значительное влияние на климат и экологическое состояние территорий.

Список использованной литературы

1. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И. и др. Динамика распределения элементов и изотопов в образцах почвы и пыльной мглы юга Таджикистана // Оптика атмосферы и океана. 2013. – Том 26; № 06. – С. 187–193.
2. Назаров Х.М., Эрматов К.А., Бахронов С.М. и др. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него // Радиационная гигиена. 2019. – Том 12; № 1. – С. 115–121.

ИЗОТОПНЫЙ ЭФФЕКТ РАДИКАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Зарыкбаева К.С., Нургалиев Д.Н., Смаилов Д.Е.

*НАО университет имени Шакарима, г. Семей, РК
E-mail: Kamshat.ru@mail.ru, daniarsemei@mail.ru, smlvdr8@gmail.com*

В связи с постоянным расширением потребности в стабильных изотопах в таких отраслях, как медицина, биология, материаловедение, спинтроника, квантовые вычисления актуален поиск инновационных методов и технологий получения изотопной продукции.

Известен магнитный изотопный эффект (МИЭ), открытый Бучаченко А.Л., Молиным Ю.Н. и др., в котором химическая реакция между двумя радикалами, протекающая в слабом постоянном магнитном поле, селективна по изотопам, отличающихся ядерным спином. При высоком коэффициенте однократного разделения, МИЭ не требует использования больших энергетических затрат. Задача исследования – поиск процессов, в котором целевой продукт остается в жидкой фазе.

Если в процессе, в котором наблюдается МИЭ, целевой изотоп остается в жидкой фазе, то такой процесс можно реализовывать в виде каскадной технологии. При этом исключается процесс фазового перехода, требующий больших затрат энергии. Обогащенное по целевому изотопу соединение можно повторно подвергать фотолизу в слабом магнитном поле. В разделительном каскаде можно получить заданную концентрацию целевого изотопа в продуктах радикальных процессов.

Для формирования каскада необходимо ускорять реакции радикалов с целевым изотопом, приводящих к восстановлению исходного соединения. При этом каскад представляет собой одноступенчатую установку, в которой периодически изменяют, например, величину магнитного поля и/или температуру. Это связано с тем, что из-за изменения изотопного состава рабочей жидкости изменяется значение частоты столкновения радикалов – осколков рабочей жидкости, содержащих целевой изотопов.

В докладе анализируются физико-химические процессы и парамагнитные явления, наблюдающиеся в каскадной технологии. Например, приводятся результаты анализа радикальных процессов при фотолизе различных жидких систем, находящихся в слабом магнитном поле. Известно, что радикалы с изотопами со спиновым ядром быстрее формируют химическую ковалентную связь. При взаимодействии изотопов одного химического элемента более вероятны химические реакции между радикалами, содержащими разные изотопы, чем одинаковые.

Также приводятся результаты экономического анализа – анализируются затраты энергии на получение максимального обогащения рабочей жидкости. Показываются экономически обоснованные технологические параметры каскада.

ИЗОТОПНАЯ СЕЛЕКТИВНОСТЬ РАДИКАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОТОЛИЗЕ ЖИДКОСТЕЙ В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рахимжанова Л.А., Нурпеисова Н.Т., Жаламан С.Е.

*Казахский агротехнический исследовательский университет
имени Сакена Сейфуллина, г. Астана, РК
E-mail: laura-rahimjan@mail.ru; nazira_11_92@mail.ru;
sungat.zholaman@mail.ru*

Улучшение качества жизни людей требует постоянного расширения применения изотопов в медицине, биологии, материаловедении, спинтронике. Расширению областей применения изотопной продукции препятствует их высокая стоимость. Поэтому поиск инновационных методов получения моноизотопной продукции является актуальным.

Магнитный изотопный эффект (МИЭ) открыт коллективом ученых (Бучаченко А.Л., Молиным Ю.Н. и др.), в котором химическая реакция между двумя радикалами, протекающая в слабом магнитном поле, селективна по изотопам. При высоком коэффициенте однократного разделения, МИЭ не требует вложения больших энергетических затрат. Задача – поиск процессов, в котором целевой продукт остается в жидкой фазе.

Если в процессе, в котором наблюдается МИЭ, целевой изотоп остается в жидкой фазе, то такой метод можно реализовывать в виде каскадной технологии. В каскаде можно получить любую заданную концентрацию изотопа.

Для формирования каскада необходимо ускорять реакции радикалов с целевым изотопом, приводящих к восстановлению исходного соединения. При этом каскад представляет собой одноступенчатую установку, в которой синхронно изменяется, например, величина внешнего магнитного поля из-за изменения изотопного состава рабочей жидкости.

В докладе приводятся результаты анализа радикальных процессов при фотолизе различных жидких систем, находящихся в слабом магнитном поле. Необходимо учитывать, что радикалы с изотопами со спиновым ядром быстрее вступают в химическую реакцию. При этом более вероятны химические реакции между радикалами, содержащими разные изотопы одного элемента, чем одинаковые.

СЕПАРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ И ОБЛУЧЕННОГО ГРАФИТА

Сатыбалдинова А.Е., Зарыкбаева К.С., Кулмаханбет О.К.

НАО университет имени Шакарима, г. Семей, РК

E-mail: aigerimsemei@mail.ru; Kamshat.ru@mail.ru; ongdassyn@list.ru

Использование ядерной энергии начиналось с уран-графитового реактора (УГР) СР-1, построенного в 1942 году под трибунами стадиона Чикагского университета. В дальнейшем было разработано множество конструкций УГР. Значительная часть УГР была специально разработана и использовалась для наработки оружейного плутония. Во всех странах суммарно было построено 123 УГР. В настоящее время суммарное количество облученного реакторного графита (ОРГ) в мире составляет около 260 тысяч тонн. Поэтому задача экологически безопасной и эффективной утилизации ОРГ является общемировой.

ОРГ содержит ^{14}C и другие радионуклиды, попадающие в графит в процессе различных аварийных ситуаций. Выделение ^{14}C от графита представляет нерешаемую задачу из-за необходимости использования лишь технологии получения изотопов. Другие радионуклиды значительно отличаются от графита по физико-химическим свойствам. Такие компоненты можно разделять химическими методами. Задача вскрытия радионуклидов в толще графита может решаться механическими и электрохимическими методами. При этом, из-за гидрофобности графита, необходимо оценить максимальный размер частиц порошка ОРГ, позволяющий полностью его дезактивировать.

В докладе анализируются процессы, связанные с проникновением травящих растворов в частицу графита, содержащей сквозные поры, и методами создания таких пор. При этом анализируются требуемые затраты энергии и времени обработки ОРГ при различных технологиях измельчения графита и формирования порошка. Указываемые выше процессы также анализируются с точки зрения энергии связи.

ВЛИЯНИЕ ВОЛН НА ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В СВЕРХСИЛЬНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПОЛЯХ

Джуля Д.Н.

*Научный руководитель: Боговалов С.В., д.ф.-м.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31
E-mail: denis.dzhulya@mail.ru*

В газовой центрифуге (ГЦ) газоотборники генерируют волны. Они могут заметно влиять на гидродинамику течения газа [1]. Экспериментально доказано, что акустическая волна в тонкой трубке приводит к разделению газовых смесей за счёт явления термодиффузии [2] вблизи стенки. В сверхсильных центробежных полях, кроме термодиффузии возникают новые специфические механизмы разделения под воздействием волн. Мы провели анализ новых механизмов разделения, возникающих в акустической волне в сверхсильном центробежном поле. Одним из них является бародиффузия. Амплитуда колебаний давления в волне, распространяющейся вдоль оси вращения ГЦ, имеет иную зависимость от радиальной координаты, чем давление невозмущенного газа [3]. Это приводит к возникновению возмущения концентрации газовой смеси. Другой механизм разделения обусловлен радиальными колебаниями газа на фоне радиальных градиентов концентрации. В нашей работе исследован бародиффузионный механизм разделения. Дано сравнение механизмов разделения за счёт термо- и бародиффузии в волне.

Список использованной литературы

1. Боговалов С.В., Кислов В.А., Тронин И.В. Влияние волн на циркуляцию в газовой центрифуге Игуасу Проблемы математической и теоретической физики и математическое моделирование. 2016. – С. 25–27.
2. G. Swift and P. Spoor, “Thermal diffusion and mixture separation in the acoustic boundary layer,” The Journal of the Acoustical Society of America, vol.106, № 4, pp.1794–1800, 1999.
3. S. Bogovalov, V. Kislov, I. Tronin, “Waves in strong centrifugal fields: dissipationless gas”, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, vol. 29, 90 № 1, pp. 111–125, 2015.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В АТМОСФЕРНОМ АЭРОЗОЛЕ СЕВЕРНОГО ТАДЖИКИСТАНА

Холматов О.Б.

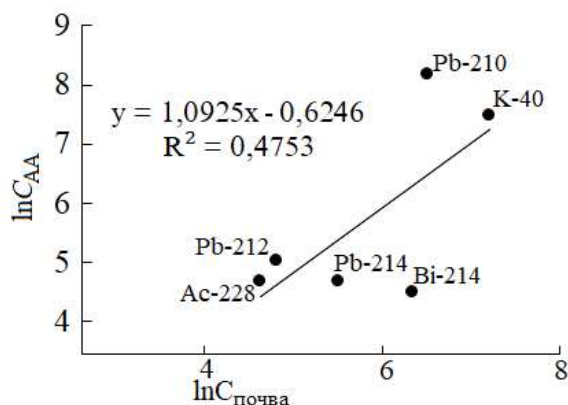
Научный руководитель: Рахматов М.Н., к.ф.-м.н., доцент
Худжандский государственный университет
им. акад. Бободжона Гафурова,
735700, г. Худжанд, проезд Мавлонбекова 1, Республика Таджикистан
E-mail: odinaboki@list.ru

Атмосфера является основным резервуаром и переносчиком радиоактивных изотопов. Основным носителем радиоактивных изотопов в атмосферном воздухе являются аэрозоли – дисперсные системы, состоящие из мельчайших твердых и жидких частиц разных размеров и химического состава, подверженных броуновскому движению и обладающих малой способностью к седиментации. Более половины суммарной мощности радиоактивной дозы, получаемой населением мира, связано с радиоактивностью при вдыхании аэрозольных частиц [1, 2].

Целью настоящей работы является статистический анализ вариации радиоактивных изотопов в пробах атмосферного аэрозоля Северного Таджикистана. Регулярный непрерывный контроль содержания радиоактивных изотопов в атмосфере и почве применяется для оперативного выявления радиоактивного техногенного загрязнения в окружающей среды. Данное исследование проводилось на территории Согдийской области.

Широкий охват территории был вызван желанием сравнить радиоактивные изотопы с проб атмосферного аэрозоля и почв с целью изучения миграции аэрозольных частиц, включающих радиоактивные изотопы, в атмосфере и почве, а также для выявления источников аэрозолей и оценки уровня загрязнения окружающей среды.

При исследовании элементного состава в пробах атмосферного аэрозоля, собранного из различных районов (Шахристан, Истаравшан, Деваштич, Зафарabad, Фармонкурбан, Худжанд и Аштский район) Северного Таджикистана выделены следующие радиоактивный изотопы: ^{40}K , ^{210}Pb , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{214}Bi и ^{228}Ac . На рис. в логарифмических координ-



натах изображена линия, аппроксимирующая соотношение содержания радиоактивных изотопов в почве и атмосферного аэрозоля. Частицы аэрозоля обогащены теми изотопами, которые лежат выше прямой линии на графике (^{40}K , ^{210}Pb , ^{212}Pb и ^{228}Ac), а концентрация изотопов, находящихся ниже прямой (^{214}Pb , ^{214}Bi) оказалась выше в почве. В аэрозольных частицах обнаружено повышенное содержание изотопа ^{40}K – в 1,3 раза, ^{210}Pb – в 5,23 раз, ^{212}Pb – в 1,24 раза, по сравнению с почвой, что, возможно, связано с антропогенными факторами.

Концентрация изотопов, расположенных выше прямой, относится к аэрозолям не только местного происхождения, но и внешним.

Для анализа и сопоставления результатов исследований использовались результаты описательной статистики и величины парной корреляции. Для статистических обработок данных использовался табличный редактор Excel-2016. Статистический анализ даёт представление о широте разброса измеряемых концентраций изотопов и степени различия загрязнённости воздуха на Севере Таджикистана.

Список использованной литературы

1. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И. и др. Динамика распределения элементов и изотопов в образцах почвы и пыльной мглы юга Таджикистана / Оптика атмосферы и океана. 2013. – Том 26; № 06. – С. 187–193.
2. Назаров Х.М., Эрматов К.А., Бахронов С.М. и др. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него / Радиационная гигиена. 2019. – Том 12; № 1. – С. 115–121.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В ПОЧВАХ СЕВЕРНОГО ТАДЖИКИСТАНА

Партобзода З., Азизов М.Н., Болтабоев А.О.

*Научный руководитель: Рахматов М.Н., к.ф.-м.н., доцент
Худжандский государственный университет
им. акад. Бободжона Гафурова,
735700, г. Худжанд, проезд Мавлонбекова 1, Республика Таджикистан
E-mail: partobzoda@internet.ru*

Последствия горно-геологических разработок радиоактивно-рудных месторождений и извлечения стратегического урана для атомной промышленности бывшего Советского Союза на территории Северного Таджикистана привели к появлению многочисленных радиоактивных хвостохрани-

лиц большой мощности – десятки миллионов тонн высокой активности – тысячи Ки и на больших площадях – сотни га [1, 2]. Хвостохранилища и отвалы промышленных предприятий обогащены ТМ, которые при определенных концентрациях, превышающих ПДК, превращаются в токсичные.

Целью настоящей работы является статистический анализ вариации радиоактивных изотопов в пробах почв Северного Таджикистана. Регулярный непрерывный контроль содержания радиоактивных изотопов в почве применяется для оперативного выявления радиоактивного техногенного загрязнения окружающей среды. Проводили исследования на территории Согдийской области.

Методика исследования. Подготовку проб для измерения активности радиоактивных изотопов проводили по стандартным радиоэкологическим методикам. Для анализа и сопоставления результатов исследований использовали результаты описательной статистики и величины парной корреляции. Для статистических обработок данных использовался табличный редактор Excel-2016.

Проводили статистический анализ полученных значений удельных активностей исследуемых радиоактивных изотопов всех проб почвы, отобранных на территории Северного Таджикистана. Обозначения: $\langle C \rangle$ – среднее содержание радиоактивных изотопов в пробе почв и атмосферного аэрозоля; C_{\max} – максимальное содержание радиоактивных изотопов в пробе; C_{\min} – минимальное содержание радиоактивных изотопов в пробе; σ – среднеквадратичное отклонение; $S_n = \sigma/\sqrt{n}$ – среднеквадратичная погрешность среднего арифметического (n – количество проб элемента); $(PI = 0.98x/x_{\min})$ – интегральный индекс загрязнения, $V = \sigma/\langle C \rangle$ – коэффициент вариации; $D = C_{\max}/C_{\min}$ – отношение максимальной концентрации к фоновой (в качестве фонового значения принято минимальное содержание радиоактивных изотопов); $\delta = t_c \cdot \sigma/\sqrt{n}$ – доверительный интервал с вероятностью 95 % (t_c – коэффициент Стьюдента); $I_{\text{geo}} = \log_2(\langle C \rangle/1,5 \cdot C_f)$ – геохимический индекс загрязнения [15–17]; C_f – региональная фоновая концентрация изотопа, где в качестве фона нами использовано минимальное содержание изотопа в почве и аэрозоле.

Средние арифметические значения для ^{40}K , ^{210}Pb , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{214}Bi и ^{228}Ac в пробах почв составляют 1361,3, 675,47, 122,8, 248,15, 574,33, 101,93 соответственно. Данные результаты по сравнению с данными пробами аэрозолями составляют 0,77, 0,19, 0,81, 2,28, 6,45, 0,93. Среднее содержание ^{214}Pb и ^{214}Bi в исследуемых пробах почв выше, чем в пробах аэрозоля.

Обработка и обобщение большого объема данных полевых и лабораторных исследований показали, что вариации техногенного ^{137}Cs существенно отличаются от поведения природных радиоактивных изотопов. При нахождении корреляционной связи между концентрациями некоторых радиоактивных изотопов входящих в состав почвы северной части Таджи-

кистана, были получены следующие результаты. Из 36 коэффициентов корреляции, представленных в табл. 3, все полученные значения коэффициентов оказались ниже критического значения для уровня значимости 95 %, что говорит об отсутствии статистической связи между соответствующими радиоактивными изотопами в пробах почв. То есть, корреляционных зависимостей в почвах между концентрациями некоторых радиоактивных изотопов не фиксируется. Поведение радиоактивных изотопов в почвах не связано друг с другом, что указывает на преимущественную химическую миграцию. При этом отсутствуют корреляционные связи между концентрациями изотопов.

Список использованной литературы

1. Эрматов К.А., Бахронов С.М., Назаров Х.М. и др. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него / Радиационная гигиена. 2019. – Том 12; № 1. – С. 115–121.
2. Мирсаидов У.М., Назаров Х.М., Хакимов Н. Ядерное наследие Советского Союза в Таджикистане: проблемы и решения. Межд. народ. конф.посв. по теме «Радиоэкологический мониторинг биосреды и радиационная безопасность Таджикистана» / Душанбе. – 2010. – С. 116–137.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ Q-КАСКАДОВ ПО ПОЛУЧЕНИЮ ВЫСОКООБОГАЩЕННЫХ ИЗОТОПОВ КРЕМНИЯ

Овезова А.В., Петров М.В.

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

Кремний широко применяется в изготовлении полупроводниковых приборов, солнечных батарей, получении сплавов и восстановлении металлов из оксидов.

Монокристалл ^{28}Si обладает более высокой теплопроводностью, чем у природного кремния. Это обуславливает его использование для улучшения теплопроводности полупроводников [1]. Применение ^{28}Si при производстве микросхем способствует увеличению плотности упаковки в них транзисторов и тактовой частоты работы микросхем. ^{28}Si применяют также в квантовых вычислениях, поскольку он обладает нулевым спином [2]. Монокристалл ^{29}Si применяется при изучении собственных и примесных дефектов, в распределении примесей в полупроводниковых материалах, в обнаружении локальных центров

и нерегулярности в структуре стекол, кристаллов, керамики методом электронного парамагнитного резонанса. Монокристалл ^{30}Si применяется в производстве радиоизотопа ^{31}Si по реакции $\text{Si}^{30}(\text{n}, \gamma)\text{Si}^{31}$, в исследовании самодиффузии кремния, при нейтронном легировании полупроводниковых материалов фосфором.

Теория разделения многокомпонентных изотопных смесей, в отличие от теории для двухкомпонентных изотопных смесей, не позволяет рассчитать параметры реального каскада. В связи с этим нами проведен расчет параметров модельных Q-каскадов для получения высокообогащенных изотопов кремния: ^{28}Si обогащенного на первом этапе разделения до 99,92 %, ^{29}Si и ^{30}Si , обогащенных на втором этапе разделения до 99,74 % и 99,91 % соответственно.

Показано, что при потоке питания 35 г/с можно получать три продукта высокого обогащения: ^{28}Si в количестве 32,31 г/с; ^{29}Si в количестве 1,61 г/с и ^{30}Si в количестве 1,08 г/с.

Список использованной литературы

1. Thermal conductivity of isotopically enriched Si / W.S. Capinski, H.J. Maris, E. Bauser, I. Silier, M. Asen-Palmer, T. Ruf, M. Cardona, E. Gmelin, // Appl. Phys. Lett. 71, 2109(1997). – doi: 10.1063/1.119384.

2. Гринвуд Н. Химия элементов: В 2 т.: Т. 1 / Н. Гринвуд, А. Эршно : перевод с английского. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 607 с. : ил. – ISBN 978-5-94774-372-2. – Текст: непосредственный.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ НА ОСОБО ЗАГРЯЗНЁННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ СЕВЕРНОГО ТАДЖИКИСТАНА

Кодыров Н.А., Носиров Ф.К.

Научный руководитель: Рахматов М.Н., к.ф.-м.н., доцент

Худжандский государственный университет

им. акад. Бободжона Гафурова,

735700, г. Худжанд, проезд Мавлонбекова 1, Республика Таджикистан

E-mail: nazirjonkadirov@gmail.com

Радиоактивное хвостохранилище является источником радиоактивного загрязнения и атмосферы, и почв, и растительности, что обуславливает необходимость тщательного контроля прилегающей к хвостохранилищам территории. Авторы работ [1, 2] подчёркивают, что необходимо выполнение комплекса работ по радиационно-экологическому исследованию радиационно-опасных объектов с целью

определения их физического состояния с оценкой воздействия на окружающую природную среду. Довольно большая работа проведена по исследованию радиоактивных изотопов, эксхалации радона, физико-химических характеристик ураносодержащих отходов, данных об общем радиационном фоне и пробах рудных пород, а также анализе проб воды за пределами хвостохранилища Северного Таджикистана, что нашло отражение в ряде научных статей, монографий и диссертационных работ [1, 2].

В результате проведённого элементного анализа на территории Дигмайского радиоактивного хвостохранилища (ДРХ) установлено, что в пробах почв содержание ^{40}K – 3040 Бк/кг в 2,45 раз, ^{210}Pb – 1891,1 Бк/кг в 2,7 раз, ^{212}Pb – 230 Бк/кг в 1,9 раз, ^{214}Pb – 1282,4 Бк/кг в 11,5 раз, ^{214}Bi – 8428,5 Бк/кг в 82,1 раз, ^{226}Ra – 8194,1 Бк/кг в 57,3 раз, ^{228}Ac – 218,6 Бк/кг в 2,5 раза выше по сравнению с пробами почв в различных районах Северного Таджикистана. В пробах почв, собранных на ДРХ, зафиксировано наличие изотопов ^{211}Pb , ^{227}Th , ^{228}Th , ^{231}Th , ^{235}U , ^{238}U ; данные элементы в остальных пробах не отмечены, за исключением Худжандского хвостохранилища. Эти перечисленные изотопы нами зафиксированы только на территориях хвостохранилищ. Исследованиями по определению содержания радиоактивных изотопов на территории Худжандского хвостохранилища зафиксировано самое высокая содержание ^{137}Cs – 11,7 Бк/кг в пробах почв по области. Во всех отобранных для распределения пробах почв на ДРХ отмечается повышенное содержание изотопов по сравнению с пробами почвы Худжандского хвостохранилища.

Список использованной литературы

1. Хакдод М.М., Кобулиев З.В., Хакдодов А.С. Международные усилия по реабилитации объектов уранового наследия Таджикистана / Сахаровские чтения 2021 года: экологические проблемы XXI века международной научной конференции, 20–21 мая 2021 г., г. Минск, Республика Беларусь: в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А.Д. Сахарова Бел. гос. ун-та – С. 286–289.
2. Назаров Х.М., Эрматов К.А., Бахронов С.М. и др. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него / Радиационная гигиена. 2019. – Том 12; № 1. – С. 115–121.

ОСАДИТЕЛЬНЫЕ И СОРБЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ^{210}Pb И ^{210}Po ИЗ ПРИРОДНЫХ СРЕД

Разина В.А., Шибецкая Ю.Г.

*Научный руководитель: Бежин Н.А., к.т.н., доцент
Севастопольский государственный университет,
199053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: razina.v@mail.ru*

^{210}Pb и ^{210}Po из-за крайне высокой радиотоксичности в соответствии с требованиями ОСПОРБ-99/2010 входят в перечень приоритетных радионуклидов, подлежащих определению в питьевых водах при превышении суммарной альфа-бета-активности. По той же причине контроль содержания ^{210}Pb и ^{210}Po в природных питьевых водах является обязательным в ряде европейских стран. Кроме того, ^{210}Pb и ^{210}Po используются для определения количественных показателей процессов седиментации взвешенного вещества и потоков взвешенного органического углерода. Данные исследования актуальны, т. к. совместно с процессами фотосинтеза фитопланктона, оседание биогенной взвеси из поверхностного слоя гидросферы является основным механизмом удаления избыточного количества углекислого газа из атмосферы, что приводит к влиянию на тепловой баланс планеты.

В настоящее время не существует единой методологии позволяющей максимально эффективно концентрировать и анализировать растворенные и взвешенные формы ^{210}Pb и ^{210}Po в природных водах. Для существующих методов отсутствуют результаты комплексных испытаний в лабораторных условиях, оценка параметров концентрирования (степени соосаждения, эффективности сорбции), подбор оптимальных условий концентрирования ^{210}Pb и ^{210}Po из природных вод. Поэтому актуальным является разработка эффективной методики определения ^{210}Pb и ^{210}Po в природных водах.

Нами проведено сравнительное исследование эффективности извлечения ^{210}Pb и ^{210}Po из природных вод с использованием различных неорганических сорбентов на основе диоксида марганца (Модикс, МДМ, ДММ, ПАН- MnO_2), и гидроксида железа(III) (Fe-SF, Fe-H, ФЖУ А), а также осаждением с гидроксидом железа(III).

Установлено, что при использовании осадительной методики эффективность извлечения ^{210}Pb и ^{210}Po составляет $85 \pm 5\%$. Однако основным недостатком осадительного метода является необходимость декантации или фильтрования значительного числа проб, что сильно увеличивает трудозатраты и уменьшает количество получаемых данных.

При использовании сорбционной методики ^{210}Pb и ^{210}Po наиболее эффективно извлекается волокнистыми сорбентами ПАН- MnO_2 и Fe-Н – более 90 % при пропускании исследуемого раствора через сорбент со скоростью 1–4 к.о./мин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Севастопольского государственного университета, проект № 42-01-09/253/2023-2.

ВОЛОКНИСТЫЕ ФЕРРОЦИАНИДНЫЕ СОРБЕНТЫ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ^{137}Cs : РАЗРАБОТКА, СИНТЕЗ И ИСПЫТАНИЯ

Шибецкая Ю.Г., Разина В.А.

*Научный руководитель: Бежин Н.А., к.т.н., доцент
Севастопольский государственный университет,
199053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: iuliia.shibetskaia@gmail.com*

Волокнистые композитные сорбенты, импрегнированные ферроцианидами переходных металлов, благодаря развитой удельной поверхности могут обеспечивать высокую скорость ионообменного процесса, что приводит к более полному извлечению ^{137}Cs , поэтому данный тип материалов может считаться наиболее перспективным. К сожалению, волокнистые сорбенты на текущий момент представлены лишь экспериментальными образцами и недоступны для использования ввиду отсутствия их налаженного промышленного выпуска.

Нами на основе полученных ранее волокнистых сорбентов, модифицированных диоксидом марганца (ПАН- MnO_2) и гидроксидом железа(III) (ПАН- $\text{Fe}(\text{OH})_3$), путем пропитки раствором ферроцианида калия с последующей обработкой солями переходных металлов получен ряд сорбентов для извлечения ^{137}Cs из природных и технологических сред. Определены оптимальные компоненты и условия синтеза данных сорбентов.

Проведены испытания по изучению ^{137}Cs полученными сорбентами из модельных растворов ^{137}Cs с $\text{pH} = 6$ и концентрацией NaNO_3 0,1 и 1 моль/л, а также из морской воды. Установлено, что во всех изученных средах наиболее высокими сорбционными характеристиками по отношению к ^{137}Cs среди полученных волокнистых ферроцианидных сорбентов обладает образец на основе ПАН- $\text{Fe}(\text{OH})_3$, ферроцианида калия и хлорида кобальта ($K_p > 10^5$ мл/г). Он не уступает лучшим промышленным ферроцианидным сорбентам.

Далее планируется исследование физико-химических параметров извлечения цезия (изотермы сорбции, кинетики сорбции и десорбции, селективности сорбции).

Работа выполнена при финансовой поддержке Севастопольского государственного университета, проект № 42-01-09/253/2023-2.

Список использованной литературы

1. MnO₂ fiber as a sorbent for radionuclides in oceanographic investigations / I.I. Dovhyi, D.A. Kremenchutskii, N.A. Bezhin et al. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2020. – Vol. 323, № 1. – P. 539–547.

2. The Sorbents Based on Acrylic Fiber Impregnated by Iron Hydroxide (III): Production Methods, Properties, Application in Oceanographic Research / N.A. Bezhin, M.A. Frolova, I.I. Dovhyi et al. // Water. – 2022. – Vol. 14, № 15. – 2303.

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В КАСКАДАХ

Игнатъев И.А., Гребёнкин Д.М.

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

Уральский федеральный университет,

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

E-mail: danil-grebenkin2001@mail.ru

Разделение смесей стабильных изотопов является актуальной задачей современных технологических процессов. Эффективное разделение таких смесей требует отыскания оптимальных способов его организации [1].

Процесс оптимизации каскада включает в себя поиск глобального минимума целевой функции. В области разделения изотопов допускается использование лишь безградиентных методов оптимизации, т. к. нахождение производной целевой функции является не всегда представляется возможным [2].

В настоящей работе приведены различные методы многопараметрической оптимизации для разделения изотопов в каскадах.

Рассмотрены особенности, программная реализация данных методов.

Проведена оптимизация на примере тестовых функций с целью проверки работы использованных алгоритмов.

На основании оценки точности и времени расчета проведено сравнение эффективности представленных методов. Найден наиболее оптимальный.

Результаты работы могут быть использованы в дальнейшей работе при решении задач по оптимизации каскадов для разделения изотопов.

Список использованной литературы

1. Палкин В.А., Лубнин С.С., Маслюков В.Е. Метод расчета и оптимизации многопоточных каскадов и многокомпонентных смесей изотопов // Атомная энергия. –2022. –Т. 132 (5). – С. 274–279.
2. Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей: Учебное пособие / под ред. проф. В.Д. Бормана и др. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В АТМОСФЕРНОМ АЭРОЗОЛЕ И ПОЧВАХ СЕВЕРНОГО ТАДЖИКИСТАНА

Абдуллоева С.Дж., Шодиев Ш.Ш., Рахимов М.Р.

*Научный руководитель: Рахматов М.Н., к.ф.-м.н., доцент
Худжандский государственный университет
им. акад. Бободжона Гафурова,
735700, г. Худжанд, проезд Мавлонбекова 1, Республика Таджикистан
E-mail: abdulloyeva2019@list.ru*

Для анализа и сопоставления результатов исследований использовались результаты описательной статистики и величины парной корреляции. Для статистических обработок данных использовался табличный редактор Excel-2016. Ниже представлен статистический анализ полученных значений удельных активностей исследуемых радиоактивных изотопов всех проб почвы и АА, отобранных на территории Северного Таджикистана (табл. 2 и 3). Обозначения: $\langle C \rangle$ – среднее содержание радиоактивных изотопов в пробе почв и атмосферного аэрозоля; C_{\max} – максимальное содержание радиоактивных изотопов в пробе; C_{\min} – минимальное содержание радиоактивных изотопов в пробе; σ – среднее квадратичное отклонение; $S_n = \sigma/\sqrt{n}$ – среднее квадратичная погрешность среднего арифметического (n – количество проб элемента); $(PI = 0.98x/x_{\min})$ – интегральный индекс загрязнения, $V = \sigma/\langle C \rangle$ – коэффициент вариации; $D = C_{\max}/C_{\min}$ – отношение максимальной концентрации к фоновой (в качестве фонового значения принято минимальное содержание радиоактивных изотопов); $\delta = t_c \cdot \sigma/\sqrt{n}$ – доверительный интервал с вероятностью 95 % (t_c – коэффициент Стьюдента); $I_{\text{geo}} = \log_2(\langle C \rangle/1,5 \cdot C_f)$ – геохимический индекс загрязнения; C_f – региональная фоновая концентрация изотопа, где в качестве фона нами использовано минимальное содержание изотопа в почве и аэрозоле.

Средние арифметические значения для ^{40}K , ^{210}Pb , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{214}Bi и ^{228}Ac в пробах почв составляют 1361,3, 675,47, 122,8, 248,15, 574,33,

101,93 соответственно. Данные результаты по сравнению с данными пробами аэрозолями составляют 0,77, 0,19, 0,81, 2,28, 6,45, 0,93. Среднее содержание ^{214}Pb и ^{214}Bi в исследуемых пробах почв выше, чем пробах АА.

Обработка и обобщение большого объема данных полевых и лабораторных исследований показали, что вариации техногенного ^{137}Cs существенно отличаются от поведения природных радиоактивных изотопов.

При нахождении корреляционной связи между концентрациями некоторых радиоактивных изотопов входящих в состав почвы и атмосферного аэрозоля северной части Таджикистана, были получены следующие результаты.

Из 36 коэффициентов корреляции, все полученные значения коэффициентов оказались ниже критического значения для уровня значимости 95 %, что говорит об отсутствии статистической связи между соответствующими радиоактивными изотопами в пробах почв. То есть, корреляционных зависимостей в почвах между концентрациями некоторых радиоактивных изотопов не фиксируется. Поведение радиоактивных изотопов в почвах не связано друг с другом, что указывает на преимущественную химическую миграцию [1, 2]. При этом отсутствуют корреляционные связи между концентрациями изотопов.

Статистический анализ даёт представление о широте разброса измеряемых концентраций изотопов и степени различия загрязнённости воздуха на севере Таджикистана. Была заложена основа для мониторинговых исследований данной территории в будущем.

Список использованной литературы

1. Хакдод М.М., Кобулиев З.В., Хакдодов А.С. Международные усилия по реабилитации объектов уранового наследия Таджикистана / Сахаровские чтения 2021 года: экологические проблемы XXI века. международной научной конференции, 20–21 мая 2021 г., г. Минск, Республика Беларусь: в 2 ч. // Междунар. гос. экол. ин-т им. А.Д. Сахарова Бел. гос. ун-та – С. 286–289.

2. Назаров Х.М., Эрматов К.А., Бахронов С.М. и др. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него / Радиационная гигиена. 2019. – Том 12; № 1. – С. 115–121.

ИЗУЧЕНИЕ СОДЕРЖАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В ПРОБАХ ПОЧВ СЕВЕРНОГО ТАДЖИКИСТАНА

Шукуров Е.Г., Даминов О.М.

*Научный руководитель: Рахматов М.Н., к.ф.-м.н., доцент
Худжандский государственный университет
им. акад. Бободжона Гафурова,
735700, г. Худжанд, проезд Мавлонбекова 1, Республика Таджикистан
E-mail: yekubdzhons@mail.ru*

К радиоактивным изотопам естественного происхождения относят те, которые образовались на Земле без участия в этом человека. Их условно можно разделить на три группы. В первую группу входят нуклиды радиоактивных семейств ^{235}U , ^{238}U и ^{232}Th с продуктами их распада. Ко второй группе относятся радиоизотопы, находящиеся в земной коре и объектах внешней среды с момента образования Земли: ^{40}K , ^{87}Rb , ^{48}Ca , ^{96}Zn , ^{130}Te и ^{129}I и др. К третьей группе принадлежат радиоактивные изотопы ^{14}C , ^3H , ^7Be и ^{10}Be , образующиеся непрерывно под действием космического излучения [1].

В последние годы в литературе большое внимание уделяется исследованию миграции естественных радиоактивных изотопов в почвах, в связи с тем, что интенсивное развитие промышленных предприятий и другие антропогенные факторы ведут к увеличению концентрации естественных радиоактивных изотопов в почвенном покрове [1–3].

Целью исследования являлся радиоэкологический анализ содержания радиоактивных изотопов в верхних почвенных горизонтах на территории Северного Таджикистана и изучение особенностей их поведения в почвах. Задача заключалась в том, чтобы определить значения концентрации активности таких радиоактивных изотопов, как ^{238}U , ^{226}Ra , ^{40}K и ^{137}Cs , в верхних горизонтах почв, встречающихся на данной территории.

Результаты наших исследований свидетельствуют, что на обследованной территории концентрации активности ^{238}U колеблется от 4,23 до 910,1 Бк/кг, при средней величине 238,7 Бк/кг. Максимальные значения удельной активности ^{238}U обнаруживались на территории Дегмайского хвостохранилища. Повышенные содержания ^{238}U в пробах с территории Дегмайского хвостохранилища, обусловлены, вероятно, техногенными факторами [1, 5, 6, 11]. В ходе спектрометрического анализа почв территории Северного Таджикистана выявили широкий диапазон значений удельной активности изотопа ^{226}Ra : значения ^{226}Ra находятся в пределах 57,69–556,3 Бк/кг, при среднем 142,8 Бк/кг. Точка с максимальным зна-

чением удельной активности изотопа ^{226}Ra – 556,3 Бк/кг обнаружилась в пробах почв вблизи Моголтау на территории Худжанда. Минимальное значение изотопа ^{226}Ra зафиксировано в Шахристанском районе. В ходе нашего исследования выяснилось, что диапазон ^{40}K для всех проб почв широкий и составляет 510,3–3102,9 Бк/кг, при среднем 1361,3 Бк/кг. Следует отметить более высокое содержания изотопа ^{40}K , зафиксированное в кишлаке Фарманкурган Спитаменского района.

Средняя концентрация активности радиоизотоп ^{137}Cs в пробах почв в среднем составляет 19 Бк/кг и варьирует в интервале от 1,41 до 87,70 Бк/кг. Наиболее высокая концентрация активности ^{137}Cs отмечена в пробах, взятых в окрестностях горы Моголтау на территории Худжанда. Самая низкая активность изотопа ^{137}Cs фиксируется в пробах почв, взятых в Спитаменском районе.

Список использованной литературы

1. Распределение тория, урана и ^{137}Cs в почвах городов Иркутск и Ангарск (Прибайкалье): дисс. к.г.-м.н. 25.00.36 / Грицко Полина Павловна. – Иркутск, 2018. – 160 с.

2. Хакдод М.М., Кобулиев З.В., Хакдодов А.С. Международные усилия по реабилитации объектов уранового наследия Таджикистана / Сахаровские чтения 2021 года: экологические проблемы XXI века. международной научной конференции, 20–21 мая 2021 г., г. Минск, Республика Беларусь: в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А.Д. Сахарова Бел. гос. ун-та.–С. 286–289.

4. Назаров Х.М., Эрматов К.А., Бахронов С.М. и др. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него / Радиационная гигиена. 2019. – Том 12; № 1. – С. 115–121.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ Q-КАСКАДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО ^{34}S

Нестерова Е.А.

*Научный руководитель Орлов А.А., д.т.н., профессор
Томский политехнический университет,
634034, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: ean25@tpu.ru*

Изотопы серы нашли широкое применение в различных областях народного хозяйства: научных исследованиях, медицине, лазерной технике, метрологии и других. Наиболее востребованным является ^{34}S . С его помощью проводят изучение синтеза лекарственных препаратов, создаются радиофармпрепараты $^{34\text{m}}\text{Cl}$ и ^{35}S . Данный изотоп применяется также в качестве активной серы субмиллиметровых лазеров и в экспериментах по изучению разделения изотопов лазерным методом [1]. Необходимая концентрация ^{34}S составляет 99 %.

В данной работе по известной методике [2] проведен расчет параметров Q-каскада для получения высокообогащенного ^{34}S . Получены графики распределения концентрации изотопов серы по ступеням каскада и непрерывный профиль рассчитанного Q-каскада.

Установлено, что изотопы серы распределяются по ступеням каскада в соответствии с их массовыми числами. Наибольшее изменение концентрации изотопов серы имеет место на конечных ступенях каскада, наименьшее – вблизи ступени подачи потока питания.

Показано, что за один этап разделения в каскаде, состоящем из 50 ступеней, можно получить 99%-е обогащение по ^{34}S .

Список использованной литературы

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

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ИОНИЗАЦИИ В МАСС-СПЕКТРОМЕТРЕ ВТОРИЧНЫХ ИОНОВ PNI TRIFT V NANOTOF

Сабанин К.А.¹, Коваленко М.А.¹, Гадельшин В.М.^{1,2}

Научный руководитель: Гадельшин В.М.^{1,2}

*¹ Физико-технологический институт,
Уральский федеральный университет,*

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

*² Институт промышленной экологии УрО РАН,
620990, Россия, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20*

E-mail: sabanin13.05.00@mail.ru

Масс-спектрометрия вторичных ионов широко используется во многих областях научных исследований. Первичный поток ускоренных ионов направляется на поверхность твёрдого образца, выбивая с неё атомы и молекулы. В образующемся облаке вторичных частиц менее одного процента вылетает в виде ионов. Далее эти вторичные ионы вытягиваются, фокусируются и направляются в масс-анализатор.

Присутствие изобарных примесей в исследуемых образцах может существенно повлиять на результаты анализа, приводя к ошибочной идентификации химических веществ на масс-спектре. Для решения этой проблемы в масс-спектрометре PNI TRIFT V nanoTOF кафедры технической физики ФТИ УрФУ была организована система выборочной лазерной ионизации целевого вещества. В основе системы лежат импульсный Nd:YAG и перестраиваемый Ti:Sapphire лазеры, с помощью излучения которых будут целенаправленно ионизированы вторичные нейтральные частицы [1]. Синхронизация работы системы лазеров и масс-анализатора позволяет регистрировать только лазерные ионы, минуя изобарные примеси и повышая чувствительность всего комплекса. В докладе рассматривается ход создания лазерной системы, её текущий статус и степень интеграции с масс-спектрометром.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50138.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЯМОУГОЛЬНОГО КАСКАДА ВАРЬИРОВАНИЕМ СРЕЗОВ ПАРЦИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ

Лубнин С.С.

*Научный руководитель: Палкин В.А., д.т.н., профессор
АО «УЭХК», 624130, Россия, г. Новоуральск, ул. Дзержинского, 2
E-mail: stepalubnin@gmail.com*

Предложена методика расчета прямоугольных каскадов по срезам парциальных потоков ступеней для получения изотопов стабильных элементов с высокими концентрациями. Для реализации постоянного профиля потока питания ступеней на концах каскада реализованы «закрутки», а режимы работы ступеней определялись с помощью алгоритма пчелиной колонии (artificial bee colony optimization). В рассмотренном случае целевой функцией оптимизации являлась сумма квадратов невязок заданных потоков питания ступеней и рассчитанных.

Приведена методика расчета каскада с коэффициентами разделения ступеней, которые характерны для газовых центрифуг [1]. Предложенный метод позволяет проводить расчеты каскадов с произвольным набором внешних потоков, что позволило организовать «закрутки» в виде внешних потоков питания крайних ступеней. Основные параметры ступеней рассчитываются по заданным срезам парциальных потоков.

С использованием предложенной методики проведен вычислительный эксперимент по разделению многокомпонентной смеси стабильных изотопов. Рассмотрены две схемы для получения изотопов ^{70}Ge и ^{76}Ge с концентрациями выше 99 % соответственно. В качестве начального приближения были выбраны R-каскады, построенные для получения высоких концентраций соответствующих изотопов [2]. Показано, что предложенная методика расчета и оптимизации позволяет получать высокие концентрации целевых изотопов в каскаде с заданным профилем потоков питания ступеней.

Список использованной литературы

1. Palkin V.A. Multistream cascades for separation of multicomponent isotopic mixtures // Atomic Energy. –2015. –V. 119 (2). – P. 125–131.
2. Сулаберидзе Г.А., Палкин В.А., Борисевич В.Д., Борман В.Д., Тихомиров А.В.; под ред. проф. В.Д. Бормана Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. 368 с.

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ИЗ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Селин П.Е., Смороков А.А.

*Научный руководитель: Смороков А.А.,
старший преподаватель ИЯТШ ТПУ
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: grandmusl@mail.ru*

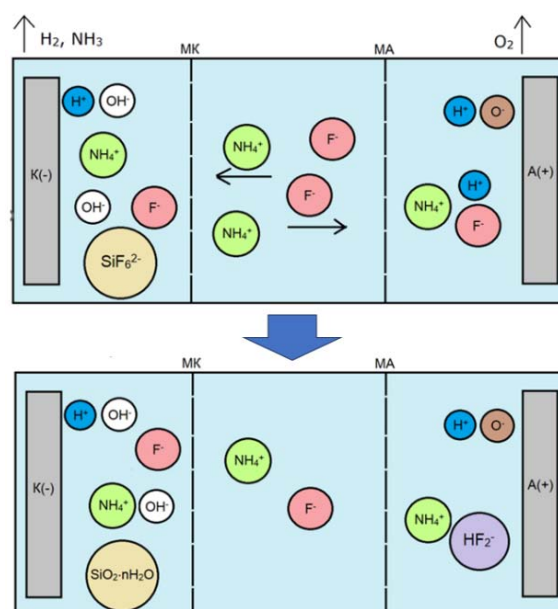
Современная Российская промышленность, связанная с получением из минерального сырья цирконий- или титансодержащих ценных продуктов, зачастую может быть связана с необходимостью извлечения из концентратов диоксида кремния, который негативно влияет на их дальнейшую переработку. Одним из способов такого извлечения является фторидная обработка концентратов, при которой используется гидрофторид аммония. Данный реагент переводит диоксид в растворимое соединение гексафторсиликат аммония.



После разделения твердой и жидкой фаз, получается концентрат, очищенный от диоксида кремния, а также раствор, содержащий кремний в форме гексафторсиликата аммония (ГФСА), фторид аммония и воду [1].

В работе предложен метод осаждения диоксида кремния посредством электролиза с применением ионообменных мембран.

Электролизер имеет три камеры – катодная, промежуточная и анодная. Они разделены катионо- и анионообменными мембранами соответственно. В катодную камеру подается раствор после обескремнивания, в две других – тот же раствор, но ранее прошедший через катодную камеру. По прошествии процесса, длящегося 5 часов, получается пульпа, содержащая гидратированный диоксид кремния, а также раствор гидрофторида аммония, который можно снова использовать в процессе обескремнивания. Общая схема представлена на рисунке.



Проведя серию экспериментов с раствором, полученным в результате обескремнивания цирконового, концентрата удалось достичь степени осаждения диоксида 60 %. Основные примесные элементы в осадке: Fe, Cu. В осадке не были найдены соединения алюминия, присутствовавшего в растворе. Степень осаждения же самого циркония составила 0,0002 %. В анодной камере удалось полностью регенерировать гидрофторид аммония.

Список использованной литературы

1. Смороков А.А., Кантаев А.С., Брянкин Д.В., Миклашевич А.А. // Изв.вузов. Химия и хим. технология, 2022. – Т. 65. – № 2. – С. 127–133.

КОНТРОЛЬ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА БОРА В ТРИФТОРИДЕ БОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИК-СПЕКТРОМЕТРИИ

Илекис В.М., Ушаков А.О.

Научный руководитель: Молоков П.Б., к.т.н.

*Северский технологический институт НИЯУ МИФИ
636036, г. Северск, Томской обл., пр. Коммунистический, 65
E-mail: ilekis111@gmail.com*

Природный бор состоит из двух стабильных изотопов – ^{10}B (19 %) и ^{11}B (81 %), которые широко используются в таких отраслях как: атомная энергетика, научные исследования, полупроводниковая промышленность, медицина.

За счет высокого сечения захвата тепловых нейтронов, 3837 барн, изотоп ^{10}B (бор-10) нашел широкое применение в атомной энергетике. В зависимости от назначения используют как составы с природным соотношением изотопов, например, в виде раствора борной кислоты, так и с большим содержанием изотопа бор-10, например, в виде металлокерамики карбида бора с окисью алюминия, которые главным образом применяют в составе регулирующих стержней для атомных реакторов. Также бор-10 применяют в качестве меченных атомов для определения метаболизма бора; в нейтронозахватной терапии для лечения рака.

Изотоп ^{11}B (бор-11), за счет малого сечения захвата тепловых нейтронов, 5,5 мбарн, используется как нейтронно-прозрачный материал в электронике. В природном изотопном соотношении бор, в виде BF_3 , широко используется в полупроводниковой промышленности при производстве чипов.

Несмотря на чрезвычайную стратегическую важность изотопов бора с разным изотопным соотношением для отечественной промышлен-

ности и энергетики, в России существует только малотоннажное производство изотопов бора.

Известен ряд способов обогащения изотопов бора с использованием различных физико-химических методов: газоцентрифужное, обменная дистилляция, криогенная ректификация. Во всех перечисленных методах в качестве рабочего вещества используется трифторид бора (BF_3). Трифторид бора является газом с температурой кипения примерно минус $100\text{ }^\circ\text{C}$, активно взаимодействует со многими органическими и неорганическими веществами.

Наиболее распространенным методом получения трифторида бора являются реакции соединений бора с фторсодержащими реагентами, например, взаимодействие оксида бора с безводным фтороводородом.

В зависимости от качества исходных реагентов, а также от процесса получения, получаемый газ может быть загрязнен различными примесями, например, O_2 , N_2 , CO_2 , Ar , CO , CF_4 , CH_4 , SF_6 , SO_2 , SiF_4 , HF , H_2O и др.

В 2022 году в Северском технологическом институте НИЯУ МИФИ создана научная группа, занимающаяся исследованием высокочистых фторсодержащих соединений, используемых в микроэлектронике. В качестве основных методов анализа для изучения чистоты газов используются методы газовой хроматографии и ИК-спектromетрии.

Газовая ИК-спектromетрия может быть легко встроена в технологический процесс для непрерывного контроля чистоты получаемых газов. Результатом проведения ИК-спектromетрического анализа являются ИК-спектрограммы, отображающие полосы поглощения, которые изменяют местоположение и интенсивность из-за колебательно-вращательного взаимодействия атомов друг с другом. Разница в массе изотопов бор-10 и бор-11 влияет на постоянную вращения и частоту колебаний связи со фтором. Таким образом изменение изотопного соотношения бора в трифториде бора приводит к разному ИК-спектру для каждого изотопомера, что дает возможность для определения изотопов.

При рассмотрении ИК-спектров в различных статьях и базах данных, был обнаружен диапазон длин волн ($2750\text{--}3050\text{ см}^{-1}$), где нет наложения спектров примесей, а пики изотопов бора хорошо идентифицируемы. Количественный анализ изотопного соотношения на основе ИК-спектров осложнен из-за близкого расположения пиков характерных для бор-10 и бор-11. Решение данной проблемы, наша научная группа, видит в применении методов хемометрики, таких как метод анализа главных компонент (РСА) и метод проекции на латентные структуры (PLS). В данных методах обработки используется информация о всем исследуемом спектральном диапазоне, что позволяет эффек-

тивно разделить и анализировать полученные спектральные данные и более точно определить изотопное соотношение бора.

В докладе будут рассмотрены ИК-спектры поглощения различных примесных газов и трифторида бора, проведено моделирование спектра трифторида бора с различным изотопным соотношением и представлен алгоритм математической обработки спектральных данных для построения градуировочного графика.

ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Хорохорин Д.М., Баранов О.Г., Литвинов И.И.

Федеральное государственное унитарное предприятие

«Горно-химический комбинат»,

Россия, г. Железногорск, ул. Ленина, 53, 662972

E-mail: dmh1@tpu.ru

Работа предприятий ядерно-топливного цикла сопровождается решением различных научно-технических задач, направленных на совершенствование технологического процесса, повышение экономических показателей и качества выпускаемой продукции.

В результате модернизации оборудования, работающего на различных переделах производства оксидного уран-плутониевого топлива, образуются значительные объемы металлических отходов с поверхностным альфа-активным загрязнением. Применяемые в производстве методы дезактивации обладают рядом недостатков: низкий коэффициент дезактивации и производительность, недостаточная степень автоматизации, образование жидких радиоактивных отходов. Поэтому актуальны исследования по разработке более эффективного метода сухой очистки металлических поверхностей от радиоактивного загрязнения.

Известны методы очистки поверхности металлов от радиоактивного загрязнения высокоинтенсивным лазерным излучением. Нагрев лазерным излучением поверхности металла и оксидных радиоактивных частиц зависит от способности вещества поглощать электромагнитное излучение определенной длины волны. Поэтому поверхность металла и оксидные частицы будут нагреваться с разной скоростью. На пороговых режимах лазерной абляции возможно добиться преимущественного испарения оксидных радиоактивных частиц с поверхности металла, благодаря различию их теплопроводности и теплоемкости. Поэтому эффективность лазерной дезактивации зависит от параметров излуче-

ния, которые в свою очередь определяются теплофизическими и оптическими свойствами металла и оксидных радиоактивных частиц.

В докладе обсуждаются результаты очистки металлической поверхности фрагментов отработавшего ресурс оборудования из нержавеющей стали 12X18H10T от радиоактивного загрязнения, состоящего из оксидов урана и плутония. Для дезактивации металлической поверхности использовалось устройство лазерной очистки F-Clean BP 100, при различной интенсивности и длительности лазерного импульса. Активность образцов до и после дезактивации определялась с помощью блока детектирования альфа-излучения БДЗА-100 и измерителем скорости счета УИМ2-2Д методом прямого измерения и снятия сухого мазка. Изменение поверхности металла в области воздействия лазерного луча исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ АМЕРИЦИЯ ОТ ПЛУТОНИЯ

Гусев Н.В.

*Научный руководитель: Жерин И.И., д.х.н., профессор
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
Email: nvg18@tpu.ru*

При производстве МОКС-топлива образуются нецелевые производственные растворы, содержащие изотоп америция-241. Одним из направлений применения данного изотопа является его облучение нейтронами с получением плутония-238, который используется для производства радиоактивного источника тепла. Также, целесообразность выделения америция из отходов производства смешанного оксидного топлива обуславливает снижение класса отходов и их передачи на объекты по обращению с РАО. Помимо этого, возможно вовлечение изотопа америция-241 в цепочку ЯТЦ в качестве топливной добавки.

Для селективного выделения актиноидов из многокомпонентных смесей используют экстракционные и сорбционные методы выделения. Данные смеси представляют собой растворы, содержащие в основном азотную кислоту, америций и плутоний.

Целью работы являлось проведение исследований по изучению процесса сорбционной очистки америция от плутония из нецелевых продуктов производства МОКС-топлива.

В работе исследован процесс сорбционного извлечения америция с использованием сорбента Axionit VPA-2.

Известно, что при повышении содержания азотной кислоты в исходном растворе, наблюдается повышение эффективности извлечения плутония [1], связано это со стабилизацией плутония в четырехвалентном состоянии и образовании аниона $[\text{Pu}(\text{NO}_3)_6]^{2-}$, в то время как америций находится в растворе в виде трехзарядного катиона Am^{3+} и, как следствие, не участвует в сорбционном процессе. В связи с этим, валентность плутония в исходном растворе предварительно стабилизировали путем ввода в систему раствора нитрита натрия.

Уравнение сорбционного извлечения плутония выглядит следующим образом:



В ходе экспериментальной работы показана возможность очистки америция от плутония на поверхности сорбента Axionit VPA-2.

Список использованной литературы

1. Лызлова Е.В. Извлечение плутония из азотнокислых регенерационных растворов с использованием винилпиридиниевых анионитов марки AXIONIT VPA / Е.В. Лызлова, А.В. Глухова, Д.А. Кондруцкий – Радиохимия, 2019. – Том 61. – № 2.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ТЕЛЛУРА ПРИ НАГРЕВЕ НАТРИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АТМОСФЕРЕ АРГОНА

Прытков Л.Н., Тутов С.А., Тикина И.В.

*Научный руководитель: Барбин Н.М., ведущий научный сотрудник
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург
E-mail: prytkov.l.n@mail.ru*

Методом термодинамического моделирования изучено поведение теллура при нагреве натриевого теплоносителя в атмосфере аргона. Термодинамическое моделирование выполнено при помощи программы TERRA в интервалах температур от 373 до 3273 К.

В диапазоне температур от 373 К до 1173 К значительных изменений состава фаз не наблюдается. Весь теллур системы находится в виде конденсированного теллурида натрия $\text{Na}_2\text{Te}_{(\text{конд.})}$. В температурном диапазоне 1173–1373 К происходит процесс термического испарения конденсированного теллурида натрия $\text{Na}_2\text{Te}_{(\text{конд.})}$, при этом резко увеличивается содержание пара теллурида олова $\text{SnTe}_{(\text{г})}$ до 96,62 мол%. Данный процесс вероятнее всего соответствует реакции: $\text{Na}_2\text{Te}_{(\text{конд.})} + \text{Sn} = \text{SnTe} + 2\text{Na}$.

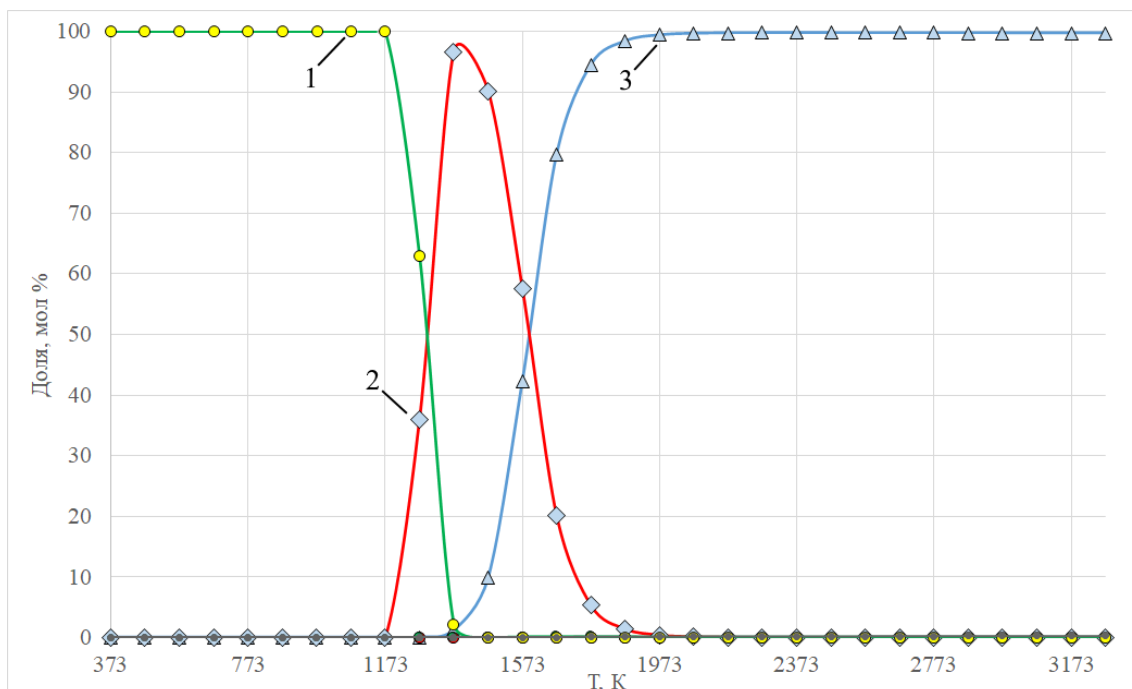


Рис. 1. Распределение теллура по фазам.
 1 – $Na_2Te_{(конд.)}$, 2 – $SnTe_{(g)}$, 3 – $Te_{(g)}$

Дальнейшее повышение температуры в системе до 1973 К приводит к термической диссоциации в паровой фазе теллурида олова $SnTe_{(г)}$ и возрастанию содержания в системе пара теллура $Te_{(г)}$. В температурном интервале от 1973 К до 3273 К весь теллур системы представлен в виде пара теллура $Te_{(г)}$.

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
 ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ МАРГАНЦА
 ПРИ НАГРЕВЕ НАТРИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АТМОСФЕРЕ АРГОНА**

Прытков Л.Н., Титов С.А., Тикина И.В.

Научный руководитель: Барбин Н.М. ведущий научный сотрудник
 Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург
 E-mail: prytkov.l.n@mail.ru

В программном комплексе TERRA при помощи метода термодинамического моделирования исследовано поведение марганца при нагреве натриевого теплоносителя. Моделирование проведено в атмосфере аргона. Температурный интервал составлял от 373 до 3273 К.

В диапазоне температур от 373 К до 1373 К значительных изменений состава фаз не наблюдается. Весь марганец системы находится в виде конденсированного карбида марганца $MnC_{2(конд.)}$. В температур-

ном диапазоне 1373–1573 К происходит процесс термического испарения конденсированного карбида марганца $MnC_{2(конд.)}$, при этом резко увеличивается содержание пара марганца $Mn_{(г)}$ в соответствии с реакцией: $MnC_{2(конд.)} + O_{2(г)} = 2CO_{(г)} + Mn_{(г)}$ и также увеличивается содержание пара гидроксида марганца $MnH_{(г)}$ до 6,84 мол% в соответствии с реакцией: $2Mn_{(г)} + H_{2(г)} = 2MnH_{(г)}$. При возрастании температуры в системе до 2373 К содержание пара гидроксида марганца $MnH_{(г)}$ в системе за счет термической диссоциации составляет 0 мол%. При дальнейшем повышении температуры весь марганец системы находится в виде пара марганца $Mn_{(г)}$.

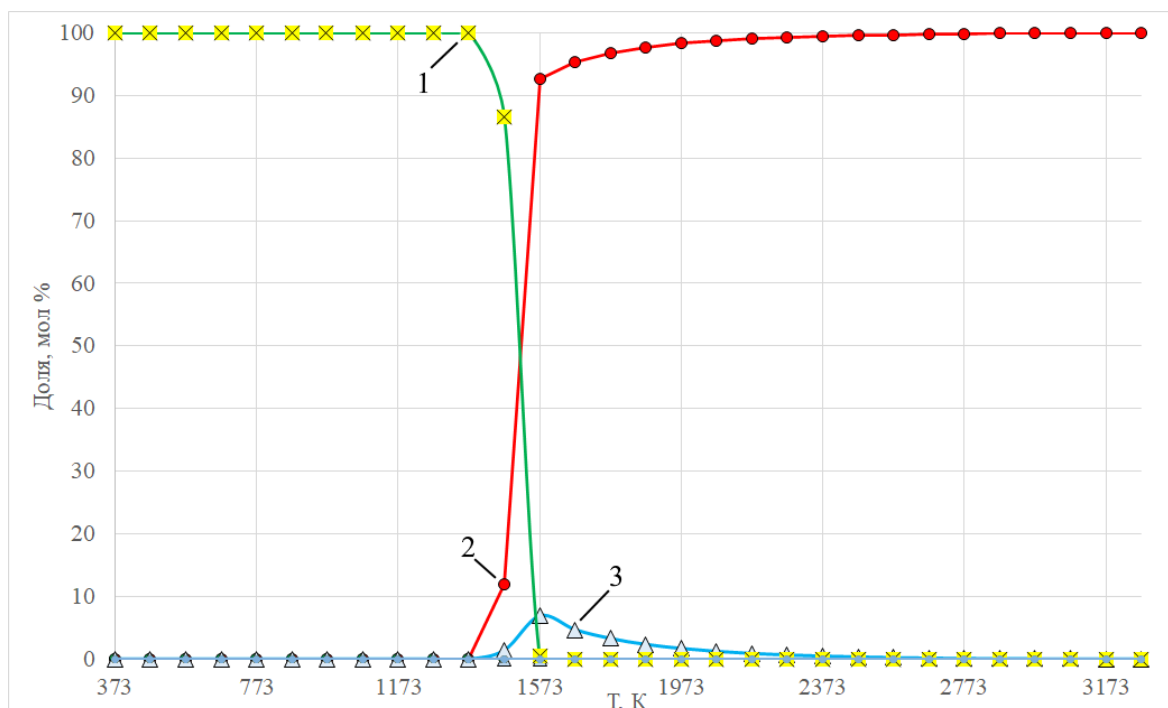


Рис. 1. Распределение марганца по фазам.
1 – $MnC_{2(конд.)}$, 2 – $Mn_{(г)}$, 3 – $MnH_{(г)}$

ПЕРЕРАБОТКА РЕАКТОРНОГО ГРАФИТА В АТМОСФЕРЕ АЗОТА В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ

Марков Д.Я., Шавалеев М.Р.

*Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург
E-mail: poison-danil@mail.ru*

Земля получила в прошлом и получает сейчас от Солнца огромное количество энергии. Ежегодно на поверхность земного шара от Солнца поступает лучевая энергия в количестве $620 \cdot 10^{15}$ кВт·час. Однако масштабы её использования ещё сравнительно очень незначительны. Реальным источником энергии, решающим проблемы истощения органического топлива и снижения экологической нагрузки на окружающую среду может, стать атомная энергетика. Атомная энергетика не потребляет кислорода и имеет ничтожное количество выбросов при нормальной эксплуатации. Если атомная энергетика заменит обычную энергетику, то возможности возникновения «парника» с тяжелыми экологическими последствиями глобального потепления будут устранены. Чтобы защитить человека от негативного воздействия радиоактивных отходов необходимо обеспечить их сбор и изоляцию от биосферы. Следующее и главное условие обеспечения безопасности состоит в обезвреживании радиоактивных отходов. Сегодня для этого человечество применяет единственный метод – выдержка радиоактивных отходов в изолированных условиях такое время, в течение которого произойдёт естественный распад всех содержащихся в них радионуклидов. Однако данный способ обращения с радиоактивными отходами не решают проблему их переработки либо безопасного хранения. В нашем докладе предложен новый высокотемпературный способ переработки, в частности реакторного графита, который позволит отделить сам графит от широкого спектра радионуклидов (кроме ^{14}C). Речь идёт о более радиационно-безопасном способе переработки реакторного графита, который ограничивает возможность перехода ^{14}C , на долю которого приходится более 90 % радиоактивности графитовых элементов, в летучие соединения, расширяя тем самым набор новых более эффективных способов переработки реакторного графита. Это возможно за счёт предлагаемого нами способа высокотемпературной переработки реакторного графита в электродуговых печах, где реакторный графит в инертной атмосфере азота под действием электрической дуги нагревается до $2600\text{ }^\circ\text{C}$, что создаёт необходимые условия перехода радионуклидов в газообразную фазу, кроме углерода. Одновременно с этим вакуумная

система удаляет из печи образующиеся летучие соединения и пропускает их через систему фильтров для улавливания или конденсирования их в специальных аппаратах. Для нагрева графита до высоких температур предлагается применять дуговые электрические печи, которые широко используются в металлургии. Для высокотемпературной переработки графита предлагается использовать типовую электрическую печь ёмкостью 25 тонн с поворотным сводом. Габаритные размеры такой печи составляют: диаметр рабочего пространства – 3,42 м; глубина ванны – 0,775 м; диаметр электродов – 400 мм.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ НИКЕЛЯ ПРИ НАГРЕВАНИИ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА В ВОДЯНОМ ПАРЕ

Арефьева Е.А., Кобелев А.М., Титов С.А.

Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург

E-mail: arefyeva2001@mail.ru

В статье представлены результаты термодинамического анализа поведения радионуклида никеля при взаимодействии радиоактивного графита с водяным паром.

Графитовые отходы являются продуктом использования графита в реакторе для контроля реакции деления ядер. В России накоплены значительные объемы отработанного облученного реакторного графита (около 60 тыс. тонн), количество которого будет увеличиваться приблизительно до 2035 года (год останова последнего блока РБМК Смоленской АЭС). Облученный графит относится к категории неиспользуемых радиоактивных отходов и требует особого подхода при выборе способов обращения с ним.

Имеющиеся технологии переработки ядерных отходов графита основаны по принципу изоляции радиоактивного графита от окружающей среды, что в свою очередь не может обеспечить значительное уменьшение их объема.

Для исследования температурных условий переработки и физико-химических процессов, происходящих в предлагаемой системе, необходимо провести термодинамический анализ поведения радионуклида никеля при нагревании радиоактивного графита в водяном паре.

Термодинамический анализ осуществлен в программном комплексе TERRA, который разработан в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана. Программа позволяет выполнять термодинамические расчеты состава фаз произвольных гетерогенных систем, а также их термодинамических и транспортных свойств.

По результатам моделирования была построена графическая зависимость распределения радионуклида никеля по фазам и получены справочные данные его поведения при значениях температур 373–3273 К, из которых следует, что в газообразное состояние никель переходит начиная с температурного значения 1273 К в виде газообразного никеля (Ni), гидроксида никеля (NiOH) и гидрида никеля (NiH).

Полученные данные следует учитывать при переработке радиоактивного графита в водяном паре. Результаты исследования могут быть применены в процессе переработки радиоактивного графита.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ НИКЕЛЯ ПРИ НАГРЕВАНИИ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА В ОКСИДНО-СОЛЕВОМ РАСПЛАВЕ И ВОДЯНОМ ПАРЕ

Арефьева Е.А., Кобелев А.М., Тумов С.А.

*Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург
E-mail: arefyeva2001@mail.ru*

Помимо генерирования ядерной энергии, атомные электростанции также производят радиоактивные отходы, включая графитовые. Графитовые отходы являются продуктом использования графита в реакторе для контроля реакции деления ядер.

Существует несколько способов сжигания отходов ядерного радиоактивного графита: открытое сжигание, окисление воздухом, окисление в расплавах щелочей, карбонатов и хлоридов, а также, в расплавах с добавкой оксида свинца. По сравнению с использованием высокотемпературных способов переработки отходов графита, окисление в расплавах солей может осуществляться при более низкой температуре (800–900 °С) и без предварительного измельчения.

В данной работе рассматривается возможность замены токсичного оксида свинца на более безопасный оксид меди с оксидно-хлоридной добавкой с целью повышения экологичности процессов и уменьшения негативного влияния на здоровье человека и окружающую среду.

При использовании солевых расплавов продукты деления и основная масса радионуклидов концентрируются в нем, а органическая часть после очистки преобразуется в газовую фазу и отводится в атмосферу.

Для исследования температурных условий переработки и физико-химических процессов, происходящих в предлагаемой системе, необходимо провести термодинамический анализ поведения радионуклида никеля при нагревании радиоактивного графита в оксидно-солевом расплаве и водяном паре.

В ходе моделирования были получены результаты, которые были представлены в виде графических зависимостей, отражающих распределение рассматриваемого радионуклида никеля по различным фазам системы. Согласно полученным данным, при повышении температуры до 2473 К конденсированная фаза (Ni, NiCO₃, Ni(OH)₂) уменьшается до нуля. При температуре выше 2473 К никель в системе присутствует в виде газообразных соединений (Ni, NiO, NiOH, NiCl).

Полученные данные следует учитывать при переработке радиоактивного графита в окисдно-солевых расплавах и водяном паре. Результаты исследования могут быть применены в процессе переработки радиоактивного графита.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ НИКЕЛЯ ПРИ НАГРЕВАНИИ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ

Арефьева Е.А., Кобелев А.М., Титов С.А.

Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург

E-mail: arefyeva2001@mail.ru

В работе рассмотрены проблемные вопросы, связанные с утилизацией радиоактивных отходов, остановленных промышленных уран-графитовых реакторов.

Значительное сокращение объема отходов могут обеспечить технологии высокотемпературной термической обработки, например, сжигание. Существует несколько способов сжигания радиоактивного графита: открытое сжигание, окисление воздухом, окисление в расплавах щелочей, карбонатов и хлоридов, а также, в расплавах с добавкой оксида свинца.

Радиоактивные элементы, находящиеся в реакторном графите, невозможно уничтожить сжиганием. Они либо остаются с негорючей частью отходов, либо испаряются в зависимости от степени их летучести. Следует отметить, что выбросы радионуклидов представляют собой достаточно сложную аэродисперсную систему, состоящую из аэрозоль различной физико-химической природы.

В работе проведен сравнительный термодинамический анализ поведения никеля при нагревании радиоактивного графита в водяном паре и в окисдно-солевом расплаве в водяном паре.

Одной из наиболее развитых и эффективных программ, реализующих такие термодинамические расчеты, является программный комплекс TERRA. Расчеты состава фаз и характеристик равновесия прово-

дились с использованием справочной базы данных по свойствам индивидуальных веществ.

При нагревании радиоактивного графита в водяном паре, в интервале температур от 373 до 2173 К основное количество никеля представляет собой конденсированный оксид никеля (NiO), а в системе с присутствием оксидно-солевого расплава никель (Ni) находится в конденсированном состоянии.

При дальнейшем увеличении температуры до 3273 К никель преобладает в соединениях в виде газообразного никеля (Ni), как в атмосфере водяного пара, так и системе с присутствием оксидно-солевого расплава.

Определено, что газообразная фаза в системе радиоактивный графит-водяной пар газовая фаза начинает образовываться при температуре 1773 К, а в системе радиоактивный графит – оксидно-солевой расплав – водяной пар при температуре 2173 К. Полученные результаты следует учитывать при переработке радиоактивного графита предложенными способами.

ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ГРАФИТА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Титов С.А., Прытков Л.Н., Тикина И.В.

*Научный руководитель: Барбин Н.М. ведущий научный сотрудник
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург
E-mail: tsa-nhl@mail.ru*

Ядерный графит используется в некоторых типах ядерных реакторов в качестве замедлителя или отражателя, что помогает сохранять деление атомных ядер и поддерживать цепную реакцию.

В определенных обстоятельствах, если графит не используется или управляется неправильно, это может создать пожарную опасность. Главная опасность, связанная с графитом в ядерном реакторе, возникает в случае его окисления при высокой температуре, возможно приведёт к образованию CO₂ и CO. Что вероятно повлечёт к возникновению пожара и выбросу радиоактивных материалов из реактора. Для предотвращения таких ситуаций в реакторах с графитом предусмотрены специальные системы безопасности, включающие контроль температуры и преобразование кислорода для предотвращения окисления графита.

Так же при эксплуатации реактора могут возникать различные нестандартные ситуации, к примеру, при температуре до 200–250 °С в графите под воздействием проникающей радиации искажается структура кристаллической решетки и вследствие этого накапливается скрытая энергия (энергия Вигнера). Если эта энергия регулярно не рассеивается путем отжига (повышения температуры), то она может накапливаться

до определенной точки и затем внезапно выделяется с резким повышением температуры, которая может привести к пожару.

Также важно отметить, что графит является радиоактивным материалом, так как в процессе эксплуатации он может поглощать и аккумулировать радиоактивные продукты деления ядерных топливных элементов. При обслуживании реактора или его демонтаже требуются меры предосторожности для обеспечения безопасного управления радиоактивным графитом и предотвращения загрязнения окружающей среды.

В целом, опасность графита в ядерном реакторе связана с возможностью окисления и пожара, а также с его радиоактивными свойствами. Правильное управление реактором, применение соответствующих систем безопасности и строгое соблюдение протоколов обслуживания и демонтажа помогают минимизировать риски, связанные с графитом в ядерных реакторах.

ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕАКТОРНОГО ГРАФИТА

Титов С.А., Прытков Л.Н., Тикина И.В.

¹*Научный руководитель: Барбин Н.М. ведущий научный сотрудник
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург
E-mail: tsa-nhl@mail.ru*

Радиационное состояние графита в ядерном реакторе может быть объяснено следующим образом. В активной зоне реактора графит подвергается облучению нейтронов и гамма-излучению, которые являются продуктами деления и активации материалов в реакторе.

Изначальное загрязнение: графит может содержать определенные примеси или загрязнения изначально, которые могут быть присутствующими в процессе его производства или изготовления. Это может включать такие вещества, как зола, оксиды металлов, сера и другие минорные элементы. Осадки и аккумуляция: внешние вещества могут осаждаться на графитной поверхности со временем и приводить к его загрязнению. Это может быть связано с окружающей средой, такой как пыль, грязь, вода и т. д. Воздействие коррозии: реакторный графит может подвергаться коррозии в результате воздействия агрессивных сред, таких как вода, кислоты или щелочи. Коррозионные продукты могут проникать в структуру графита и вызывать его загрязнение. Импламентация ядерных продуктов деления: в реакторах ядерного типа происходит деление атомов, в результате чего образуются радиоактивные продукты деления. Эти продукты могут имплантироваться в структуру графита и вызывать радиоактивное загрязнение.

Утилизация и хранение: при утилизации или хранении реакторного графита могут возникать проблемы загрязнения, так как он может соприкасаться с другими материалами или веществами, которые могут внести загрязнения.

Распад изотопов: при распаде радиоактивных изотопов, присутствующих в реакторном графите, могут образовываться различные радиоактивные продукты распада, которые могут загрязнять графит.

Воздействие окружающей среды: окружающая среда, в которой находится реакторный графит, может также влиять на его загрязнение. Например, если графит находится в воде или влажной среде, то могут происходить химические реакции, которые могут вызывать загрязнение.

В целом, загрязнение реакторного графита может быть вызвано различными факторами, включая изначальное загрязнение, окружающую среду, коррозию, ядерные продукты деления и другие процессы, связанные с его производством, эксплуатацией и утилизацией.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ УРАНА ПРИ СЖИГАНИИ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА, ОБОГАЩЕННОГО КИСЛОРОДОМ

Титов С.А., Прытков Л.Н., Тикина И.В.

¹*Научный руководитель: Барбин Н.М. ведущий научный сотрудник
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург
E-mail: tsa-nhl@mail.ru*

Наибольшее количество реакторного графита находится в энергетических реакторах РБМК, масса графитовой кладки одного блока составляет около 1800 тонн.

По разным оценкам, суммарное количество облученного реакторного графита в России достигает 60 тыс. тонн. Данная проблема актуальна для Великобритании, где его накоплено более 86 тыс. тонн, США – 55 тыс. тонн и Франции – 23 тыс. тонны. Общее количество накопленного во всем мире облученного графита составляет около 260 тыс. тонн.

Имеющиеся технологии переработки ядерных отходов графита, основаны по принципу изоляции радиоактивного графита от окружающей среды, что в свою очередь не может обеспечить значительное уменьшение объема.

В настоящее время наиболее перспективными способами обращения с отработавшими графитовыми материалами являются сжигание.

Для исследования температурных условий переработки и физико-химических процессов, происходящих в атмосфере воздуха, обогащенного кислородом, необходимо провести термодинамический анализ.

Расчет термодинамического моделирования проводился в программе TERRA. В интервале температур от 300 до 3600 градусов кельвина (К) с шагом 100 К, при давлении 0,1 МПа.

Результаты термодинамического моделирования нагрева реакторного графита в атмосфере воздуха показывают, что в диапазоне температур от 300 до 2000 К уран находится в конденсированной и газовой фазе в виде компонентов: конденсированного диоксида урана, конденсированной хлор окиси урана, конденсированного оксид хлорида урана, газообразного хлорида урана (IV), газообразного оксида урана (VI), конденсированного ураната кальция.

При повышении температуры от 2000 до 3600 К уран наблюдается в газовой и ионизированной фазе в виде компонентов: ионизированного оксида урана (VI), ионизированного диоксида урана, газообразного диоксида урана, конденсированного нонаоксида тертаурана.

Данные исследования необходимы для разработки технологий по переработке, а именно для подбора температурного интервала для проектирования таких технологий.

АВАРИИ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ. ПОВЕДЕНИЕ РАДИОНУКЛИДА ЦЕЗИЯ

Титов С.А., Тикина И.В., Прытков Л.Н.

*Научный руководитель: Барбин Н.М. ведущий научный сотрудник
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург
E-mail: tsa-nhl@mail.ru*

В мире существует шесть типов ядерных реакторов. Водородной энергетический реактор, реактор большой мощности канальный, реактор на тяжелой воде, реактор с шаровой засыпкой и газовым контуром, реактор на быстрых нейтронах и энергетический гетерогенный проточный реактор. В данной работе рассмотрен реактор большой мощности канальный (РБМК). Уран-графитовые реакторы являются потенциальным источником повышенной радиационной опасности для людей и окружающей среды. За 18 лет службы реактор на Белоярской АЭС был остановлен более 200 раз и все эти остановки были связаны с авариями на тепловыделяющей сборке. Развитие систем безопасности не стоит на месте и на сегодняшний день вероятность возникновения аварий достаточно мала, но полностью исключить возможность ее возникновения, к сожалению, невозможно. Вопросы обеспечения радиационной безопасности для объектов атомной энергетики имеют доминирующее значение.

В работе проведен анализ поведения радионуклидов цезия в случае нагрева графита до высоких температур методом термодинамического моделирования в программном комплексе TERRA. В составе графита накапливаются различные радионуклиды цезия: ^{112}Cs , ^{113}Cs , ^{114}Cs , ^{115}Cs , ^{116}Cs , ^{117}Cs , ^{118}Cs , ^{119}Cs , ^{120}Cs , ^{121}Cs , ^{122}Cs , ^{123}Cs , ^{124}Cs , ^{125}Cs , ^{126}Cs , ^{127}Cs , ^{128}Cs , ^{129}Cs , ^{130}Cs , ^{131}Cs , ^{132}Cs , ^{134}Cs , ^{135}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs , ^{138}Cs , ^{139}Cs , ^{140}Cs , ^{141}Cs , ^{142}Cs , ^{143}Cs , ^{144}Cs , ^{145}Cs , ^{146}Cs , ^{147}Cs , ^{148}Cs , ^{149}Cs , ^{150}Cs , ^{151}Cs .

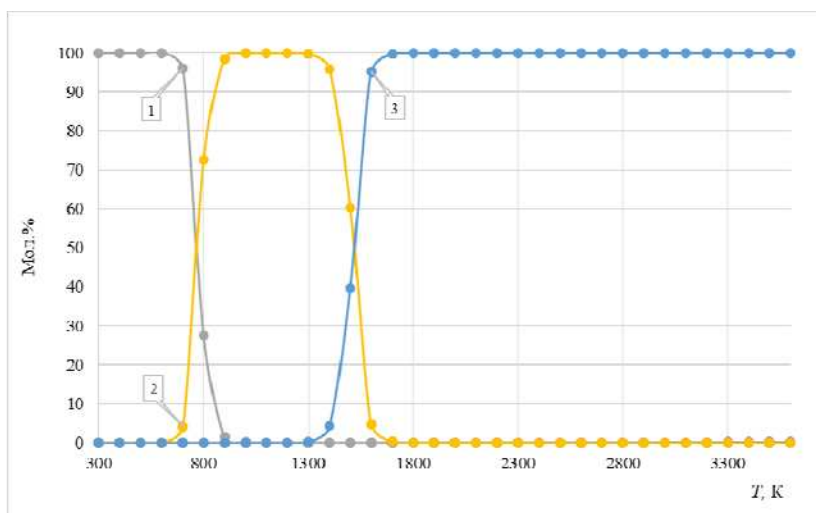


Рис. 1. Распределение цезия по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в воздухе:
 1 — $\text{CsCl}_{(к)}$; 2 — CsCl ; 3 — Cs^+

В результате моделирования нагрева радиоактивного графита в атмосфере воздуха получены график температурной зависимости распределения радионуклидов по фазам. Распределение цезия по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в воздухе показано на рисунке.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДА НИКЕЛЯ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ПОЖАРА НА УРАН-ГРАФИТОВОМ РЕАКТОРЕ

Титов С.А., Тикина И.В., Прытков Л.Н.

Научный руководитель: Барбин Н.М. ведущий научный сотрудник
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург
E-mail: tsa-nhl@mail.ru

Атомная энергетика занимает ведущее место в мировой экономике и на сегодняшний день достойно альтернативы ей не существует. На долю атомной энергетики приходится порядка 18 % всей вырабатываемой электроэнергии в мире. При эксплуатации атомных электростанций (АЭС) особую важность имеет вопрос обеспечения безопасности так как любая аварийная ситуация на АЭС может привести к серьезным последствиям как для экологии, так и для здоровья людей. Вопрос идентификации и определения потенциальной опасности радионуклидов, выделяющихся в атмосферу в случае аварии является весьма важным.

Целью данной работы является определение возможного состава летучих соединений радионуклидов Ni в случае возникновения аварии на АЭС с уран-графитовыми реакторами.

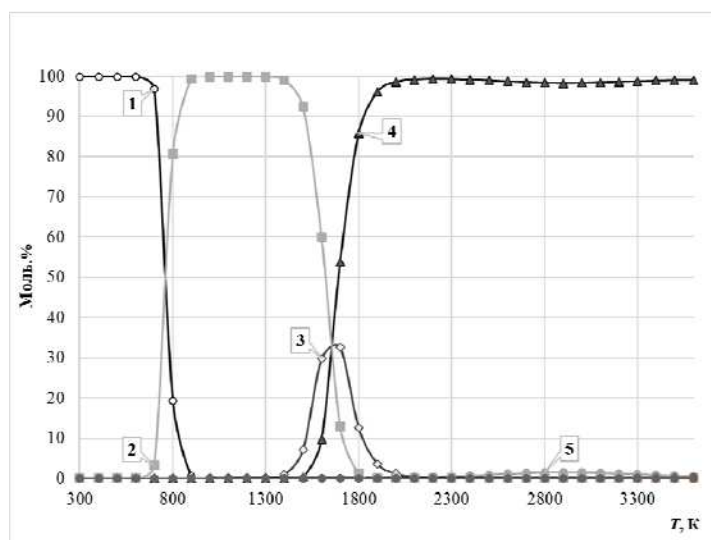


Рис. 1. Распределение никеля по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в воздухе:
1 – $NiCl_{2(к)}$; 2 – $NiCl_2$; 3 – $NiCl$; 4 – Ni ; 5 – NiO

В работе проведено термодинамическое моделирование одной системы в атмосфере воздуха с использованием метода термодинамиче-

ского моделирования с помощью программного комплекса TERRA, определены основные реакции поведения Ni при нагревании радиоактивного графита и рассчитаны константы равновесия реакций.

В докладе приводится исходный состав радиоактивного графита в атмосфере воздуха. Также приведены девять форм существования радионуклидов никеля. Получено распределение никеля радионуклидов никеля по фазам (рисунок) в рассматриваемой системе и определены характерные реакции и температурные интервалы, в которых они наблюдаются. Из полученных данных видно, что никель на участке температур от 600 до 900 К находится в виде конденсированного NiCl₂(к.), при повышении температуры от 1300 до 3600 К в виде газообразных NiCl₂, NiCl, Ni, NiO.

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ПО ОБЪЕМУ КРИСТАЛЛА NaCl

Арыштаев А.М., Огородников С.А.

*Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: ama33@tpu.ru*

Получение или использование изотопной продукции невозможно проводить без масс-спектрометрического анализа. Следует упомянуть, что масс-спектрометрия и изотопия развивались параллельно. Имеются ГОС-Ты и ведомственные методики для определения изотопного состава проб, отбираемых в соответствии с указанными нормативными документами. Для получения паспортной точности измерения необходимо учитывать влияние различных факторов, в том числе эффекты дискриминации масс, чистоту используемых реагентов, возможность наложения близких по массе пиков, зашумление фонового сигнала масс-спектрометра.

Экспериментально определяли изменение изотопного эффекта в постоянном слабом магнитном поле при кристаллизации NaCl из водных растворов. Ставилась задача послойного определения изотопного состава, из-за того, что в процессе роста кристаллов изменяется пересыщение раствора.

Измеряли пространственное распределение изотопного состава хлора в кристаллах NaCl, с использованием масс-спектрометра (МС) с индуктивно связанной плазмой Element. В качестве пробонесущего газа в масс-спектрометрии используется аргон. Аргон также используется в качестве плазмообразующего газа, переводящий пробу в газовую фазу. Поэтому в ионном источнике МС могут образовываться различные эксимеры,

например ^{36}ArH . Массовые числа эксимера и тяжелого изотопа хлора близки. Поэтому в первую очередь рассматривали масс-спектр в области 37 Да с разрешением $R = 10000$, которое в дальнейшем не изменялось. Из масс-спектров видно, что линии ^{37}Cl и $^{36}\text{Ar}^1\text{H}$ хорошо разрешены, даже различия интенсивностей пиков на несколько порядков. В области пика изотопа ^{35}Cl не наблюдается наложения с линиями других ионов.

Для компенсации «эффекта памяти» МС вычитали интенсивности пиков масс-спектра деионизированной воды, используемой при приготовлении растворов, из интенсивностей пиков исследуемых образцов. На основе масс-спектра NaCl природного изотопного состава оценивали эффект дискриминации масс. Сравнивали величину $\text{At}37/\text{At}35$ для кристаллов с природным составом изотопов хлора ($\text{At}37 = 24,22\%$, $\text{At}35 = 74,78\%$) и полученным на нашем приборе. Изотопный состав, определяемый по регистрируемым нами масс-спектрам исследуемых образцов, корректировали с учётом коэффициента дискриминации масс.

Для оценки пространственного распределения изотопов, кристаллы растворяли послойно с помощью деионизированной вод. В докладе приводятся конструкция ячейки и методика послойного растворения NaCl , а также процессы в растворе, приводящие к изменению изотопного состава.

МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗОТОПОВ В ХИМИИ

Мухаметжанова Е.С., Зарыкбаева К.С., Смаилов Д.Е.

НАО университет имени Шакарима, г. Семей, РК

E-mail: merkezhn04@mail.ru, Kamshat.ru@mail.ru, smlvdr8@gmail.com

Большинство химических элементов в природных условиях представлены двумя и более изотопами. Изотопный состав химических элементов в природе колеблется незначительно. Поэтому широко используется метод «меченых» атомов (ММА), связанный с использованием изотопов в качестве индикаторов при изучении распределения или путей перемещения вещества в различных системах. ММА используется в: биологии, медицине, сельском хозяйстве, экологии, гидрогеологии. В химии с помощью ММА определяют элементный состав и скорость миграции, изучают процессы в растворах. При решении задач химической кинетики и электрохимии, разработке катализаторов также используются изотопы.

В докладе приводится подробный обзор методов использования изотопов для решения различных задач в химии. Например, с помощью изотопов, при исследовании промежуточных состояний различных химических преобразований, определяют скорости формирования (исчезновения) промежуточных состояний и последовательность их образования, реги-

стрируют молекулы, образующиеся одновременно из одного исходного соединения. При этом становится возможным определение разрывающихся связей, необходимых для формирования новых связей. При этом следует учитывать возможный обмен изотопами между соединениями.

Известно, что контроль скоростей прямого и обратного процессов в условиях равновесия возможно лишь с помощью изотопов. С помощью изотопных индикаторов решались множество задач при определении механизмов химических и биологических процессов. Хотя ММА имеет большую перспективность, но применение изотопной метки является лишь одним из простейших изотопных методов. При этом недостаточно использовались другие, не менее эффективные способы использования изотопов при изучении химических реакций. Например, кинетический изотопный эффект позволяет определять вклад переходных состояний в химических преобразованиях. Исходя из строения переходных комплексов можно оценивать скорость химической реакции. Почти не используется метод разбавления изотопа, позволяющий регистрировать малые концентрации промежуточных соединений химических реакций, которые невозможно наблюдать, например, спектральными методами.

Для определения состава проб, находящихся в любом фазовом состоянии, используется нейтронно-активационный анализ (НАА). При бомбардировке проб нейтронами образуются короткоживущие изотопы, по относительной интенсивности излучения которых определяют состав пробы. НАА практически не разрушает образец, наведенная активность быстро затухает.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ Q-КАСКАДА ПО ПОЛУЧЕНИЮ ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО СВИНЦА-206

Леякова М.К., Романис М.Е.

*Научный руководитель: Орлов А.А., д.т.н., профессор
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: mkl2@tpu.ru*

При разработке новых ядерно-энергетических установок, приоритет отдается реакторам на быстрых нейтронах (РБН) с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. Теплоноситель РБН, циркулируя по активной зоне реактора, активизируется и нарабатывает долгоживущие радионуклиды. Учитывая количество теплоносителя в рассматриваемых РБН и масштабы внедрения малых АЭС в будущем, могут возникнуть проблемы обращения с отработавшим теплоносителем после снятия РБН

с эксплуатации и при проведении ремонтных и аварийных работ. Поэтому желательно иметь теплоноситель с низким содержанием долгоживущих радионуклидов – продуктов ядерных реакций. В качестве такого малоактивируемого теплоносителя можно использовать свинец, обогащенный по свинцу-206. Его содержание в природной смеси изотопов свинца составляет примерно 24 %, а требуемое обогащение 95–98 %.

В данной работе по известной методике [1] проведен расчет параметров Q–каскада по получению высокообогащенного ^{206}Pb . Получены график распределения концентрации изотопов свинца и профиль рассчитанного Q–каскада для первого (при концентрации отбора тяжелой фракции 0,1 %) и второго (при концентрации отбора тяжелой фракции 0,1 % и 0,3 %) этапов разделения.

Показано, что при уменьшении концентрации отбора тяжелой фракции увеличивается количество ступеней в регенеративной части, а концентрация нецелевых изотопов в отборе тяжелой фракции увеличивается.

Результаты расчетов показали, что можно достигнуть концентрации свинца-206 равной 95,79 % в отборе легкой фракции второго этапа разделения. В отборе тяжелой фракции второго этапа разделения, концентрация свинца-207 составила 89,32 % и 69,47 %, при исходной концентрации целевого изотопа в потоке отбора тяжелой фракции 0,1 % и 0,3 % соответственно.

Список использованной литературы

1. А.А. Орлов, М.В. Верлинский, Разделение многокомпонентных изотопных смесей. – Томск: Изд-во ТПУ, 2020. – [С. 40].

Секция 2

ПЛАЗМЕННЫЕ И ВОДОРОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

FRICION COEFFICIENT OF POLYLACTIC ACID FILMS AFTER THE PLASMA TREATMENT

Pautov K.G., Filippova E.O.

*Scientific adviser: Filippova E.O.
Tomsk Polytechnic University,
634050, Russia, Tomsk, Lenin Avenue, 30
E-mail: kgp5@tpu.ru*

Biodegradable polymer materials are widely used in regenerative medicine. One of the interesting materials for medical applications as implants is polylactic acid. The implanted material must withstand the mechanical effects of surgical instruments, and therefore it is useful to know about the tribological characteristics of the polymer implants.

The purpose of this work is to study the coefficient of friction of polylactic acid films after the exposure to low-temperature atmospheric plasma.

The polylactic acid films were obtained from a polylactic acid solution with a molecular weight of $M_w = 121000$ g/mol (PURASORB® PL 10, the Netherlands). The each side of material was treated with low-temperature atmospheric pressure plasma for 30 s. Friction and wear studies were carried out using the finger-disk scheme under dry sliding friction conditions on a TRIBO technik machine (France) while varying the test duration (10–30 m) and sliding speed (in the range (1.5–5) mm/s). A counterbody was a ceramic ball (diameter = 6 mm).

The friction coefficient of the initial films was in the range of 0.123–0.251, after plasma – 0.122–0.203. The range of the coefficient of friction (initial films) was 0.138–0.192 (1.5 mm/s), 0.127–0.171 (3 mm/s), 0.143–0.177 (5 mm/s). An increase in sliding speed contributes to a slight decrease in the friction coefficient for the initial samples and after exposure to plasma (~1.5 times). Changing the test duration does not lead to a significant change in the friction coefficient.

STUDY OF THE FRICTION COEFFICIENT OF POLY(ϵ -CAPROLACTONE) FILMS AFTER THE PLASMA TREATMENT

Golinskiy I.E., Filippova E.O.

*Scientific adviser: Filippova E.O.
Tomsk Polytechnic University,
634050, Russia, Tomsk, Lenin Avenue, 30
E-mail: ieg7@tpu.ru*

Poly(ϵ -caprolactone) is a biocompatible and bioresorbable synthetic polymer that has been extensively studied and applied in implants for ophthalmic controlled drug delivery. The implanted material must withstand the mechanical effects of surgical instruments, and therefore it is useful to know about the tribological characteristics of the polymer implants.

The purpose of this work is to study the coefficient of friction of poly(ϵ -caprolactone) films after the exposure to low-temperature atmospheric plasma.

Initial film samples of poly(ϵ -caprolactone) were obtained from a 1 % solution of poly(ϵ -caprolactone) with a molecular weight of $M_w = 80,000$ g/mol (Sigma-Aldrich, England). The each side of material was treated with low-temperature atmospheric pressure plasma (the treatment time was 30 s). Friction and wear studies were carried out using the finger-disk scheme under dry sliding friction conditions on a TRIBO machine (France) while varying the test duration (0,13–0,5 m) and sliding speed (in the range (1.5–5) mm/s). A counterbody was a ceramic ball (diameter = 6 mm).

The range of the coefficient of friction of initial films was 0.127–0.394 (1.5 mm/s), 0.124–0.329 (3 mm/s), 0.126–0.37 (5 mm/s). The range of the coefficient of friction of films after the plasma treatment was 0.125–0.244 (1.5 mm/s), 0.125–0.491 (3 mm/s), 0.125–0.399 (5 mm/s).

An increase in the speed and duration of the sliding test did not change of the friction coefficient of the initial samples and films after exposure to the plasma.

ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ГИДРИДА МАГНИЯ И НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ МЕХАНОСИНТЕЗА

Леонова Е.С., Кенжиев А.А., Курдюмов Н.

*Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: esl24@tpu.ru*

В связи с истощением нефтяных ресурсов и ухудшением экологической обстановки поиск и разработка безопасных, чистых и экологичных источников энергии для удовлетворения мирового спроса на энергоносители становятся первоочередной задачей. Водород, самый легкий газ, хорошо известен своей высокой теплотворной способностью при сгорании, а также тем, что не загрязняет окружающую среду. Водород является экологически чистым источником энергии и может быть использован в качестве химического сырья в нефтехимии, микроэлектронике, химическом и полимерном синтезе, металлургии и других областях, а также в качестве энергоносителя в чистых и устойчивых энергетических системах для решения проблемы энергетического кризиса, парникового эффекта и загрязнения окружающей среды. Водород является одним из наиболее перспективных энергоносителей благодаря наличию большого количества источников и экологически чистых продуктов сгорания. Разработка безопасного, эффективного и экономичного способа хранения водорода – необходимый шаг на пути к получению конкурентоспособного вида топлива. Гидриды металлов, в частности гидрид магния MgH_2 , являются перспективным методом хранения водорода. Такой метод отличается доступностью, объемной плотностью (109 г. H_2 /л) и высокой емкостью (7,6 масс. %). Однако стоит отметить, что гидрид магния имеет высокую температуру сорбции и десорбции и низкую скорость протекания данных процессов. Это связано с ограниченной скоростью диссоциации молекул водорода на поверхности, наличием оксидного слоя и низкой подвижностью водорода в гидридной фазе. И для того чтобы извлечь водород требуется приложить большую энергию. Поэтому необходимо разработать методику по снижению энергии активации десорбции водорода.

Одним из направлений является синтез композитов на основе гидрида магния и каталитических добавок, которыми могут выступать металлы и их оксиды. Метод электрического взрыва проводников (ЭВП) является одним из перспективных методов для получения каталитических добавок к гидриду магния.

Одним из таких методов является синтез гидрида магния с порошком никеля, полученного электрическим взрывом проводника (ЭВП) – процессом взрывного разрушения проволоки под действием тока с плотностью ($>10^{10}$ А/м²). При высокой плотности вводимой энергии материал проволоки трансформируется в наночастицы. Характеристики данного метода: длительность импульса тока и мощность взрыва.

В результате механохимического синтеза гидрида магния совместно с наноразмерным порошком никеля, полученного методом электро-взрыва проводников, был получен композит. С помощью метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионного анализа было показано, что композит представляет собой структуру типа ядро-оболочка, где крупные частицы гидрида магния MgH₂ покрыты наноразмерными частицами никеля.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01280), а также в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

1. Борисов Д.Н. Водород-аккумулирующие сплавы и композиты на основе магния // ISJAEE. – 2008. – С. 33–38.

2. Можжухин С.А., Арбузов А.А., Тарасов Б.П. Влияние добавок восстановленного оксида графита и никеля на процесс обратимого гидрирования магния // ISJAEE. – 2015. – С. 78.

3. Middeli A., Dincer I. // Int. J. Hydrogen Energy. – 2007. – 32, № 5. – P. 511–524.

4. Фурсиков П.В., Фокин В.Н., Фокина Э.Э., Можжухин С.А., Арбузов А.А., Лапшин А.Н., Ходос И.И., Тарасов Б.П. Микроструктура водородсорбирующих композитов на основе эвтектического сплава магния с никелем // ЖПХ. – 2022. – 95, № 8. – С. 1006–1010.

5. Фурсиков П.В., Слепцова А.М., Можжухин С.А., Арбузов А.А., Фокин В.Н., Фокина Э.Э., Ходос И.И., Тарасов Б.П. Фазовый состав и микроструктура сорбирующих водород композитов эвтектического сплава Mg-Ni с графеноподобным материалом // ЖФХ. – 2020. – 94, № 5. – С. 789–795.

6. Арбузов А.А., Можжухин С.А., Володин А.А., Фурсиков П.В., Тарасов Б. П. Синтез графеноподобных наноструктур и формирование на их основе катализаторов и водород-аккумулирующих композитов // Известия Академических наук. Серия химическая. – 2016. – № 8. – С. 1893–1901.

7. Andrei V. Mostovshchikov, Boris G. Goldenberg, Olga B. Nazarenko. Effect of synchrotron radiation on thermochemical properties of aluminum micro- and nanopowders // Materials Science and Engineering: B. – 2022. – Vol. 285.

ROUGHNESS OF POLY(ϵ -CAPROLACTONE) FILMS AFTER THE LOW-TEMPERATURE PLASMA TREATMENT

Glushenko P.V., Filippova E.O.

Scientific adviser: Filippova E.O.

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

E-mail: pvg12@tpu.ru

Poly(ϵ -caprolactone) is a biodegradable aliphatic polyester which exhibits very good bioacceptance, high blend miscibility and drug permeability. Despite the advantages of this polymer, there are a number of disadvantages such as hydrophobicity and low surface energy. One solution to this problem may be the use of low-temperature atmospheric pressure plasma. The purpose of this work is to study the roughness parameters of poly(ϵ -caprolactone) films after the low-temperature plasma treatment.

Initial film samples of poly(ϵ -caprolactone) were obtained from a 1 % solution of poly(ϵ -caprolactone) with a molecular weight of $M_w = 80,000$ g/mol (Sigma-Aldrich, England). The each side of material was treated with low-temperature atmospheric pressure plasma (the treatment time was 30 s). The study of the surface relief of films and TM was carried out using an atomic force microscope «Solver-HV» (NT-MDT, Russia). Surface roughness profiles were generated in the Gwyddion 2.49 and Origin 9.0 software with an accuracy of 1 nm. Roughness parameters were processed in accordance with ISO 4287:1997. For the calculation, at least 10 surface profiles were used for each group of samples. The following parameters were set: R_a , R_q , R_t , R_{sk} , R_v , R_p , R_{tm} , R_{vm} , R_p .

The initial films had R_a parameter of 50.9 ± 3.6 nm, R_q of 67.8 ± 4.4 nm, R_t of 594.2 ± 59 nm, R_v of 381.9 ± 96 nm, R_{tm} of 421.2 ± 16.2 nm, R_{vm} of 262.4 ± 34.4 nm, R_{pm} of 158.8 ± 19.6 nm.

The plasma decreased the roughness parameters of poly(ϵ -caprolactone) films: R_a in 1.8 times, R_q , R_t , R_{pm} in 1.4 times, R_v , R_{vm} , R_{tm} in 2 times. The plasma didn't change R_{sk} and R_p parameters of the of poly(ϵ -caprolactone) films.

ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННАЯ КОНВЕРСИЯ ОБЕДНЕННОГО ПО ИЗОТОПУ УРАН-235 ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

Менжуренко И.В., Сычева А.А.

*Научный руководитель: Каренгин А.Г., к.ф.-м.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: ivm25@tpu.ru*

Конверсия ОГФУ через гидролиз до уранилфторида и пирогидролиз до закиси-окиси урана предъявляет высокие требования к конструкционным материалам и требует значительных энергозатрат и химических реагентов [1]. Перспективны является процесс конверсии ОГФУ, включающий гидролиз ОГФУ водным раствором нитрата алюминия с получением осадка трифторида алюминия и водного раствора нитрата уранила с последующей его переработкой в воздушной плазме в виде оптимальных по составу водно-органических нитратных растворов, включающих органический компонент (этанол, ацетон) и имеющих адиабатическую температуру горения $T_{ад} \geq 1500$ К [2]. В работе представлены результаты термодинамического моделирования процесса переработки оптимальных по составу растворов ВОНР, имеющих адиабатическую температуру горения $T_{ад} \geq 1500$ К и обеспечивающих в воздушной плазме энергоэффективный плазмохимический синтез диоксида урана.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания энергоэффективной технологии воздушно-плазменной конверсии ОГФУ.

Список использованной литературы

1. Сычева А.А., Каренгин А.Г. Исследование и оптимизация процесса воздушно-плазменной конверсии гексафторида урана // Открытая научно-техническая конференция молодежного движения топливной компании «Science and youth TVEL»: сборник тезисов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2023. – с. 48.

ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ПОСЛЕ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Белозеров Н.А.

*Научный руководитель: Каренгин А.Г., к.ф.-м.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: nab38@tpu.ru*

Россия первой в мире приступила к созданию замкнутого ядерного топливного цикла, который включает: переработку отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), извлечение из ОЯТ изотопов урана-235, урана-238 и плутония-239; производство на их основе МОХ-топлива или REMIX-топлива. Однако в процессе переработки ОЯТ образуются неорганические отходы переработки ОЯТ (рафинаты) в виде водных нитратных растворов, включающих продукты деления урана-235 и конструкционные материалы, эффективных технологий переработки которых до сих пор нет. Перспективным является процесс воздушно-плазменной утилизации рафинатов в виде оптимальных по составу водно-органических нитратных растворов, включающих органический компонент. По результатам расчетов установлены закономерности влияния содержания органического компонента (этанол, ацетон) на показатели горючести водно-органических нитратных растворов на основе рафинатов и определены составы растворов ВОНР, имеющих $T_{ад} \approx 1500K$ и обеспечивающих их энергоэффективную утилизацию. По результатам термодинамических расчетов установлены закономерности влияния массовой доли воздуха на состав образующихся продуктов воздушно-плазменной утилизации растворов ВОНР и определены условия, обеспечивающие их экологически безопасную утилизацию. Определены режимы работы плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона и экспериментально подтверждена на модельных растворах ВОНР эффективность воздушно-плазменной утилизации рафинатов.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ТОПЛИВНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ТОЛЕРАНТНОГО REMIX-ТОПЛИВА

Щербина Д.С.

*Научный руководитель: Каренгин А.Г., к.ф.-м.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: dss44@tpu.ru*

Применение изотопов уран-235, уран-238 и плутоний-239 из отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) для изготовления REMIX-топлива не потребует дорогостоящего изотопного обогащения, но у него остается недостаток – низкая теплопроводность [1].

Перспективным является плазмохимический синтез топливных оксидных композиций (ТОК) для толерантного REMIX – топлива из водно-органических нитратных растворов, включающих органический компонент (спирты, кетоны), водные нитратные растворы делящихся (уран, плутоний) и матричных (магний, иттрий) металлов, обеспечивающих их энергоэффективную переработку [2].

В результате проведенных теплотехнических расчетов установлены закономерности влияния органического компонента и определены составы растворов ВОНР на основе этанола (ацетона), имеющие $T_{ад} \geq 1500\text{K}$ и обеспечивающие энергоэффективный синтез в воздушной плазме ТОК «PuO₂-UO₂-MgO» и «PuO₂-UO₂-Y₂O₃» различного состава при $\alpha = (\text{PuO}_2 + {}^{235}\text{UO}_2) / (\text{PuO}_2 + \text{UO}_2) = 0,034$.

По результатам термодинамических расчетов установлены закономерности влияния массовой доли воздуха на состав продуктов воздушно-плазменной переработки растворов ВОНР при увеличении массовой доли матрицы (MgO, Y₂O₃) в составе ТОК с 5 до 50 % и определены режимы, обеспечивающие плазмохимический синтез ТОК требуемого фазового состава для толерантного REMIX-топлива.

Результаты исследований могут быть использованы при создании технологии плазмохимического синтеза ТОК для толерантного REMIX-топлива.

Список использованной литературы

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, – 2015. – 248 с.
2. Shamanin I.V., Karengin A.G., Karengin A.A., Novoselov I.Y. Plasma-chemical synthesis and investigation of nano-size oxide compositions simulating uranium-thorium dispersion nuclear fuel // Atomic Energy. – 2021. – Vol. 131 – № 1. – P. 46–49.

SYNTHESIS OF OXIDE AND CARBON-OXIDE COMPOSITIONS FOR DISPERSION NUCLEAR FUEL IN NON-EQUILIBRIUM PLASMA OF AIR

Tikhonov A.E., Novoselov I.Yu.

*Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin Ave, 30
E-mail: aet13@tpu.ru*

Modern atomic energetics using oxide nuclear fuel (NF) in form of uranium dioxide (enriched in uranium-235) in thermal neutron reactors has many advantages and disadvantages. Major disadvantages are low thermal conductivity, limiting specific capacity of reactor in melting temperature; frailty of ceramic fuel and possibility to fracture at high temperatures; short usage cycle; impossibility to create low and extra low capacity power generation systems; high costs on spent NF utilization; uranium-235 finite life. These factors slow down the atomic energetic development and lead to refusal of it in several countries.

One of the upcoming trends in atomic energetics development is creating reactor systems which use dispersion NF (DNF). In that fuel granular oxide nuclear compositions (uranium, thorium, plutonium, etc.) are placed in matrix (aluminum, molybdenum, stainless steel, etc.). DNF characterized by lack of direct contact between granules due to their regular distribution in matrix and has the following advantages: high thermal conductivity and mechanical properties; low formation of gaseous fission products; high fuel burnout, nuclear hardness, and durability; localization of fission products in granules; low heat reserve in fuel and escapement of radioactive fission products in heat transfer agent circuit in case of cover failure. In case of usage uranium-238, thorium-232 and plutonium-239 there is no need to apply high cost isotope enrichment and NF usage cycle could be raised to 10–15 years. However, DNF has some substantial disadvantages: parasitic neutron capture by matrix material that makes fuel neutron balance worse; necessity to apply high-enriched materials that rises risk of fuel critical mass excess. Besides, technological scheme that used to obtain granulated oxide compositions for DNF from mixed nitric solutions (MNS) based on sol-gel process that has many longtime and laborious stages [1]. Application of low temperature non-equilibrium plasma is promising to MNS treatment. However, plasma treatment of only MNS requires significant energy costs. Major advantages of plasma technology are: one-stage process; high processing speed; homogenous stoichiometrically-defined phase distribution; possibility to have an impact on particle size and particle morphology; compactness of technological equipment; low energy costs.

Article represents results in simulation of plasma treatment of MNS in form of water-salt-organic compositions (WSOC). Authors defined formulations of WSOC based on burning rates calculation. As a result, authors de-

fined operational modes providing direct plasmachemical synthesis of oxide and carbon-oxide compositions.

Список использованной литературы

1. Toumanov I.N., Sigailo A.V. Plasma Synthesis of Disperse Oxide Materials from Disintegrated Solutions // Materials Science and Engineering. 1991.– Vol. A140.– P. 539–548.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ « $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ », ИМИТИРУЮЩИХ УРАН-ТОРИЕВОЕ ДИСПЕРСИОННОЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО

Зубов В.В.¹

*Научный руководитель: Каренгин А.Г.*², к.ф.-м.н., доцент

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, пр. Мира 37

²Томский политехнический университет,

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

E-mail: kaberne1812@yandex.ru

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса плазмохимического синтеза модельных оксидных композиций « $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ » в воздушно-плазменном потоке из диспергированных водно-органических нитратных растворов, включающих органический компонент (ацетон), водные нитратные растворы неодима (вместо урана), церия (вместо тория) и металла матрицы (магний).

Проведен анализ морфологических, структурных, кристаллических и технологических свойств МОК « $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ » и получены следующие результаты:

- медианный размер частиц $D_{50} = 14,7$ мкм с относительной расширенной неопределенностью ± 15 % при $P = 0,95$,
- средний размер частиц $D_{\text{ВЕТ}} = 76$ нм с относительной расширенной неопределенностью ± 10 % при $P = 0,95$,
- удельная поверхность $S_m = 12,8$ м²/г с относительной расширенной неопределенностью ± 10 % при $P = 0,95$,
- средний размер кристаллитов в составе частиц $D_{\text{кр}} = 89$ нм с относительной расширенной неопределенностью ± 10 % при $P = 0,95$.
- методом РФА установлено, что МОК включают оксиды церия (Ce_2O_3), неодима (Nd_2O_3) и магния (MgO).

Результаты исследований могут быть использованы при создании технологии плазмохимического синтеза наноструктурных топливных оксидных композиций для уран-ториевого толерантного ядерного топлива.

ХРАНЕНИЕ ВОДОРОДА В КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ ГИДРИДА МАГНИЯ И НАНОРАЗМЕРНОГО ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ

Баранова П.А., Кенжиев А., Курдюмов Н.

*Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: pab13@tpu.ru*

Одним из важных направлений водородной энергетики является получение, хранение, транспортировка и безопасное использование водорода. В связи с небольшим размером и массой водорода он может накапливаться в кристаллической решетке металлов. Чаще всего материалом-накопителем водорода используют гидриды металлов. В качестве такого материала подходит магний, но он имеет существенный недостаток – высокая температура сорбции и десорбции. Снизить эту температуру позволит добавление наноразмерного порошка алюминия, полученного электровзрывом проводника. Для получения гидрида магния используется порошок магния, предварительно активированный в шаровой мельнице AGO-2 в течение 120 минут в атмосфере аргона при скорости вращения банки 900 об/мин и размером стальных шаров 5 мм. Гидрирование производилось при температуре 643 К, давлении водорода 3,5 Мпа и выдержкой 240 минут. Получение композита гидрида магния с 10 % содержанием нанопорошка алюминия производится также с помощью механосинтеза в шаровой мельнице.

Результатом синтеза является композит со структурой ядро-оболочка, то есть крупные частицы гидрида магния покрыты наноразмерными частицами алюминия. Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания «Наука» в рамках научного проекта № FSWW-2023-0005.

Список использованной литературы

1. Mostovshchikov Andrei V., Goldenberg Boris G., Nazarenko Olga B. Effect of synchrotron radiation on thermochemical properties of aluminum micro- and nanopowders // *Materials Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 285.
2. Nazarenko Olga, Gromov Alexander, Il'in Alexander, Pautova Julia, Tikhonov Dmitry. Electroexplosive nanometals // *Metal Nanopowders: Production, Characterization, and Energetic Applications*. – 2014. – P. 67–69.
3. Ильин А.П., Мостовщиков А.В., Корщун А.В., Роот Л.О. Особенности физико-химических свойств нанопорошков и наноматериалов // ТПУ. – 2017. – 212 с

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ТОПЛИВНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ УРАН-ТОРИЕВОГО ТОЛЕРАНТНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Тихонов А.Е., Кузнецова А.А.

*Научный руководитель: Каренгин А.Г., к.ф.-м.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: aet13@tpu.ru*

Использование изотопа торий-232 даст возможность создания ЯЭУ сверхмалой (до 10 МВт) и малой (до 100 МВт) мощности и значительно снизит расходы на утилизацию отработавшего ядерного топлива. Перспективным является плазмохимический синтез топливных оксидных композиций для уран-ториевого толерантного ядерного топлива из водно-органических нитратных растворов [1], включающих органический компонент (спирты, кетоны). В результате расчетов определены составы растворов ВОНР на основе этанола (ацетона), имеющие $T_{ад} \geq 1500$ К и обеспечивающие синтез в воздушной плазме ТОК «UO₂-ThO₂-MgO/Al₂O₃» при $\alpha = UO_2/(UO_2+ThO_2) = 0,5-0,7$. В ходе экспериментов установлено, что плазменная переработка растворов ВОНР на основе ацетона, включающих неодим (вместо урана), церий (вместо тория) и магний, приводят к образованию модельных оксидных композиций «Nd₂O₃-Ce₂O₃-MgO», в которых увеличение массовой доли MgO с 10 до 30 % ведет (при $\alpha = 0,5$) к снижению размера частиц в водных суспензиях (D_{50}) с 9,8 до 9,3 мкм, увеличению удельной поверхности полученных порошков ($S_{уд}$) с 13,1 до 16,4 м²/г и снижению размера кристаллитов в их составе с 68 до 65 нм, а при $\alpha = 0,7$ – к снижению D_{50} с 9,3 до 8,1 мкм, увеличению $S_{уд}$ с 13,9 до 16,8 м²/г и снижению размера кристаллитов в их составе с 69 до 58 нм. Результаты исследований будут использованы при создании технологии плазмохимического синтеза наноструктурных ТОК для уран-ториевого толерантного ядерного топлива.

Список использованной литературы

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

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ТОПЛИВНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ТОЛЕРАНТНОГО МОХ-ТОПЛИВА

Расторгуев В.И., Новоселов И.Ю.

*Научный руководитель: Каренгин А.Г., к.ф.-м.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: vir12@tpu.ru*

Использование изотопов уран-238 и плутоний-239 из ОЯТ для изготовления МОХ-топлива не потребует изотопного обогащения, но у него остается недостаток – низкая теплопроводность. Перспективным является плазмохимический синтез топливных оксидных композиций (ТОК) для толерантного МОХ-топлива из водно-органических нитратных растворов, включающих органический компонент (спирты, кетоны). В результате расчетов определены составы растворов ВОНР на основе этанола (ацетона), имеющие $T_{ад} \geq 1500\text{K}$ и обеспечивающие синтез в воздушной плазме ТОК « $\text{UO}_2\text{-PuO}_2\text{-MgO/Y}_2\text{O}_3$ » при $\alpha = \text{PuO}_2/(\text{UO}_2 + \text{PuO}_2) = 0,1\text{--}0,3$. В ходе экспериментов установлено, что воздушно-плазменная переработка растворов ВОНР на основе ацетона, включающих неодим (вместо урана), самарий (вместо плутония) и магний (иттрий), приводит к образованию ОК « $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Sm}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ » и « $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Sm}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ », в которых увеличение массовой доли MgO с 5 до 50 % ведет (при $\alpha = 0,1$) к снижению размера частиц в водных суспензиях (D_{50}) с 13,5 до 4,3 мкм, увеличению удельной поверхности полученных порошков ($S_{уд}$) с 7,9 до 16,2 м²/г и снижению размера кристаллитов в их составе с 94 до 52 нм, а увеличение массовой доли матрицы (Y_2O_3) с 10 до 30 % ведет (при $\alpha = 0,1$) к снижению размера частиц D_{50} с 12,1 до 11,2 мкм, увеличению $S_{уд}$ полученных порошков с 5,5 до 7,8 м²/г и снижению размера кристаллитов в их составе с 147 до 115 нм. Результаты исследований будут использованы при создании технологии плазмохимического синтеза наноструктурных ТОК для толерантного МОХ-топлива.

Список использованной литературы

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, – 2015. – 248 с.
2. Shamanin I.V., Karengin A.G., Karengin A.A., Novoselov I.Y. Plasma-chemical synthesis and investigation of nano-size oxide compositions simulating uranium-thorium dispersion nuclear fuel // Atomic Energy. – 2021. – Vol. 131. – № 1. – P. 46–49.

ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

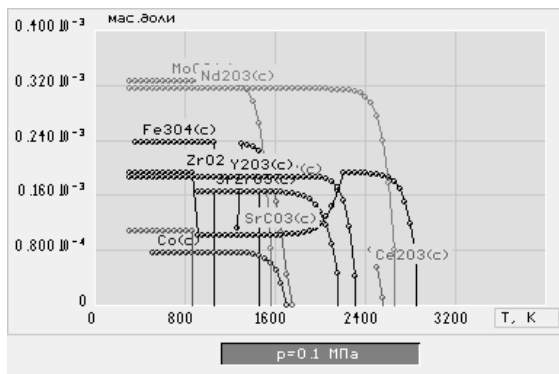
Туксов И.В.

*Научный руководитель: Каренгин А.Г., к.ф.-м.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: Whirpool94@yandex.ru*

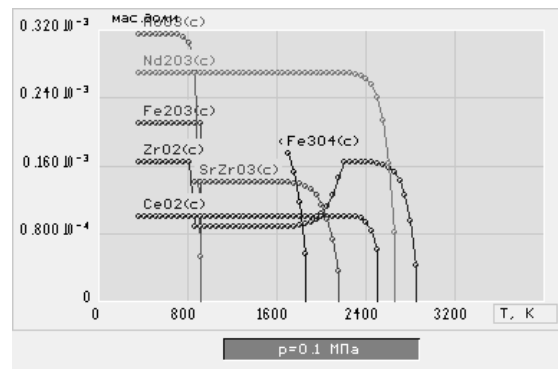
Оставшиеся без урана и плутония отходы переработки ОЯТ имеют следующий состав: 0,11 % Nd, 0,10 % Mo, 0,07 % Fe, 0,06 % Y, 0,058 % Zr, 0,04 % Na, 0,039 % Ce, 0,036 % Cs, 0,031 % Co, 0,026 % Sr, 18,00 % HNO_3 , H_2O – остальное.

По действующей схеме ОП ОЯТ концентрируют путем выпаривания, закачивают в баки и опрavlяют на длительное хранение. Перспективным является их переработка в воздушной плазме в виде водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны) и имеющих $T_{\text{ад}} \approx 1500\text{K}$.

На рисунке представлены характерные равновесные составы основных продуктов плазменной утилизации ОП ОЯТ в виде растворов ВОНР на основе ацетона при массовой доле воздушного плазменного теплоносителя 65 % (а) и 70 % (б).



а)



б)

Из анализа следует, что плазменная утилизация ОП ОЯТ приводит к образованию оксидов металлов в конденсированных фазах, включая магнитный оксид железа $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{с})$ при доле воздуха 65 % (а) и немагнитный оксид железа $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{с})$ при 70 % (б).

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании технологии плазменной утилизации ОП ОЯТ и других жидких радиоактивных отходов.

Список использованной литературы

1. Каренгин А.Г., Подгорная О.Д., Шлотгауэр Е.Э. Плазменная утилизация и иммобилизация отходов переработки отработавшего ядерного топлива // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 2. – С. 21–28.

2. Karengin A.G., Karengin A.A., Novoselov I. Yu., Tundeshev N.V. Calculation and Optimization of Plasma Utilization Process of Inflammable Wastes after Spent Nuclear Fuel Recycling // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 433–436.

AIR-PLASMA DISPOSAL OF SPENT NUCLEAR FUEL REPROCESSING WASTE

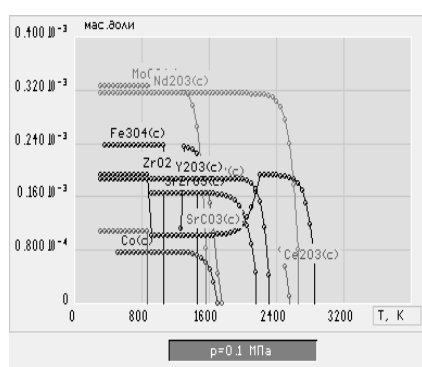
Ghoneim Y.

Scientific advisor: PhD Karengin A.G.

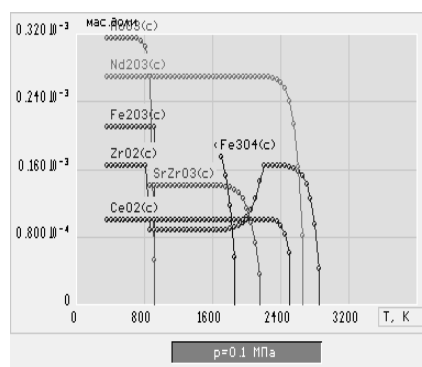
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin Ave, 30

E-mail: youmnasami24@gmail.com

Reprocessing of spent nuclear fuel after the extraction cycle produces reprocessing waste (RW SNF) in the form of an aqueous nitrate solution (raffinate) with the following composition: 18,00 % HNO₃, 0,07 % Fe, 0,11 % Nd, 0,10 % Mo, 0,06 % Y, 0,058 % Zr, 0,04 % Na, 0,039 % Ce, 0,036 % Cs, 0,031 % Co, 0,026 % Sr, remaining– H₂O. According to available technology, the RW SNF is concentrated by evaporation, filled into stainless steel tanks and sent to long-term storage that does not offer reuse of precious metals.



a)



b)

It has been proposed to treat RW SNF in the form of a water-organic nitrate dispersion solution containing organic components (alcohols, ketones) and having an adiabatic combustion temperature (T_{ad}) of at least 1500 K in

an air plasma stream. Characteristic equilibrium composition of the main products of air plasma treatment of RW-SNF in the form of a solution of WONC-1 ($T_{ad} \approx 1500$ K) based on acetone (65 % RW-SNF): 35 % Estone) with air mass fractions of 65 % (a) and 70 % (b)) are shown in Figure.

Air plasma utilization of RW SNF in the form of WONC-1 solution results in the formation of oxides of various metals, including magnetic iron oxide (Fe_3O_4) in the condensed phase, increasing the air mass fraction from 65 to 70 %.

МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ МЕТАЛЛОВ

Каренгин А.А.¹

Научный руководитель: Каренгин А.Г.², к.ф.-м.н., доцент

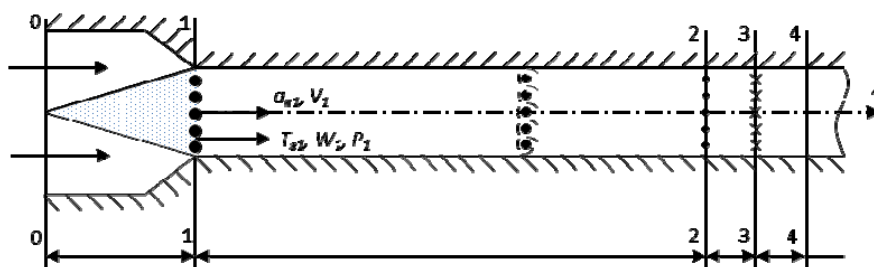
¹*АО «Сибирский химический комбинат»,
636039, Россия, г. Северск, ул. Курчатова, 1*

²*Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30*

E-mail: karenginaleksey@gmail.com

Для атомной энергетики приоритетным является создание устойчивого к авариям толерантного ядерного топлива из оксидов делящихся металлов, равномерно распределенных в оксидной матрице, имеющей высокую теплопроводность и малое поперечное сечение захвата нейтронов [1].

Синтез топливных оксидных композиций в воздушно-плазменном потоке из диспергированных водно-органических нитратных растворов, включающих спирты (кетоны), водные нитратные растворы делящихся и матричных металлов, обеспечивает одностадийность, высокую скорость, равномерное распределение и требуемый состав фаз, низкие энергозатраты [2]. На рисунке представлена схема процесса плазмохимического синтеза ТОК в воздушно-плазменном потоке из диспергированных растворов ВОНР.



Из анализа взаимодействия капель растворов ВОНР с воздушно-плазменным потоком показано, что при температурах $T \geq 1500$ К испарение растворителя (1–2) является лимитирующей стадией.

В результате проведенных расчетов установлено влияние начальных параметров воздушно-плазменного потока (температура, скорость), капле (размер, скорость) и массового отношения фаз на кинетику испарения капель и определены оптимальные режимы проведения исследуемого процесса в реакторе.

Результаты исследований могут быть использованы при создании технологии плазмохимического синтеза топливных оксидных композиций для различных типов ядерного топлива.

Список использованной литературы

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248.
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.

ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННАЯ УТИЛИЗАЦИЯ РАФИНАТОВ ПОСЛЕ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Белозеров Н.А.

*Научный руководитель: Каренгин А.Г., к.ф.-м.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: nab38@tpu.ru*

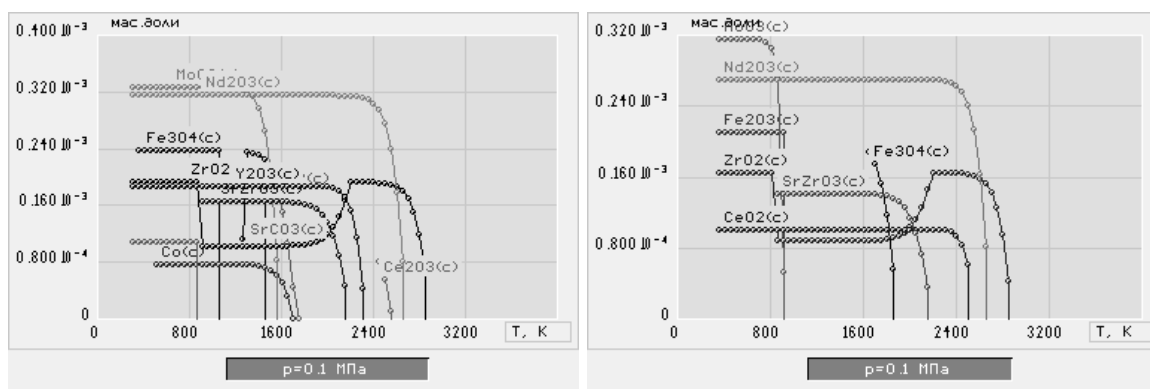
Россия первой в мире приступила к созданию замкнутого ядерного топливного цикла, который включает: переработку отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), извлечение из ОЯТ изотопов урана-235, урана-238 и плутония-239; производство на их основе МОХ-топлива или REMIX-топлива. Однако в процессе переработки ОЯТ образуются неорганические отходы переработки ОЯТ (рафинаты) в виде водных нитратных растворов, включающих продукты деления урана-235 и конструкционные материалы, эффективных технологий переработки которых до сих пор нет.

Перспективным является процесс воздушно-плазменной утилизации рафинатов в виде оптимальных по составу водно-органических нитратных растворов, включающих рафинаты и органический компонент [1].

По результатам теплотехнических расчетов установлены закономерности влияния содержания органического компонента (этанол, аце-

тон) на показатели горючести водно-органических нитратных растворов и определены составы растворов ВОНР, имеющих $T_{ад} \approx 1500\text{K}$ и обеспечивающих их энергоэффективную утилизацию.

На рисунке представлены характерные равновесные составы основных продуктов плазменной утилизации рафинатов в виде растворов ВОНР на основе ацетона при массовой доле воздушного плазменного теплоносителя 65 % (а) и 70 % (б).



а)

б)

По результатам термодинамических расчетов установлены закономерности влияния массовой доли воздуха на состав образующихся продуктов воздушно-плазменной утилизации растворов ВОНР и определены условия, обеспечивающие их экологически безопасную утилизацию.

Список использованной литературы

1. Каренгин А.Г., Подгорная О.Д., Шлотгауэр Е.Э. Плазменная утилизация и иммобилизация отходов переработки отработавшего ядерного топлива // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 2. – С. 21–28.

ВОДУШНО-ПЛАЗМЕННАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ИЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БАССЕЙНОВ-ХРАНИЛИЩ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Помесячная Е.Д.

*Научный руководитель: Каренгин А.Г., к.ф.-м.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: edp8@tpu.ru*

В бассейнах-хранилищах предприятий ЯТЦ накоплены иловые отложения (ИЛО) жидких радиоактивных отходов, 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]. Применяемые химические, сорбционные, электрохимические способы и механическая классификация с отделением фракций для утилизации ИЛО с наибольшим содержанием радионуклидов многостадийны и требуют значительных энергозатрат [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]. Их недостатками являются низкая эффективность, многостадийность и высокая стоимость. Существенное снижение затрат может быть достигнуто при плазмохимической переработке ИЛО в виде оптимальных по составу ило-органических суспензий (ИЛОС), имеющих адиабатическую температуру горения не менее 1500 К [3]. 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 (SiO_2 , Al_2O_3 , ZnO , MnO , Cr_2O_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 ИЛОС (15,5 % ДТ : 44,5 % Вода : 40 % ИЛО); массовое отношение фаз (70 % воздух : 18 % ИЛОС-1); температура (1500±200) К. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании энергоэффективной технологии воздушно-плазменной утилизации ИЛО ЖРО.

Список использованной 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. A.G., Karengin A.A., Novoselov I. Yu., Tundeshev N.V. Calculation and Optimization of Plasma Utilization Process of Inflammable Wastes after Spent Nuclear Fuel Recycling // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 433–436.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОЙ УТИЛИЗАЦИИ ХЛОРСОДЕРЖАЩИХ ОТРАБОТАННЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ

Кузнецов С.Ю.

*Научный руководитель: Каренгин А.Г., к.ф.-м.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: syk13@tpu.ru*

Уникальные технологические свойства хлорсодержащих трансформаторных масел (ХТМ), включающих полихлорированные бифенилы (теплофизические и электроизоляционные характеристики, термостойкость, химическая инертность и др.) и огромные объемы производства привели к глобальному распространению и загрязнению.

Традиционные методы утилизации и обезвреживания таких отходов (в основном, термические) многостадийны, требуют больших энергозатрат и приводят к образованию токсичных соединений [1].

Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является утилизация отработанных ХТМ в воздушно-плазменном потоке в виде диспергированных водно-солеорганических композиций, включающих отработанные ХТМ, металлсодержащие отходы подготовки питьевой воды из подземных источников и б/у легковоспламеняющиеся жидкости [2].

В работе представлены результаты термодинамических расчетов процесса, определены составы ВСОК и режимы их переработки, обеспечивающие в воздушно-плазменном потоке их энергоэффективную утилизацию.

Результаты исследований могут быть использованы при создании энергоэффективной технологии воздушно-плазменной утилизации хлорсодержащих отработанных трансформаторных масел.

Список использованной литературы

1. Боярский В.П., Хайбулова Т.Ш., Горбунова Т.И. Способ химической переработки полихлорированных бифенилов. Патент РФ, Опубликовано 23.06.2017, Бюл. № 18.

2. Karengin A.G., Karengin A.A., Kuznetsov S.Yu., Novoselov I.Yu., et al. Plasma-chemical synthesis of nanostructured oxide compounds for accident tolerant fuel // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 65. – № 4. – P. 677–872.

Секция 3

**СВОЙСТВА, ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ
ИЗОТОПНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

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

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАММА-КОМПЛЕКСА «РАДИАН»

Чуринова П.А., Кузьменко А.С., Волков М.И.

*Научный руководитель: Тимченко С.Н., к.т.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: расб@tpu.ru*

Для исследования радиационной стойкости электронных компонент важно иметь инструмент моделирования поля ионизирующего излучения для точного определения получаемой поглощенной дозы исследуемых образцов.

При создании системы моделирования поля излучения гамма-комплексе «Радиан» использовался пакет GEANT4 [1]. В процессе разработки системы описаны геометрические параметры установки и параметры источника излучения, в качестве которого используется изотоп ^{60}Co . Моделирование проведено методом Монте-Карло при условии постоянной активности источника излучения. Результаты моделирования хорошо коррелируют с экспериментальными данными. Вдоль геометрической оси пучка гамма-излучения относительная погрешность составила до 10 %. Разработанная система моделирования состоит из модуля моделирования в GEANT4 [1], базы данных и веб-приложения. Система предоставляется в контейнерах Docker [2], что позволяет использовать систему как в операционной системе Windows, так и в дистрибутивах Linux. В веб-приложении отображаются результаты в виде графиков и таблиц и задается конфигурация моделирования.

Список использованной литературы

1. Agostinelli S. et al. Geant4 – a simulation toolkit. NIM A (2003). Vol. 506, № 3. – 250 p.
2. Docker [Электронный ресурс], – Режим доступа: <https://www.docker.com/> (дата обращения 09.10.2023).

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МИШЕНИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИЦИНСКИХ РАДИОИЗОТОПОВ СКАНДИЯ НА ЦИКЛОТРОНЕ УРФУ

Темляков А.К.¹, Гадельшин М.Ш.¹, Гадельшин В.М.^{1,2}

Научный руководитель: Гадельшин В.М.^{1,2}

¹ *Физико-технологический институт,*

Уральский федеральный университет,

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

² *Институт промышленной экологии УрО РАН,*

620990, Россия, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20

E-mail: arsteml@mail.ru

Диагностика и терапия онкологических заболеваний являются ключевыми направлениями ядерной медицины. Она основана на применении радиофармпрепаратов (РФП) – химических веществ, соединяющих в себе молекулу-носитель и радионуклид, в ходе распада которого становится возможной визуализация структуры и функций внутренних органов или уничтожение в них раковых клеток. Большинство используемых радионуклидов обладают коротким периодом полураспада: они не встречаются в природе, однако могут быть получены искусственным путём через ядерные реакции.

Наибольшее внимание сегодня уделяется тераностикам – комбинациям терапевтических и диагностических РФП, имеющих одинаковую молекулу-носитель для достижения максимальной точности и эффективности лечения. Реализация такого подхода требует, чтобы действующие радионуклиды обладали схожими или идентичными химическими свойствами, как, например, изотопы одного и того же химического элемента. Так, изотопы скандия Sc-43 и Sc-44 могут применяться в диагностических целях, а Sc-47 – в терапевтических.

Характеристики циклотрона УрФУ (TR-24) позволяют организовать производство радионуклидов скандия. Облучая титановую мишень, можно наработать сразу все три изотопа, извлекаемых в дальнейшем с помощью технологий разделения изотопов. Доклад повествует о процессе изготовления мишени методом диффузионного спекания порошка природного титана. Пористая структура мишени должна обеспечить более высокий выход радионуклидов в процессе разделения.

ПОИСК ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА ИЗОТОПА ZR-96 НА ВОЗБУЖДЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОТОПА MO-96

Хусаинов Т.К.

*Научный руководитель: Якушев Е.А., д.ф.-м.н.
Объединенный институт ядерных исследований,
141980, Россия, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6
E-mail: khusainov@jinr.ru*

Двойным бета-распадом называют процесс одновременного превращения двух нейтронов ядра в протоны с испусканием сразу двух электронов и антинейтрино (в Стандартной модели). Он возможен для малого числа четно-четных ядер, в их числе исследуемый в эксперименте, проводимом ЛЯП ОИЯИ изотоп ^{96}Zr .

Целью эксперимента является первое экспериментальное обнаружение двойного бета-распада ^{96}Zr на возбужденный уровень 0^+ ядра ^{96}Mo посредством детектирования сопутствующих гамма-квантов энергией 370 и 778 кэВ, определение периода полураспада для данной моды распада, что позволит рассчитать матричные элементы для уточнения существующих теоретических моделей расчета вероятности двойного бета-распада.

В эксперименте NEMO-3 [1] определены: период полураспада для ^{96}Zr на основное состояние $T_{\frac{1}{2}}(\text{g.s.})=2.35\pm 0.21\times 10^{19}$ лет и поставлены

ограничения для периодов полураспада на возбужденное состояние 0^+ $T_{\frac{1}{2}}(0^+)>5.85\times 10^{19}$ лет и безнейтринной моды $T_{\frac{1}{2}}(0\nu\beta\beta)>9.2\times 10^{21}$ лет.

В эксперименте [2] также получены ограничения на период полураспада на возбужденное состояние 0^+ $T_{\frac{1}{2}}(0^+)>3.1\times 10^{20}$ лет.

На данный момент в ЛЯП ОИЯИ поставлен уникальный образец циркония массой 203.2 г, обогащенный по изотопу ^{96}Zr до 88.18 % (масса изотопа 179.2 г) газоцентрифужным методом на АО «ПО «ЭХЗ». Собрана низкофоновая экспериментальная установка, проведено ее Монте-Карло моделирование в Geant4 и определены эффективности детекторов установки в областях интереса. Измерены фоновые условия, а также проведены измерения циркония продолжительностью 10 суток по результатам которых можно судить о радиоактивной незагрязненности образца. Планируются транспортировка и дальнейшие измерения образца на площадке Баксанской нейтринной обсерватории по причине лучших фоновых условий в БНО.

Список использованной литературы

1. Thibaud Le Noblet – Latest results from NEMO-3 and commissioning status of the SuperNEMO demonstrator – TAUP 2017
2. S.W. Finch and W. Tornow – Search for two-neutrino double- β decay of ^{96}Zr to excited states of ^{96}Mo – PHYSICAL REVIEW C 92, 045501 (2015)

МЕТОД ПАСПОРТИЗАЦИИ ОДНОРОДНОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КРУПНОБЛОЧНЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ С ПОМОЩЬЮ РАДИОАКТИВНОГО ИСТОЧНИКА

Неволин Н.Р.

*Научный руководитель: Гоголев А.С., к.ф.-м.н.
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: nrn5@tpu.ru*

В астрофизике большую роль играют наземные телескопы для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) высоких и сверхвысоких энергий. Для понимания природы источников космических лучей (КЛ) высоких энергий необходимо изучение энергетического спектра космических лучей вблизи Земли. В качестве детекторов телескопов, как правило, применяются крупноблочные сцинтилляционные детекторы с площадью регистрации 1 м^2 и более, а общая площадь телескопа может достигать тысячи м^2 . Для того чтобы измерить энергию КЛ, необходимо измерить с хорошей точностью количество зарегистрированных частиц в каждом детекторе телескопа. Это накладывает высокие требования на однородность чувствительности детектора по площади.

Для того чтобы определить однородность чувствительности детектора, необходимо экспериментально измерить «отклик» детектора на космический мюон (главная составляющая ШАЛ) по площади с шагом $\leq 10 \text{ см}$. Это составит порядка 80 точек на 1 м^2 . Как правило, такая задача решается с помощью триггерных сцинтилляционных детекторов мюонов с площадью $10 \times 10 \text{ см}$. Учитывая низкую интенсивность космических мюонов на уровне моря, длительность сканирования по площади одного детектора может составить > 46 часов. Предлагается новый счетный метод тестирования однородности чувствительности сцинтилляторов площадью $\geq 1 \text{ м}^2$. Для реализации метода, использован источник альфа-частиц и γ – квантов изотоп ^{232}Th . ^{232}Th из всех долгоживущих радиоактивных изотопов испускает γ – кванты самых больших энергий, вплоть до энергии $E_\gamma = 2.615 \text{ МэВ}$. Кроме того, γ – кванты с энергией

$E_\gamma = 2.615$ МэВ коррелированы во времени с γ – квантами с энергией $E_\gamma = 0.583$ МэВ, т. е. они возникают в каскаде при β^- – распаде ^{208}Tl в ^{208}Pb . Этот факт позволяет дополнительно использовать метод совпадений. Приведены результаты тестирования различных сцинтилляционных детекторов с применением метода совпадений и прямого счетного метода.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ТСХ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОХИМИЧЕСКОЙ ЧИСТОТЫ
РАДИОФАРМПРЕПАРАТА НА ОСНОВЕ ПРОСТАТ-СПЕЦИФИЧЕСКОГО
МЕМБРАННОГО АНТИГЕНА (PSMA), МЕЧЕННОГО ИЗОТОПОМ $^{99\text{m}}\text{Tc}$**

Клименко Ю.Д., Шелихова Е.А.

*Научный руководитель: Стасюк Е.С.
старший научный сотрудник, к.т.н.
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: yuliaklim1207@mail.ru*

Высокие показатели заболеваемости раком предстательной железы (РПЖ) – являются серьезной проблемой, поэтому ранняя диагностика первичной опухоли является актуальной задачей современной медицины. Простат специфический мембранный антиген (PSMA) высоко экспрессируется во всех типах рака предстательной железы, что делает PSMA потенциальной молекулярной мишенью для выявления локализованного и метастатического рака предстательной железы. На данный момент изотоп $^{99\text{m}}\text{Tc}$ является наиболее доступным диагностическим радионуклидом, поэтому радиофармпрепарат (РФП) на основе PSMA, меченного изотопом $^{99\text{m}}\text{Tc}$, представляет собой перспективный и надежный метод диагностики РПЖ.

Одной из основных характеристик качества любого радиофармпрепарата является его радиохимическая чистота (РХЧ). Для определения РХЧ чаще всего применяют методы тонкослойной хроматографии (ТСХ) на пластинах силикагеля. Скорость движения различных химических форм радионуклида относительно неподвижной фазы оказывается различной, и за счет этого происходит разделение примесей и основной формы РФП.

Целью работы на первом этапе было проведение исследования по подбору подходящих хроматографических сред для определения РХЧ радиофармпрепарата PSMA-HYNIC- $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Основным критерием в выборе хроматографических сред являлась возможность разделения двух основных примесей, образующихся при синтезе РФП. Это не восстановленный и не вступивший в реакцию комплексообразования пертех-

нетат натрия ($\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$) и гидролизированный восстановленный технеций-99м (ГВТ).

Второй этап работы включал в себя исследования по определению РХЧ препарата PSMA-HYNIC- $^{99\text{m}}\text{Tc}$ в зависимости от температуры и времени инкубации при синтезе препарата.

В результате проведенных исследований разработана методика, которая позволяет с применением двух хроматографических сред сделать точную оценку содержания в полученном РФП радиохимических примесей не восстановленного $^{99\text{m}}\text{Tc(VII)}$ и гидролизованного оксида $^{99\text{m}}\text{TcO}_2$, методом тонкослойной хроматографии. Также найдены оптимальные условия инкубации при синтезе препарата PSMA-HYNIC- $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ И НАВЕДЕННОЙ АКТИВНОСТИ В ПАКЕТЕ GEANT4

Кузьменко А.С.¹

*Научные руководители: Жемчугов А.С.², к.ф.-м.н., зам. начальника
отдела ЛЯП, Тимченко С.Н.¹, к.т.н., доцент*

*¹Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр.Ленина, 30*

*²Объединенный институт ядерных исследований,
141980, Россия, г. Дубна, ул.Жолио-Кюри, 6*

E-mail: ask147@tpu.ru

Расчет защиты от ионизирующих излучений является необходимой частью при проектировании различных установок с источником излучения. Существующие методы расчета предназначены, как правило, для ядерной энергетики, где энергии излучения значительно ниже энергий, достигаемых в ускорительных техниках. Одним из программных средств, позволяющим моделировать высокоэнергичные частицы в условии сложной геометрии установки, является пакет GEANT4 [1], однако, в нем отсутствуют встроенные методы для определения эффективной дозы и наведенной активности. Разработанное программное обеспечение с использованием пакета GEANT4 [1] позволяет провести моделирование распределения в пространстве эффективной дозы и наведенной активности.

Моделирование эффективной дозы проведено по коэффициентам перевода флюенса частиц в эффективную дозу по данным [2], которые содержат коэффициенты вплоть до 10 ГэВ. Верификация моделирования дозы проведена по аналитическому расчету по гамма постоянной распада изотропного источника Co^{60} в воздухе. Получено хорошее согласие результатов моделирования и аналитического расчета.

С помощью встроенных методов GEANT4 [1] реализован вывод данных для определения наведенной активности: количества образованных радионуклидов, названия радионуклида, процессе образования и среднего времени жизни в секундах. Из полученных данных рассчитывается наведенная активность по закону радиоактивного распада. Верификация выполнена сравнением результатов моделирования и расчета для реакции радиационного захвата при получении Mo^{99} в ядерных реакторах. Эффективные сечения реакции взяты из базы данных ENDF-VIII.0 [3]. Полученные результаты моделирования наведенной активности при энергиях нейтронов 0,1, 0,5 и 1 МэВ не превышают 5 % отклонение от аналитического расчета.

Список использованной литературы

1. Agostinelli S. et al. Geant4 – a simulation toolkit. NIM A (2003). Vol. 506, № 3, p.250.
2. ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116. Ann. ICRP 40(2–5).
3. Evaluated Nuclear Data File (ENDF) // Nuclear Data Services URL: <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm> (дата обращения: 25.10.2023).

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА НАНОЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Евстратенко А.С., Огородников С.А., Атутова Я.Е.

*Научный руководитель: Мышкин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор ТПУ
Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: ase35@tpu.ru*

Лазеры используются при сварке или резке деталей, очистке поверхности. При этом образуется облако пара, из которого формируются наночастицы. Образующееся облако экранирует излучение, что уменьшает эффективность лазерной обработки. Ослабляющая способность аэрозоля зависит от размеров частиц. Поэтому актуальна задача контроля размеров наночастиц. Из-за коагуляции, для наночастиц перспективны безотборные методы.

Методы лазерной диагностики аэрозолей содержат 3 группы, отличающиеся диапазоном определяемых размеров. Для исследования наночастиц используется метод спектральной прозрачности (МСП), в котором регистрируется коэффициент пропускания. Дисперсность аэрозоля определяют из решения обратной задачи, с использованием спектра коэффициентов пропускания.

Для МСП наиболее хорошо подходит «белый» лазер, генерирующий излучение широкого спектра. Иногда используют тепловые излучатели. Более перспективно использование светодиодов (СИД) белого света, в котором синее излучение преобразуется в длинноволновую полосу в слое люминофора, нанесенного на кристалл.

При лазерной абляции с помощью коммерческих лазеров испаряется небольшое количество вещества. Поэтому важно оптимизировать конструкции осветительного и приемного узлов, системы стабилизации в пространстве потока аэрозоля. В нашей установке формируется поток аэрозоля за счет тангенциальной закрутки потока Ar, подаваемого в нижнюю часть открытого с верхней стороны цилиндра. Лазерный луч фокусируется на мишень, находящейся в периферийной области на дне цилиндра. В результате образующиеся из паров материала мишени аэрозольные частицы затягиваются в центральную область цилиндра и формируют пространственно ограниченный поток.

Поток зондирующего формируется, в виде изображения СИД, на аэрозольный поток, диаметр которого на 1–2 мм превышает размер изображения СИД. После аэрозоля луч СИД фокусируется на входной торец световода спектрометра SL140, интегрированного с ПК. При абляции с помощью использованного лазера испаряется малое количество вещества. Для уменьшения посторонней засветки от дневного света, канал зондирующего оптического излучения размещался в зачерненном изнутри трубе.

В докладе приводятся спектры пропускания и функция распределения аэрозольных частиц по размерам, полученным по экспериментальным данным.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ НАНОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

Евстратенко А.С., Огородников С.А.

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

Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: ase35@tpu.ru

Нанопорошки, получаемые с помощью плазменных технологий, широко используются при производстве керамики, композиционных материалов, высокоэнтальпийных систем, сверхпроводников, пигментов, высокопрочных припоев. Перспективы использования нанопорошков связаны с их уникальными свойствами, связанные с технологией их получения: малая температура спекания; электрофизические свойства при низких температурах; возможность самовоспламенения при контак-

те с воздухом; высокое поглощение электромагнитного излучения в широком диапазоне спектра; высокая химическая активность; низкая работа выхода. Эти свойства определяются размерами наночастиц. Поэтому необходимы методы контроля размеров наночастиц. Из-за малых размеров частиц, нанопорошки имеют высокую склонность к слипанию. Поэтому для контроля наночастиц необходимы безотборные методы.

Безотборные методы анализа аэрозолей связаны с анализом изображений (прямые методы) и лазерные методы, приводящие к решению обратной задачи. При этом прямые методы, использующие излучение видимого диапазона, не позволяют регистрировать наночастицы.

Лазерные методы условно можно разделить на три группы. Для диагностики дисперсных частиц нанометрового диапазона приемлем метод спектральной прозрачности (МСП), в котором с помощью спектра пропускания взвеси нанопорошка решают интегральное уравнение. Наиболее хорошим источником излучения для МСП является «белый» лазер, генерирующий излучение широкого спектра. При этом можно формировать зондирующий луч любой заданной геометрии.

Также можно использовать светоизлучающие диоды белого света. При этом приходится решать задачу уменьшения потока излучения, несущего информацию о спектре размеров порошка, например, за счет использования пучка зондирующего излучения, диаметр которого меньше размеров аэрозольного образования. Также следует принимать меры к отсечке дневного света. Необходимо помнить, что при всех схемах освещения аэрозоля необходимо принимать меры к пространственному концентрированию аэрозольных частиц. Одним из подходов является тангенциальная подача газа, перемещающего наночастицы.

В докладе рассматриваются различные технические решения схем освещения аэрозоля и регистрации прошедшего излучения, приводящие увеличению «сигнала» относительно «шума». Анализируются преимущества и недостатки различных схем.

СПЕКТРЫ ИК И КРС ОБРАЗЦОВ ИЗОТОПНО ОБОГАЩЕННЫХ SiO₂

Шумовская К.Ф.¹, Комшина М.Е.^{1,2}

Научный руководитель: Буланов А.Д.^{1,2}, д.х.н., чл.-корр. РАН

*¹Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых
Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия*

*²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия*

E-mail: k.shumovskaya@yandex.ru

Диоксид кремния (IV) обладает набором уникальных физико-химических свойств, благодаря которым материалы на его основе находят широкое применение в различных областях науки и техники. Высокий интерес к изучению изотопных разновидностей простых и сложных веществ обусловлен отличием свойств от материалов с естественным изотопным составом. Однако, несмотря на большой массив литературных данных о SiO₂, информация о влиянии изотопного состава на его свойства довольно ограничена. В связи с этим, актуальной задачей является получение и изучение свойств диоксида кремния с высокой изотопной чистотой.

В рамках данной работы из образцов кремния ²⁸Si, ²⁹Si и ³⁰Si (степень обогащения по основному изотопу Si от 99.9980±0.0010 до 99.29±0.01 ат.%) и смеси ²⁸Si и ³⁰Si с содержанием ²⁸Si 75, 50, 25 % в несколько стадий получен аморфный и кристаллический диоксид кремния.

Для всех образцов SiO₂ охарактеризован изотопный и примесный элементный состав методом МС-ИСП, по данным которого на стадиях синтеза прослеживается незначительное изотопное разбавление. Согласно данным РФА, кристаллический SiO₂ представляет собой низкотемпературную модификацию α-кварц (пр. гр. P3₁21, ICSD 27745). На изображениях, полученных методом сканирующей электронной микроскопии, четко определены кристаллы размером порядка 2 мкм, имеющие типичную для кварца огранку. Метод дифференциальной сканирующей калориметрии также показал, что в области 572 К образцы претерпевают превращение α-β кварц. Аморфные образцы не имели каких-либо эффектов на кривой ДСК, а на рентгенограммах наблюдалось гало без признаков кристаллических включений.

Записаны спектры поглощения всех полученных образцов на спектрометре IFS-113 ("Bruker") в области 330–7000 см⁻¹ с разрешением 1 см⁻¹. Для кристаллического также получены спектры комбинационного рассеяния света на комплексе NTEGRA Spectra производства NT-MDT в диапазоне 2–1400 см⁻¹ с разрешением 0.9 см⁻¹ с примени-

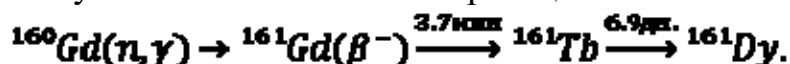
ем лазера с длиной волны 473 нм. В спектрах наблюдается сдвиг известных полос поглощения валентных и деформационных колебаний для изотопов кремния в низкочастотную область с увеличением массы изотопа. Следует отметить, на зависимости частоты колебаний от обратной величины приведенной массы для моноизотопных образцов SiO₂ наблюдается линейная зависимость, а для смеси изотопов ²⁸Si и ³⁰Si параболическое отклонение от нее.

РАСЧЕТ НАРАБОТКИ ТЕРБИЯ-161 НА РЕАКТОРЕ ИРТ-Т

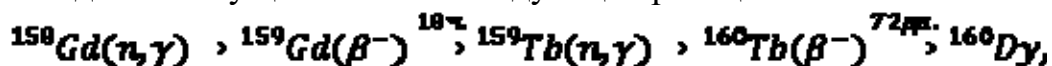
Ушаков И.А., Зукау В.В., Доняева Е.С.

*Научный руководитель: Тимченко С.Н. к.т.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: jiaozi@tpu.ru*

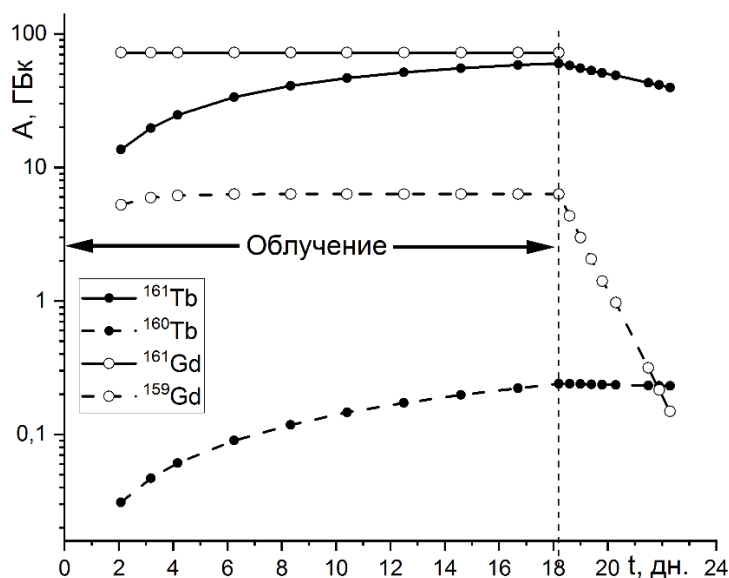
Одним из нуклидов для таргетной радионуклидной терапии является тербий-161, преимущество которого заключается в образовании терраностической пары с ПЭТ-изотопом ¹⁵²Tb и ОФЭКТ-изотопом ¹⁵⁵Tb, что позволяет точнее оценивать терапевтическую дозу. Тербий-161 (T_{1/2} = 6,948 дн.) является мягким β-эмиттером с пробегом β-частиц в клетке 0,27 мм. Целью работы является обоснование возможности выделения радионуклида ¹⁶¹Tb из гадолиниевой мишени в активной зоне реактора ИРТ-Т путем нейтронного облучения гадолиниевой мишени, обогащенной по ¹⁶⁰Gd при помощи теоретических расчетов наработки и пробного облучения изотопа ¹⁶⁰Gd по реакции:



Для получения высоких удельных активностей ¹⁶¹Tb (теоретическая удельная активность составляет ~ 4.32 ТБк/мг), особое внимание должно быть уделено количеству тербия в мишени, а также количества стабильного нуклида ¹⁵⁸Gd из которого образуется стабильный нуклид ¹⁵⁹Tb и долгоживущий ¹⁶¹Tb по следующей реакции:



Расчет и вычисление наработки активности ¹⁶¹Tb производился по нейтронному спектру, содержащем 200 групп, центрального экспериментального канала ЦК-1 реактора ИРТ Т с учетом самопоглощения излучения и выгорания образующихся радионуклидов. Ядерно-физическая модель состоит из ячейки с облучаемой гадолиниевой мишенью и источника с заданным спектром вокруг ячейки. Теоретически нарабатываемая активность тербия и гадолиния представлена на рисунке:



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫДЕЛЕНИЯ LU-177 ИЗ ИТТЕРБИЕВОЙ МИШЕНИ

Ушаков И.А., Демидов В.А., Зукау В.В.

Научный руководитель: Тимченко С.Н. к.т.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: jiaozu@tpu.ru

Лютеций-177 является одним из перспективных радионуклидов, применяемых в радиотерапии. Получение данного радионуклида без носителя является длительным процессом, в ходе которого проводится работа с радиоактивными растворами [1]. Для контроля параметров получения лютеция-177 и в целях снижения дозовой нагрузки на персонал, используется автоматизация технического процесса. Целью работы является разработка системы автоматизации процесса радиохимического выделения изотопа лютеция-177 без носителя.

Процесс получения лютеция-177 без носителя основан на хроматографическом выделении ^{177}Lu из иттербиевой мишени с последующей его концентрацией. Хроматографическое разделение выполнено на ионообменной колонке, заполненной катионообменником Dowex 50WX8, 200–400 меш. ^{177}Lu возможно контролировать по гамма излучению по линиям 113 кэВ и 208 кэВ с выходом 6,4 % и 11 % соответственно. Пик иттербия возможно контролировать по радионуклидам ^{169}Yb (198 кэВ) и ^{175}Yb (396 кэВ) образующихся в процессе облучения мишени нейтронами.

Система автоматизации радиохроматографии разрабатывается на базе отечественного оборудования и программного обеспечения. Модульная структура и высокая надёжность компонентов обеспечивает устойчивость системы к одиночным отказам, возможность быстрой замены и гибкой настройки. Система выполняет функции автоматического и ручного управления процессом.

В целях мониторинга параметров установки может быть использована облачная автоматизация. Для осуществления удаленного доступа к параметрам используется сервис OwenCloud. За обмен данными между системой и облачным сервисом отвечает отдельный контроллер, не имеющий физической возможности воздействовать на технологический процесс, что обеспечивает недоступность системы для кибер атак и несанкционированного доступа.

SCADA система Simple-Scada2 позволяет представить визуализацию экспериментальные данные и данные технологического процесса в удобной для оператора форме.

Список использованной литературы

1. Кузнецов Р.А., Бобровская К.С., Светухин В.В., Фомин А.Н., Жуков А.В. Производство лутеция-177: технологические аспекты // Радиохимия, 2019, т. 61, N 4. – С. 273–285.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ И РОСТЕ ЧАСТИЦ В СЛАБОМ ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Огородников С.А., Евстратенко А.С.

*Научный руководитель: Мышкин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор ТПУ
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: saol2@tpu.ru*

Фазовые переходы сопровождают многие технологические процессы. Зачастую скорость роста частиц новой фазы влияет на технологический процесс. Скорость образования ядер конденсации существенно зависит от распределения вещества между различными центрами, и это имеет непосредственное влияние на размеры дисперсных частиц, образующихся в результате фазового перехода. Очевидно, что при высокой скорости формирования ядер конденсации, при равном количестве вещества в паровой фазе, размеры дисперсных частиц будут меньше из-за распределения вещества по большему количеству центров. Поэтому актуальна разработка методов управления скоростями нуклеации и формирования ядер конденсации.

Одним из факторов, влияющих на возможность формирования ковалентной связи, является суммарный спин валентных электронов взаимодействующих атомов. Из закона сохранения суммарного спина – ковалентная связь возможна только из синглетного состояния. Важным аспектом изотопной селективности радикальных процессов является воздействие слабого постоянного магнитного поля на процессы, связанные со столкновением двух атомов. В слабом постоянном магнитном поле вероятность столкновения двух спинов в синглетном состоянии составляет 25 % из-за прецессии обоих спинов относительно направления поля.

Влияние магнитного поля связано с вероятностью нахождения спина в различных состояниях. Очевидно, что сумма вероятностей нахождения каждого спина во всех состояниях равна «1». Также очевидно, что скорость изменения состояния спина не зависит от наличия поля. Магнитное поле добавляет определенность в состоянии спина. Без магнитного поля состояния одного спина распределены по сферической поверхности, а в слабом поле – по окружности. Поэтому в магнитном поле выше вероятность формирования синглетной пары при первом случайном контакте. В газовой среде, в отличие от жидкостей, из-за малого времени контакта атомов в газовой фазе, триплет-синглетная конверсия невозможна.

Конверсия возможна на поверхности микрочастиц, что увеличивает скорость конденсации в магнитном поле при медленном изменении внешних условий. При росте дисперсных частиц сорбированные молекулы пребывают в «оседлом» состоянии (клетка) на их поверхности некоторое время. При небольшом пересыщении рост дисперсных частиц, аналогичен процессу в растворе и также зависит от времени триплет-синглетной конверсии. Эти процессы более подробно анализируются в докладе.

ПАРАМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РАСТУЩЕГО ИЗ РАСТВОРА КРИСТАЛЛА В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Огородников С.А., Арыштаев С.А.

*Научный руководитель: Мышкин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор ТПУ
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: saol2@tpu.ru*

Понимание процессов, наблюдающихся при воздействии магнитного поля на кристаллизацию, имеет существенное значение для практических применений в различных областях. Это понимание может привести к созданию новых материалов с улучшенными свойствами и оптимизации процессов синтеза материалов. Особенно важно также разработать более эффективные методы управления химическими реакциями, происходящими на поверхности твердого тела, например, катализатора.

Нами исследуются условия для роста монокристаллов NaCl с различными изотопами хлора, протекающего в слабом постоянном магнитном поле. Переход частиц NaCl из раствора в кристалл сопровождается формированием ковалентных связей между Na и Cl хотя бы в одной точке контакта частицы NaCl с кристаллом. Однако формирование ковалентной химической связи, из-за закона сохранения суммарного спина, возможно только из синглетного состояния спинов неспаренных электронов взаимодействующих частиц. При столкновении радикалов состояние образующейся пары случайно. При наличии магнитного поля синглетным состояниям соответствует 25 % случаев столкновений, а триплетным – 75 %.

При столкновении с поверхностью кристалла молекула NaCl теряет избыточную энергию и переходит в сорбированное состояние. Если до времени появления сильной флуктуации тепловой энергии в месте контакта происходит конверсия триплетного состояния в синглетное, то NaCl формирует химическую связь и переходит в кристалл. При обратных условиях NaCl возвращается в раствор. Ядерный спин обоих изотопов хлора имеет значение $3/2$. Поэтому магнитный изотопный эффект определяется различием g-факторов изотопов. Известно, что g-факторы составляют: ^{35}Cl – 168 мТл; ^{37}Cl – 140 мТл. Поэтому магнитное поле действует на распределение изотопов хлора между раствором и кристаллом во встречном направлении относительно массового изотопного эффекта.

Если время триплет-синглетной конверсии спиновой пары для одного из изотопов больше, а для второго – меньше, чем время контакта

этих изотопов с поверхностью растущего кристалла, то изотопный эффект максимальный. При этом время конверсии зависит от индукции магнитного поля, а время контакта – от температуры. Поэтому суммарный изотопный эффект зависит от сочетания величин температуры раствора и индукции магнитного поля. В докладе приводятся результаты экспериментальных исследований и обсуждаются причины наблюдающегося изотопного эффекта для различных сочетаний магнитной индукции и температуры.

ИЗОТОПНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ИЗ РАСТВОРА, НАХОДЯЩЕГОСЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Арыштаев А.М.¹, Огородников С.А.²

*Научный руководитель: Мышкин В.Ф.*², *д.ф.-м.н., профессор ТПУ*

¹ФГАО «ГХК», 662972 г. Железногорск, ул. Ленина, 53

*²Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30*

E-mail: ama33@tpu.ru

В настоящее время очень активно ведутся разработки по получению изотопно-модифицированных материалов. Путем изменения изотопного состава можно добиться улучшения нужных свойств материалов. Существуют множество методов разделения, пригодные для получения изотопов всех элементов. Из-за высокой стоимости изотопно-модифицированных материалов актуальны исследования по разработке эффективных методов разделения изотопов различных элементов.

Известен магнитный изотопный эффект (МИЭ), связанный с формированием ковалентной химической связи между двумя свободными радикалами из раствора, находящегося в слабом постоянном магнитном поле. МИЭ не требует больших затрат энергии. Формирование кристаллов из растворов также сопровождается появлением новых химических связей. Поэтому следует ожидать проявление МИЭ в процессе кристаллизации. Задача исследования – установление МИЭ.

Экспериментальное исследование изотопных эффектов при кристаллизации в постоянном магнитном поле проводили на примере изотопного состава хлора в кристаллах NaCl, формируемых из водного раствора. Такие исследования на практике представляет собой сложную задачу, которая требует глубоких знаний физико-химических основ влияния магнитного поля на время триплет-синглетной конверсии спиновой пары для одного из изотопов, а также методик проведения исследований.

Изотопный состав хлора определяли на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ICP) Element. Определяли распределение изотопов по объему кристаллов. Поэтому модифицировали методику измерения изотопного состава на ICP масс-спектрометре и обработки получаемых данных.

Кристаллы NaCl со всей кюветы с раствором отбирались в одну пробу без учета величины магнитного поля. Кристаллы на анализ отбирались из общей пробы случайным образом, с учетом совершенства формы и размеров. Поэтому наблюдается как обогащение, так и обеднение по ^{37}Cl из-за разных сочетаний температуры раствора и величины магнитного поля. В дальнейшем планируется отслеживать температуру и индукцию магнитного поля для каждого анализируемого кристалла. В докладе приводится анализ парамагнитных процессов, протекающих на поверхности растущего кристалла в пересыщенном растворе NaCl, помещенного в слабое постоянное магнитное поле.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОПОРОШКОВ W-CU, FE-PB И FE-CU

Доржиев А.Е., Осокин А.А.

*Научный руководитель: Тимченко С.Н. к.т.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: timsn@tpu.ru*

На сегодняшний день востребованность создания новых радиационно-защитных материалов обусловлена повышением требований к их функциональным характеристикам. Одним из перспективных решений повышения функциональных характеристик радиационно-защитных материалов может стать использование наночастиц на основе бинарных систем несмешивающихся металлов.

На сегодняшний день наноразмерные порошки нашли широкое применение в различных областях науки, техники и промышленности. В процессе исследования были синтезированы биметаллические нанопорошки W-Cu, Fe-Pb и Fe-Cu. Для получения нанопорошков использовались проволоки вольфрама, меди, свинца и железа, а также аргон для формирования инертной атмосферы в электровзрывной камере. Исследованы основные характеристики полученных порошков и радиопоглощающие свойства с помощью гамма-изотопной установки «РОКУС-АМТ». Получены композитные материалы на основе синтезированных наночастиц и проведены измерения мощности поглощенной дозы полученных композитов.

Полученные результаты могут быть использованы для создания радиационно-защитных материалов в аэрокосмической и ядерной промышленности.

Список использованной литературы

1. Власов В.А., Космачев П.В. Морфология и размерные параметры наночастиц диоксида кремния, полученных плазменно-дуговым методом // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 5. – С. 153–159. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-153-159.

2. Mohajerani A., Burnett L., Smith J, et al. Nanoparticles in construction materials and other applications, and implications of nanoparticle use. Materials. 2019. V. 12. № 19. – P. 3052.

МЕДИЦИНСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ОБОГАЩЕННЫХ ПО ИЗОТОПАМ ПРЕПАРАТОВ

Мышкин М.Г.¹, Капокова А.Р.², Оммик А.-М. К.-Р.²

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

¹РНИМУ им. Н.И. Пирогова,

117997, г. Москва, ул. Островитянова, 1

²Томский политехнический университет,

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: kuso4ektorta@inbox.ru

Вернадский В.И. представлял ноосферу как новый этап в развитии биосферы, заключающийся в формировании разумного взаимоотношения человека и окружающей среды. Однако, в связи с ускорением научно-технического развития, вторжения в биосферу и проявления результатов человеческой деятельности, носящей глобальный характер, возникают болезни цивилизации, например, онкологические.

Большинство химических элементов на Земле представлены двумя и более стабильными изотопами. Как правило, изотопный состав химических элементов в разных точках Земного шара колеблется незначительно. Радиоактивные изотопы возникают в ядерном реакторе или при облучении мишени ускоренными ионами.

В докладе анализируются основные методы использования изотопов в медицине. В медицине широко используется метод «меченых» атомов, связанный с использованием изотопов в качестве индикаторов при изучении распределения или путей перемещения лекарственных препаратов в организме человека. При этом возможно использование стабильных изотопов или короткоживущих радионуклидов.

Одна из серьезных проблем при лечении рака связана с последствиями так называемой химиотерапии. Препараты, содержащие радионуклиды, которые разрушают раковые клетки, также губительно действуют и на здоровые ткани. Это создает серьезные проблемы.

Тераностика связана с подходом, при котором обследование пациента и его лечение проводятся в рамках единой процедуры и использования одних приборов. Хотя методы тераностики могут быть использованы в разных областях медицины, они активно развивались лишь в онкологии. Для локализации разрушающего действия соединения, содержащего радионуклиды, разрабатываются способы адресной доставки. При этом способ доставки радиоактивных препаратов является неотъемлемой частью тераностики. При использовании тераностики врач имеет возможность лечить каждого пациента индивидуально, с учетом особенностей его болезни.

Также разрабатываются методы лечения, использующие кинетический изотопный эффект. Эти методы связаны с тем, что биохимические реакции, в которых на химически активном центре располагается нечетный изотоп железа или магния, имеет большую скорость, чем для четных изотопов. При этом нечетные изотопы (^{25}Mg , ^{57}Fe , ^{67}Zn) имеют ядерный спин, ускоряющий биохимическую реакцию.

ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ПАРОВ ВОЛЬФРАМА, ПРОТЕКАЮЩЕГО В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Евстратенко А.С., Шевченко И.Н.

*Научный руководитель: Мышкин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор ТПУ
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: ase35@tpu.ru*

В настоящее время растет применение нанопорошков в различных отраслях промышленности, например, в микроэлектронике. Этот рост потребления связан с тем, что нанопорошки производятся в больших количествах, могут быть получены почти из любого материала, имеют приемлемую стоимость. При этом отработаны технологии получения порошков из большой номенклатуры веществ.

Перспективы использования нанопорошков связаны с их уникальными свойствами, связанными с технологией их получения: малая температура спекания; электрофизические свойства при низких температурах; возможность самовоспламенения при контакте с воздухом; высокое поглощение электромагнитного излучения в широком диапазоне спектра; высокая химическая активность; низкая работа выхода. Эти свойства, для

заданного химического состава, определяются размерами наночастиц. Поэтому необходимы методы управления размерами наночастиц.

Изучали воздействие слабого постоянного магнитного поля на процесс нуклеации паров вольфрама. Использовали постоянные магниты, имеющие разную остаточную намагниченность. Пары металла получали в атмосфере аргона путем лазерной абляции металлической мишени, находящейся на дне пластиковой кюветы. Верхняя крышка кюветы содержала окно из стекла, для облучения. Образующиеся нанодисперсные частицы оседали на внутренние стенки кюветы. Для проведения гранулометрического анализа порошок со стенок переносили в жидкость с помощью кисточки.

Дисперсный состав нанопорошков исследовали методами электронной микроскопии, седиментации и лазерной дифрактометрии.

С помощью электронной микроскопии показано, что образуются микронные и субмикронные частицы. С помощью лазерной дифракции в водной суспензии установлено наличие 3 мод порошков, полученных в магнитном поле: 80 мТл – 0,179; 0,933; 2,616 мкм, 50 мкТл – 0,271; 0,933; 2,616 мкм. В магнитном поле размер частиц, образующихся из паровой фазы, меньше, чем без поля. Наличие наночастиц с модальным размером 0,933 мкм связано с коагуляцией. Наличие наночастиц с модальным размером 2,616 мкм связано с выплескиванием капель из ванны расплава вольфрама, образующейся под действием импульсов длительностью 100 нс. При использовании седиментации обнаружилось, что в спиртах и водопроводной воде происходит быстрая коагуляция, а в дистилляте наночастицы вольфрама медленно растворяются. В докладе приводится анализ парамагнитных явлений, приводящих к формированию наночастиц в магнитном поле.

АНАЛИЗ СХЕМ ПОСТРОЕНИЯ КАСКАДОВ ПО РАЗДЕЛЕНИЮ ИЗОТОПОВ БОРА

Виноградов А.С., Шаров Р.В.

*АО «В/О «Изотоп», ул. Погодинская, д. 22, Москва,
E-mail: asvinogradov@isotop.ru*

Развитие в атомной отрасли России концепции замкнутого ядерного топливного цикла предполагает широкое использование реакторов нового поколения – на быстрых нейтронах, где, благодаря большому сечению захвата нейтронов, для изготовления выгорающих поглотителей, стержней системы управления и защиты реактора применяются борсодержащие соединения, обогащенные по стабильному изото-

пу ^{10}B [1]. К тому же данный легкий изотоп бора является основным компонентом нейтронозахватного метода лечения онкологических заболеваний. Запросы предприятий России в данном изотопе, в силу отсутствия его производства на территории нашей страны, удовлетворяются за счет импорта. Таким образом, работы направленные на поиск и разработку способов организации промышленных каскадов по разделению изотопов бора являются актуальными.

Известно, что для разделения изотопов легких элементов наиболее перспективными в использовании являются физико-химические методы разделения [2], причем в плане изотопов бора имеется практика применения химического изотопного обмена и ректификации [3]. Наряду с этим, имеются сведения о возможности использования для разделения рассматриваемых изотопов центробежных каскадов [4].

Данная работа направлена на поиск перспективных для промышленных технологий методов разделения изотопов бора и анализа возможных вариантов построения разделительных каскадов.

В связи с этим, были проведены литературный обзор промышленных методов разделения изотопов бора и теоретический анализ полученных результатов. В результате проведенных исследований показано, что наиболее перспективным вариантом построения каскада для разделения изотопов бора является гибридная схема, предполагающая последовательное обогащение химобменным и центрифужным методами.

Список использованной литературы

1. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / под общ. ред. проф. Е.О. Адамова. – М.: Изд-во АО «НИИ-КИЭТ», 2020. – 502с.
2. Андреев Б.М., Зельвенский Я.Д., Катальников С.Г. Разделение стабильных изотопов физико-химическими методами.– М.: Энергоатомиздат, 1982. – 208 с.
3. Севрюгова Н.Н., Уваров О.В., Жаворонков Н.М. Разделение стабильных изотопов бора // Атомная энергия. –1960. – Т. 9, Вып. 2. – С. 110–125.
4. Токманцев В.И., Палкин В.А. Разделение стабильных изотопов бора в прямоточных газовых центрифугах // Атомная энергия. – 2017. – Т. 123, Вып. 1. – С. 40–45.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДИСПЕРСИОННОГО ТОПЛИВА С УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЕЙ

Зайцев И.К.,¹ Третьякова А.В.²

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

¹*Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30*

²*ООО «Power Proton», г. Томск*

E-mail: ikz1@tpu.ru

В современной атомной энергетике обычно применяется керамическое ядерное топливо, которое обладает существенным недостатком – низким коэффициентом теплопроводности. Одно из возможных решений этой проблемы – использование дисперсионного ядерного топлива. У такого вида топлива значительно выше коэффициент теплопроводности за счет материала матрицы, что позволяет не только увеличить количество теплоты уносимой теплоносителем, но также и уменьшить термическое напряжение топливной таблетки, а, следовательно, и повысить безопасность применения ядерных энергетических установок. Проведено теоретическое исследование зависимости коэффициента теплопроводности дисперсионного ядерного топлива с углеродной матрицей от содержания делящегося вещества. В качестве делящегося вещества были рассмотрены диоксид урана UO_2 , смешанное уран-плутониевое топливо $(U+Pu)O_2$ и уран-ториевое $(U+Th)O_2$ и их имитаторы. Для определения коэффициента теплопроводности использована модель с замкнутыми включениями с дроблением ячейки адиабатическими (непроницаемыми для линий тока) плоскостями (ВАД). По ней коэффициент теплопроводности дисперсионного топлива λ можно определить по формуле [1]:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \frac{\nu - (\nu - 1) \cdot (1 - m_2^{2/3}) \cdot m_2^{1/3}}{\nu - m_2^{1/3} \cdot (\nu - 1)}.$$

Здесь, m_2 – объемная концентрация делящегося вещества, ν – отношение коэффициента теплопроводности делящегося вещества к коэффициенту теплопроводности матрицы.

Исследование проведено для содержания делящегося вещества в пределах от 5 % до 20 % в дисперсионном ядерном топливе. Установлено, что коэффициент теплопроводности дисперсионного топлива и топлива из модельных оксидов близки по значениям, что позволяет использовать модельные оксиды для проведения исследований таблеток.

По результатам опытов выявлено, что увеличение содержания делящегося вещества приводит к линейному уменьшению теплопроводности таблетки. Наибольшей теплопроводностью обладает смешанное топливо из урана и тория.

Список использованной литературы

1. Мендоса О., Каренгин А.Г., Новоселов И.Ю., Шаманин И.В. Определение теплофизических свойств композиционного материала с использованием различных моделей // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2017. – № 2. – С. 178–183.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ТАБЛЕТОК ИЗ МОДЕЛЬНЫХ ОКСИДОВ С УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЕЙ

Зайцев И.К., Видяев Д.Г.

*Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: ikz1@tpu.ru*

В соответствии с предъявляемыми к ядерному топливу, в том числе дисперсионному, требованиями его физические и химические свойства должны позволять справляться с большой радиационной нагрузкой и высокой температурой в активной зоне ядерного реактора. К важным свойствам также относятся: теплопроводность, глубина выгорания, плотность и множество других. Матрица является одним из компонентов дисперсионного ядерного топлива, обеспечивающим его высокую радиационную стойкость. Основные требования к материалу матрицы – незначительное поглощение нейтронов, высокая температура плавления и теплопроводность, совместимость с топливной композицией и материалом оболочки, устойчивость в условиях реакторного облучения, а также высокие механическими свойствами [1].

В основном делящиеся материалы, используемые в дисперсионном ядерном топливе, представляют собой оксид урана или его смеси с оксидами тория, а также плутония. По причине их повышенной радиоактивности изготовление топливных таблеток и дальнейшее исследование представляется сложной задачей. Поэтому оксиды ThO_2 , UO_2 и PuO_2 в составе таблеток заменяются на имитаторы, которые обладают наиболее близкими к ним свойствами. В качестве имитаторов делящихся материалов можно, соответственно, использовать оксиды CeO_2 , Nd_2O_3 и Sm_2O_3 .

В работе приведены результаты исследования зависимости плотности таблеток от давления прессования, температуры нагрева образ-

цов, состава имитаторов (№ 1 – С + Nd₂O₃; № 2 – С + Nd₂O₃ + Sm₂O₃; № 3 – С + CeO₂ + Sm₂O₃).

Исследование плотности проводилось для таблеток из всех составов полученных при давлениях прессования 20, 50, 100 МПа до и после их спекания в трубчатой печи Carbolite STF. По результатам исследований установлено, что наибольшую плотность имеют таблетки состава № 2. Изменение плотности таблеток после нагрева составляет 3–15 %. Явной зависимости плотности полученных таблеток от давления прессования в исследованном диапазоне не наблюдается.

Список использованной литературы

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с. Текст : электронный // Лань : ЭБС. – URL: <https://ezproxy.ha.tpu.ru:2225/book/87736> (дата обращения: 28.10.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

ОЦЕНКА РЕЖИМА СПЕКАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ТАБЛЕТОК СО СТЕАРАТОМ ЦИНКА В КАЧЕСТВЕ ПЛАСТИФИКАТОРА

Видяев Д.Г.¹, Усков Т.И.¹, Савостиков Д.В.²

¹Томский политехнический университет, г. Томск

²Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, г. Томск

E-mail: tiul@tpu.ru

Одним из важных этапов процесса получения таблеток является процесс спекания. Для отработки режима нагрева образцов необходимо знать влияние температуры на свойства отдельных компонентов, входящих в состав пресс-порошка. Так для улучшения прессуемости порошка в него добавляют различные пластификаторы, в частности стеараты.

Нами рассматривается возможность при фабрикации углеродных таблеток [1] использовать стеарат цинка (Zn₂[CH₃(CH₂)₁₆COO]). Поэтому был проведен его термогравиметрический анализ в атмосфере аргона при темпе нагрева 10 град·мин⁻¹, результаты которого представлены на рисунке.

Вид кривой ДТА обусловлен эндоэффектом плавления стеарата при 120 °С, эффектами его разложением в области от 325 до 410 °С, дальнейшими перестройкой структуры и окислением продуктов разложения. Масса остатка, в соответствии с кривой ТГА, составляет 20 %, что соответствует оксиду цинка (теоретическая масса 19,7 %). По результатам термического анализа определен режим нагрева образцов со стеаратом цинка.

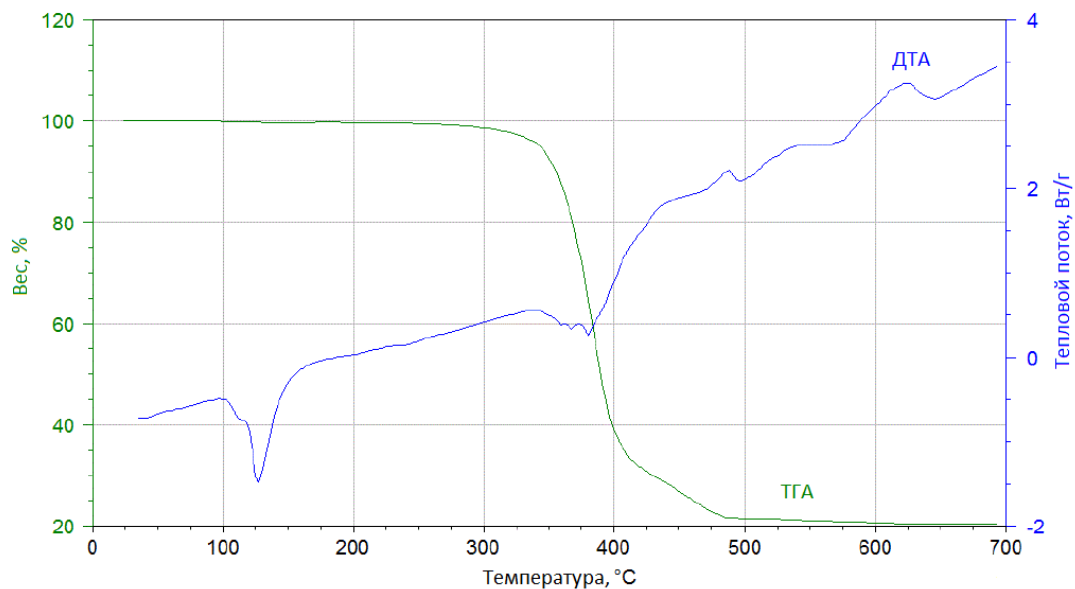


Рис. Кривые термического анализа образцов стеарата цинка

Список использованной литературы

1. Акимов В.Н., Борецкий Е.А., Видяев Д.Г., Савостиков Д.В. Подготовка пресс-порошков при фабрикации углеродных материалов в таблетки // Изотопы: технологии, материалы и применение: сб. тез. докл. V Междунар. науч. конф., Томск, 19–23 ноября 2018. – Томск: ТПУ, 2018. – С. 95.

Секция 4

ЦИФРОВИЗАЦИЯ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Председатель: д.т.н., профессор Ливенцов С.Н.

**ДОКЛИНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО
ЛЕКАРСТВЕННОГО ПРЕПАРАТА НА ОСНОВЕ МЕЧЕННЫХ ¹²³I
РЕКОМБИНАНТНЫХ АДРЕСНЫХ МОЛЕКУЛ ДЛЯ РАДИОНУКЛИДНОЙ
ДИАГНОСТИКИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ
С ГИПЕРЭКСПРЕССИЕЙ HER-2/NEU**

Семенов А.С.¹

*Научные руководители: Скуридин В.С.², д.т.н., профессор,
Толмачев В.М.², д.м.н., профессор, Деев С.М.², д.б.н., профессор,
Юсубов М.С.², д.х.н., профессор*

¹АО «ТомскНИПИнефть», 634027 Россия, г. Томск, пр. Мира, 72

²Томский политехнический университет,

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

E-mail: semenovas@tpu.ru

На протяжении двух последних десятилетий особый интерес представляет получение меченных радионуклидами антител. Меченные радиоактивным изотопом антитела могут использоваться для диагностики пациентов, имеющих опухоли, специфичные к конкретным антигенам, и могут иметь преимущества для направленной (таргетной) терапии [1, 2].

В настоящей работе проведены исследования по разработке методики меченного йодом-123 рекомбинантных адресных молекул DARPin9_29, специфичных к онкомаркеру HER2/neu, и проведены их биологические испытания.

Изучение биораспределения меченного DARPin9_29 проводили на интактных крысах-самцах линии Вистар. При изучении фармакокинетики исследуемого радиотрейсера DARPin9_29, меченного ¹²³I, было отмечено быстрое выведение трейсера из кровотока, а также относительно невысокие показатели накопления изучаемого соединения в лёгких, печени, селезёнке, костях. Наблюдалось отчетливое накопление радиотрейсера в желудке и значительное накопление в почках, что предполагает путь почечной экскреции. У контрольной группы также наблюдалось поглощение в щитовидной железе. В обеих группах поглощение в почках существенно снижалось через 4 часа.

Проведенные исследования показали, что синтезированный радиотрейсер DARPin9_29, меченный ¹²³I, имеет высокий клиренс крови и низкое удержание в экскреторных органах. Выводится в основном почками путем клубочковой фильтрации. Данные по его биораспределению указывают на благоприятные предпосылки для дальнейшего доклинического изучения радиотрейсера.

Список использованной литературы

1. Петровская Л.Е., Шингарова Л.Н., Долгих Д.А. и пр. Альтернативные каркасные белки // Биоорганическая химия. – 2011. – Т. 37. – № 5. – С. 581–591.
2. Полянский О.Л., Лебедеенко Е.Н., Деев С.М. ERBB онкогены – мишени моноклональных антител // Биохимия. – 2012. – Т. 3. № 77. – С. 289–311.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ РЕАКТОРА ИРТ-Т МЕТОДАМИ МАШИНОГО ОБУЧЕНИЯ

Кублинский М.К., Смольников Н.В., Наймушин А.Г.

*Научный руководитель: Наймушин А.Г., к.ф.-м.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: mkk4@tpu.ru*

Машинное обучение является одним из компонентов искусственного интеллекта, используемого для создания аналитических моделей с использованием подготовленного массива данных [1]. Первые вариации искусственного интеллекта появились в середине двадцатого века, когда изобретатель Алан Тьюринг предложил разработать опытно обучаемую машину. Спустя годы планомерного развития и технологических инноваций, машинное обучение представляет собой ресурсоемкую утилиту, имеющую широкий спектр научных, исследовательских и промышленных применений, с основным направлением в определении закономерностей в вышеуказанных процессах [2].

В современной производственной практике методы машинного обучения используются для упрощения и оптимизации эксплуатационных процессов. Несмотря на это, атомные электростанции и исследовательские реакторы редко используют дата-аналитику для оценки технологических и нейтронно-физических характеристик.

В этом исследовании предлагается разработать программное обеспечение для оценки загрязнения теплообменного аппарата. Это позволяет предсказывать срок эксплуатации, что дает возможность персоналу работать более эффективно, а качество теплоотдачи будет находиться на высоком уровне в течение всей кампании реактора.

Были взяты экспериментальные данные с утилиты SCADA исследовательского реактора ИРТ-Т и внедрены в среду преобразовательного программного обеспечения, разработанного в рамках исследовательской

работы. При использовании обучения с наблюдением в регрессии были определены наиболее важные для изменения теплоотдачи технологические параметры, и изменение теплообмена в течение года было предсказано и представлено в графическом виде.

Список использованной литературы

1. Machine Learning Model for Analyzing Learning Situations in Programming Learning / Sh. Kawaguchi, Y. Sato, H. Nakayama [et al.] // 2018 IEEE 3rd International Conference on Big Data Analysis, ICBDA 2018: 3, Shanghai, 09–12 March 2018. – Shanghai, 2018. – P. 74–79. – DOI 10.1109/ICBDAA.2018.8629776. – EDN CMGSAL.
2. Korobova, M.A. Overview of Machine Learning Methods Used in Algorithmic Trading / M.A. Korobova, D.I. Gubina // Languages in Professional Communication, 28 April 2022, 2022. – P. 54–59. – EDN GQKESU.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ИРТ-Т

Смольников Н.В., Аникин М.Н., Лебедев И.И.

*Научный руководитель: Наймушин А.Г., к.ф.-м.н.
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: nvs38@tpu.ru*

Для ядерных реакторов, имеющих небольшие размеры активной зоны характерны большие неравномерности распределения нейтронного излучения и, как следствие, наличие высоконапряженных участков, ограничивающих условия эксплуатации ТВЭЛов с целью не возникновения кризиса теплообмена.

Наличие высоконапряженных участков в объеме активных зон исследовательских ядерных установок обусловлено, в первую очередь, использованием режима частичных перегрузок топлива, при котором происходит локальное увеличение неравномерности энерговыделения в ячейке со «свежим» топливом, а также наличием ловушки и отражателя нейтронов, повышающих долю нейтронов, возвращаемых в активную зону и участвующих в процессе деления. Аналогичные условия характерны для исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т, являющегося реактором бассейнового типа с тепловой мощностью 6 МВт. Штатная нагрузка активной зоны состоит из 20-ти тепловыделяющих сборок (ТВС) типа ИРТ-3М. В качестве материала отражателя и ловушки нейтронов используется бериллий.

Изменение конфигурации активной зоны, процессы выгорания топлива вызывают перераспределение энерговыделения в активной зоне, что, в совокупности с большим разнообразием возможных топливных конфигураций, обуславливает основную трудность при анализе энергетических характеристик активной зоны. Как правило, современные коды, решающие уравнение переноса излучения методом Монте-Карло, позволяют оценивать нейтронно-физические характеристики активной зоны для каждой топливной загрузки на основе 3D геометрии. Однако, получение достоверных результатов таких расчетных мероприятий требует обязательное наличие всей истории эксплуатации активной зоны и больших вычислительных мощностей.

В качестве оптимизации существующего расчетного процесса предлагается использовать модель искусственного интеллекта с алгоритмами регрессионного анализа [1, 2] для генерации коэффициентов неравномерности энерговыделения в ячейках активной зоны реактора ИРТ-Т для различных топливных загрузок.

Список использованной литературы

1. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М. : Высш.шк.; 1999. 479 с.
2. Паклин Н., Орешков В. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. Учебное пособие. СПб.: Питер; 2013. 704 с.: ил.

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЦИФРОВОМ ДВОЙНИКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УЧАСТКА СБОРКИ И ГЕРМЕТИЗАЦИИ ТВЭЛОВ

Кушков О.О., Большаков А.Д.

*Научные руководители: Ливенцов С.Н., д.т.н.,
профессор; Егорова О.В., к.т.н.*

*Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: ook4@tpu.ru*

В рамках проекта «Прорыв» ведутся работы по созданию цифрового двойника (ЦД) модуля фабрикаци/рефабрикаци (МФР) СНУП-топлива опытно-демонстрационного энергетического комплекса. Одной из задач разрабатываемого ЦД является имитация работы технологического оборудования объекта-оригинала. В настоящей работе объектом-оригиналом является технологический участок (ТУ) сборки и герметизации твэлов, входящий в состав технологической линии (ТЛ) сборки

твэлов. ТУ представляет собой совокупность установок, в которых выполняются технологические процессы, перемещение и накопление продукта, и вспомогательных подсистем.

Ввиду сложной структуры объекта-оригинала и случайного характера, присущего основным факторам, влияющим на динамику функционирования участка, а значит и на ритм выпуска конечной продукции, для программной имитации его работы может быть применено имитационное моделирование.

В данной работе рассмотрен алгоритм создания имитационной модели как логико-математического описания объекта на основе результатов анализа наиболее существенных взаимосвязей между его элементами [1, 2].

Для непосредственной реализации имитационной модели ТУ был проведен анализ ТУ как объекта моделирования, выполнена его декомпозиция (т. е. представление в виде набора логически объединенных в один блок установок), составлены алгоритмы функционирования каждого блока, по которым далее был разработан набор программных алгоритмов, реализованных в MATLAB. Работоспособность имитационной модели подтверждена проведенными вычислительными экспериментами.

На основе ЦД с имитационной моделью может быть разработан инструмент менеджмента, позволяющий оператору путем сбора и анализа данных решать ряд задач, связанных с планированием и оптимизацией режимов работы установок, что в перспективе должно привести к снижению издержек на производство единицы готовой продукции, повышению её качества и улучшению уровня управления производства в целом.

Список использованной литературы

1. Лоу, А. Имитационное моделирование / А. Лоу, Д. Кельтон; Пер. с англ. – 3-е изд. – Санкт-Петербург: ВHV, 2004. – 848 с. – Текст: непосредственный.

2. Алёшина Е.Е. Создание имитационной модели сборочной линии с использованием системы Delmia / Е.Е. Алёшина, А.А. Саломатина, Е.И. Яблочников. – Текст: непосредственный // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 1 (71). – С. 50–53.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ПРОВЕРКИ АЛГОРИТМОВ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ И РЕГУЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ В ЗАЩИТНОМ БОКСЕ

Кривобородько В.А., Плетнев А.О., Большаков А.Д.

*Научные руководители: Ливенцов С.Н.,
д.т.н., профессор, Егорова О.В., к.т.н.,
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: vak99@tpu.ru*

Монтаж и пусконаладочные работы технологических схем ОДЭК линии изготовления таблеток СНУП-топлива на площадке СХК вступают в активную фазу, и это является ключевым этапом в процессе подготовки системы к полноценной эксплуатации. На этом этапе важно наличие испытанных алгоритмов регулирования и противоаварийной защиты. В то же время проверка алгоритмов посредством натуральных экспериментов либо затруднительна ввиду отсутствия самого объекта или доступа к нему, либо может привести к выходу из строя оборудования и аварийным ситуациям. При таких обстоятельствах можно заменить натурные эксперименты на эксперименты с использованием математических моделей этого оборудования. В таком случае цифровой двойник (ЦД) участка прессования линии изготовления таблеток возможно применить для проведения испытаний алгоритмов, в которых анализ работоспособности осуществляется с помощью интегрированных математических моделей, которые действуют как имитатор реального объекта.

В основе ЦД лежат модели-имитаторы состояния атмосферы бокса и установки прессования пресс-порошка. Модель состояния атмосферы в боксе основана на уравнениях теплового и материального балансов, а также соотношениях для расчета потерь давления на местных гидравлических сопротивлениях трубопроводов. Модель позволяет производить расчет динамических изменений давлений, концентраций основных компонентов (азот, кислород и пары воды) и температур среды в боксе в зависимости от расходов газа на входе и выходе бокса и изменения температуры окружающей среды; распределение расходов и потерь давлений в сети трубопроводов, в зависимости от степеней открытия запорной и регулирующей арматуры, давлений во входном и выходном общих коллекторах и давлений внутри бокса в штатных и нештатных режимах работы бокса и сети трубопроводов.

Техническим проектом заложены алгоритмы противоаварийной защиты и управления состоянием атмосферы в боксе. Данные алгоритмы

реализуются в ЦД, либо в локальной системе управления на производстве с возможностью обмена данными с ЦД, что дает возможность использовать ЦД для проверки алгоритмов как до этапа пуско-наладки, так и во время нее. В настоящей работе продемонстрирован пример использования ЦД при настройке параметров регуляторов, проверки адекватности функционирования алгоритмов управления и аварийной защиты при имитации появления искусственных сигналов ошибок в работе алгоритмов и во время нештатного режима работы бокса.

АЛГОРИТМ ТРЕКИНГА ЧАСТИЦ ДЛЯ СБОРОК STRAW-ДЕТЕКТОРОВ С ОТБОРОМ ПО УГЛУ ПАДЕНИЯ

Чумаков Д.К.

*Научный руководитель: Дусаев Р.Р.
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: dkc1@tpu.ru*

Трекинг частиц является важной частью современных ускорительных экспериментов. Кроме того, определение треков частиц используется и в прикладных целях – для отладки оборудования, точной корректировки геометрии расположения детекторов в ядерной физике. Для этих целей используются трековые детекторы, обладающие хорошим пространственным и временным разрешением. Широко используемые в настоящее время полупроводниковые детекторы (типа Timerix) под воздействием облучения со временем деградируют; с увеличением требуемой площади покрытия существенно возрастает стоимость сборки таких детекторов. Для этих целей могут быть использованы газонаполненные детекторы – микрополосковые типа Micromegas или трубчатые straw-детекторы. Straw-детекторы обладают временным разрешением до десятков нс; типовое пространственное разрешение единичного детектора составляет десятки-сотни мкм и определяется его диаметром и функцией ($r-t$) зависимости ширины сигнала от расстояния пролета частицы относительно анодной проволоки детектора [1]. Эта зависимость описывает цилиндрическую поверхность изохрон. Для улучшения пространственного разрешения straw-детекторов используются их многослойные сборки в сочетании с математической обработкой полученных сигналов. С этой целью был разработан алгоритм, представляющий собой расширение преобразования Лежандра [2]. В разработанном алгоритме траектория частицы определяется как касательная к изохронам сработавших детекторов из разных слоев. Кроме того, вво-

дится угол ограничения, позволяющий разделить события, не относящиеся к условиям эксперимента. Трек, не попадающий в область допустимых углов падения, пересчитывается, исходя из поставленных ограничений. Критерии отбора исключают треки, пересекающие детекторы, на которых не было зарегистрировано срабатывание. Из оставшихся треков собирается массив линий, описываемых точкой регистрации в массиве детекторов и направляющим вектором. Пространственное разрешение определения точек регистрации превышает таковое для результатов без математической обработки и составляет единицы-десятки мкм. Полученные результаты в дальнейшем могут быть применены для обработки фильтром Калмана.

Список использованной литературы

1. Roy S., Jaiswal S., Chatterjee S. Stability study and time resolution measurement of straw tube detectors//Pramana, 2021, Vol. 95, № 1, P. 50.
2. Frühwirth R., Strandlie A. Pattern Recognition, Tracking and Vertex Reconstruction in Particle Detectors: Particle Acceleration and Detection. – Cham: Springer International Publishing, 2021.

РАЗРАБОТКА ВИДЕОГРАММ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ОБНОВЛЯЕМЫХ ДАННЫХ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА МОДУЛЯ ФАБРИКАЦИИ И РЕФАБРИКАЦИИ

Бельков А.М.¹, Сумин Г.В.¹, Фейгин А.И.²

Научный руководитель: Ливенцов С.Н., д.т.н., профессор

*¹Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30*

*²АО «Прорыв», Россия, г. Москва, ул. Малая Красносельская д. 2/8
E-mail: amb24@tpu.ru*

Важная роль среди цифровых технологий отводится цифровому двойнику (ЦД). К обновляемым данным в цифровом двойнике модуля фабрикации и рефабрикации (ЦД МФР) относится информация, полученная на основе анализа значений переменных, поступающих от АСУ ТП МФР.

На первом этапе разработки проведен анализ технологических линий МФР и функций персонала управления разного уровня. В результате проведенного анализа выделены функции, которые могут быть реализованы с использованием ЦД МФР:

- подготовка данных для построения циклограмм на основе значений набора сигналов, которые характеризуют состояние оборудования;

- анализ количества потребленных ресурсов боксами и установками с последующим анализом потребления за аналогичный промежуток времени;
- формирование журнала отклонения от карты переменных для представления пользователю сводной информации о переменных, вышедших за заданный диапазон;
- анализ причин выпуска некачественной продукции с использованием статистического анализа влияния значений технологических переменных, при которых изготавливалась единица готовой продукции, на значения параметров, характеризующих ее качество;
- расчет оценки степени риска производства некачественной продукции для информирования пользователя о отклонении текущих значений переменных от регламентных и влиянии этого отклонения на качество производимого продукта;
- контроль состояния промежуточных емкостей на основе данных от АСУ ТП МФР и прогнозируемом времени заполнения на основе рассчитанной производительности оборудования;
- анализ поведения переменных процесса на основе текущих значений, полученных от АСУ ТП МФР, и среднего значения, полученного в результате обработки данных;
- контроль оставшегося ресурса работы элементов на основе сигналов, позволяющих определять состояние работы оборудования.

На втором этапе разработаны алгоритмы, которые реализуют выполнение функций, представленных выше.

На третьем этапе разработаны макеты видеogramм представления обработанной информации пользователям ЦД МФР различных уровней.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ УРАНОВОГО СЫРЬЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТРЕНАЖЕРНОЙ МОДЕЛИ

Большаков А.Д., Кривобородько В.А., Кушков О.О.

Научные руководители: Ливенцов С.Н., д.т.н., профессор,

Ливенцова Н.В., к.т.н., доцент

Томский политехнический университет,

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

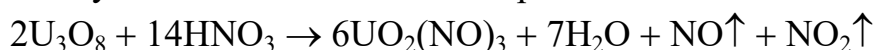
E-mail: adb15@tpu.ru

Уран и многие его соединения растворяются в растворах азотной кислоты. Наиболее ответственными операциями при растворении топлива в производственных условиях являются контроль реакции и обращение с газами, выделяющимися при растворении. Растворение продук-

та пирохимического передела или водоксидированного ОЯТ, пылевых фракции от регенерации МТФ установок газоочистки, брака от получения смешанных оксидов актинидов, ТУЭ и нерезицилируемого скрапа МФР проводится в азотной кислоте на установках растворения ОЯТ. Уравнение реакции растворения можно записать в следующем виде:



Данная реакция описывает процесс растворения двуокси урана в растворе концентрированной азотной кислоты. Оксид урана(VI)-диурана(V) взаимодействует с азотной кислотой по реакции:



Как видно из уравнений продуктами данных реакций являются оксид азота и диоксид азота, которые оказывают неблагоприятное влияние на человека и окружающую среду. При перемешивании реакционной системы выделение оксидов азота из реакционной смеси происходит особенно бурно.

Изучение механизма растворения оксидов урана в азотной кислоте при изменении температуры от 30 до 95 С и концентрации кислоты от 0,3 до 10 моль/л показало, что скорость растворения U_3O_8 растет с увеличением температуры процесса и с повышением кислотности азотно-кислого раствора.

Изучение растворения UO_2 с продувкой раствора кислородом или воздухом, для создания условий «бездымного» растворения доказало, что при этом уменьшается количество NO_x в растворе, но и снижается скорость растворения. Изменение степени превращения (прореагировавшая доля) зависит от концентрации азотной кислоты в объеме реактора и температуры раствора.

С учетом вышеизложенного, изменение скорости растворения в большей степени зависит от температуры раствора. За первые 12–15 секунд при одинаковой температуре растворяется 80 % оксидов при изменении концентрации кислоты от 5 до 9 моль/л.

Анализ технологического процесса как объекта моделирования позволил составить адекватное, основанное на уравнениях материального и теплового баланса математическое описание, для реализации тренажерной модели процесса растворения. При этом изменение растворяемого продукта реализуется изменением коэффициентов моделирования, а не самой модели.

РЕАЛИЗАЦИЯ МОДУЛЯ ОБРАБОТКИ ОБНОВЛЯЕМЫХ ДАННЫХ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА МОДУЛЯ ФАБРИКАЦИИ И РЕФАБРИКАЦИИ

Сумин Г.В., Бельков А.М.

*Научный руководитель: Ливенцов С.Н., д.т.н., профессор
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: gvs9@tpu.ru*

Современный уровень развития цифровых технологий и возможность их применения для оптимизации, планирования и сокращения издержек диктует необходимость их внедрения, и в первую очередь в стратегические отрасли, например, атомную. В настоящее время в рамках реализации проекта «Прорыв» ведется активная работа по разработке и внедрению цифрового двойника (ЦД) в создающееся производство по фабрикации и рефабрикации ядерного топлива (МФР). Одной из ключевых особенностей создаваемого производства является большое количество (несколько десятков тысяч) переменных различных типов, ежесекундно поступающих со всех производственных линий МФР.

Для корректного выполнения функций цифрового двойника необходимо из общего объема данных выделить информацию, на основе которой можно судить о состоянии оборудования и качестве протекания процессов на производстве. Так как информация из производства поступает с заданным интервалом времени, разработанный программный модуль должен обладать достаточным быстродействием для чтения, фильтрации, анализа входных данных и записи результатов анализа в нужные таблицы базы данных.

В представленной работе реализованы следующие функции ЦД МФР:

- подготовка данных для построения циклограмм;
- анализ количества потребленных ресурсов;
- формирование журнала отклонения от карты переменных;
- расчет степени риска производства некачественной продукции;
- анализ причин выпуска некачественной продукции;
- контроль состояния промежуточных емкостей и хранилищ;
- анализ поведения переменных процесса;
- контроль ресурса работы элементов.

Для решения поставленной задачи разработана программа на языке C++, которая один раз в секунду производит следующий набор действий:

- получение входного набора значений сигналов в формате JSON;
- подготовка данных для каждого расчетного алгоритма на основе информации, полученной в JSON;
- передача сформированных данных расчетным алгоритмам и запуск их на исполнение;

- получение данных о результате работы расчетных алгоритмов;
- формирование данных для записи в БД и отображения на интерфейсе пользователя.

ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЛИНИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК

Степанченко Е.К.¹, Бельков А.М.¹, Плетнёв А.О.¹, Фейгин А.И.²

Научный руководитель: Ливенцов С.Н., д.т.н., профессор

*¹Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30*

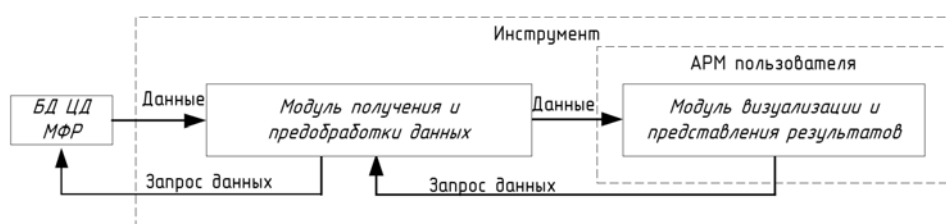
²АО «Прорыв», Россия, г. Москва, ул. Малая Красносельская д. 2/8

E-mail: eks8@tpu.ru

Модуль фабрикации и пусковой комплекс рефабрикации (МФР) является частью пристанционного ядерного топливного цикла опытно-демонстрационного энерго-комплекса (ПЯТЦ ОДЦ) с реактором на быстрых нейтронах БРЕСТ-300 и одним из основных элементов замкнутого ядерного топливного цикла. В виду высокой экономической значимости проекта и его сложности, принято решение о создании Цифрового Двойника (ЦД), предоставляющего информацию для оптимизации производства, материальных и ресурсных затрат. В качестве элементов ЦД линии ТВС выступают инструменты построения циклограмм работы оборудования и анализа причин выпуска некачественной продукции.

Циклограммер – инструмент обработки (фильтрации, сортировки, расчета) и визуализации части данных, поступающих с реального производства, предоставляющий текущую и статистическую информацию о длительности пребывания элементов в различных состояниях за выбранный пользователем временной интервал.

Инструмент анализа причин выпуска некачественной продукции в свою очередь позволяет отследить нарушения контрольного параметра отбраковки продукции по ряду вспомогательных критериев. В результате анализа инструмент приводит возможную причину нарушения контрольного параметра, а также степень влияния причины на брак ТВС. Схема работы инструментов приведена на рисунке ниже.



Преимущество разработки состоит в универсальности применения инструмента построения циклограмм, а именно исключение необходимости корректировки алгоритмов расчета для различных линий МФР. Инструмент анализа причин выпуска некачественной продукции позволит выявить причину нарушения контрольного параметра до непосредственной отбраковки продукции, что позволит снизить процентное соотношение общего количества брака линии ТВС за счет оперативного устранения выдвинутых инструментом причин. Инструменты оказывают существенную информационную поддержку оперативному персоналу за счет автоматизации процедур анализа и формирования отчетных документов.

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Плетнев А.О.¹, Сумин Г.В.¹, Фейгин А.И.²

*Научный руководитель: Ливенцов С.Н., д.т.н., профессор,
Егорова О.В., к.т.н., доцент*

*¹Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30*

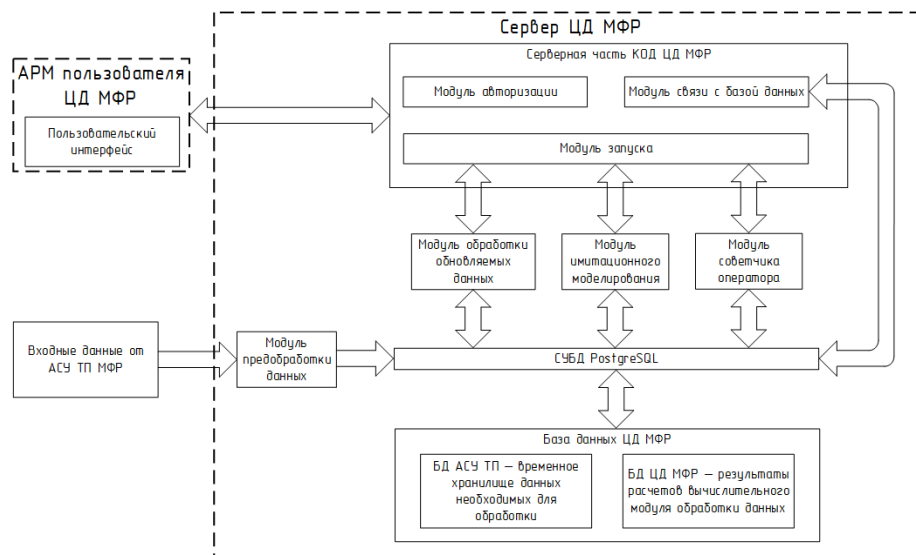
*²АО «Прорыв», Россия, г. Москва, ул. Малая Красносельская д. 2/8
E-mail: aor1@tpru.ru*

Цифровые двойники играют важную роль в современной индустрии, обеспечивая виртуальное представление физических объектов и процессов пользователю. Они способствуют более эффективному мониторингу, управлению и оптимизации, что является неотъемлемой частью цифровизации промышленности. Применение цифровых двойников в госкорпорации «Росатом» является важным этапом современных технологических инноваций в атомной промышленности. В рамках проекта «Прорыв» идет разработка инструментов, составляющих основу цифрового двойника, позволяющего обеспечить автоматизацию деятельности технологического персонала.

Программное обеспечение играет важную роль в создании устойчивых и эффективных цифровых двойников. Грамотно разработанная архитектура программного обеспечения обеспечивает масштабируемость, надежность и управляемость системы. При разработке цифровых двойников для закрытых предприятий важно учитывать такие вопросы, как защита данных, метод их передачи и разграничение доступа персонала к ресурсам.

Предлагаемое решение, представленное на рисунке, основано на клиент-серверной архитектуре, позволяющей «отделить» пользователя

от данных. Все компоненты, обеспечивающие выполнение отдельных функций цифрового двойника, выполнены в виде отдельных модулей, что упрощает масштабируемость и позволяет лучше распределить вычислительные ресурсы по приоритетам задач.



РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК

Груббе М.С., Степанченко Е.К.

*Научный руководитель: Егорова О.В., к.т.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: msg14@tpu.ru*

Модуль фабрикации и пусковой комплекс рефабрикации (МФР) является одним из основных элементов замкнутого ядерного топливного цикла. МФР представляет собой комплексную систему, состоящую из различных технологических линий, в том числе линия изготовления тепловыделяющих сборок (ТВС). В виду высокой сложности и значимости проекта, принято решение о создании Цифрового Двойника (ЦД), предоставляющего информацию для оптимизации производства. В качестве элемента ЦД линии ТВС выступает имитационная модель линии ТВС.

В ходе разработки имитационной модели проведен анализ технологического процесса изготовления ТВС. Изучены операции сборки ТВС, условия их выполнения и перехода к следующей операции, а также операции разборки ТВС в случае возникновения дефектов. Разработана блок-схема процесса изготовления ТВС. Следующим этапом заплани-

рована реализация модели с использованием программного обеспечения QT Creator и ее внедрение в программный комплекс ЦД МФР. Имитация работы линии заключается в проверке условий запуска/останова/нештатных ситуаций на различных участках и аппаратах, имитации работы ЛСУ, контроле зависимости между элементами и правильности выполнения технологических операций, передвижения промежуточных продуктов и вспомогательных компонентов сборки ТВС. Модель имитирует как прямой ход движения продукции при ее высоком качестве, так и обратный ход при обнаружении различных дефектов в тепловыделяющей сборке. Имитация выпуска ТВС с наличием различных дефектов и разборки дефектных ТВС с учетом различных типов нарушений технологических операций позволяет получать информацию для анализа возможных причин выпуска некачественной продукции в ходе работы реального оборудования. В результате работы была разработана имитационная модель технологической линии изготовления ТВС для МФР, состоящая из участков подачи комплектующих, сборки и контроля ТВС, запеналивания ТВС и разборки дефектных каркасов ТВС. Данная модель позволяет проводить анализ процесса изготовления ТВС МФР, учитывая различные параметры, ресурсы и условия каждого этапа сборки ТВС. Использование имитационной модели позволит получить информацию для оптимизации производства, а также проанализировать затраты на производство. Таким образом, модель позволяет имитировать работу линии ТВС в режиме сборки ТВС с учетом потребления ресурсов для выпуска продукции заданного качества, получать информацию для анализа возможностей оптимизации производства, временных и ресурсных затрат.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ ПОРОШКА СО СТЕАРАТОМ ЦИНКА

Хохленков М.Е.¹, Сизов С.И.¹

Научные руководители: Ефремов Е.В.¹, Фейгин А.И.²

*¹Томский политехнический университет (ТПУ),
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, ²АО «Прорыв», г. Москва
E-mail: meh2@tpu.ru*

В рамках проекта «Прорыв», реализуемого госкорпорацией «Росатом», сотрудники Отделения ядерно-топливного цикла ТПУ разрабатывают программный комплекс «Код оптимизации и диагностики технологических процессов (КОД ТП)». Этот комплекс предназначен для имитации работы технологических схем замкнутого ядерного топливно-

го цикла (ЗЯТЦ). Одной из важных операций в ЗЯТЦ является перемешивание смешанного нитридного уран-плутониевого топлива (СНУП-топливо) со стеаратом цинка. Поэтому в комплексе КОД ТП требуется создать модуль, который будет имитировать процесс смешивания порошка со стеаратом цинка. При создании модели в качестве входных были выбраны: частота вращения контейнера (f), размеры гранул ($d_1 \dots d_k$), их массовые доли ($n_1 \dots n_k$), размеры частиц стеарата цинка ($d_{1c} \dots d_{kc}$), их массовые доли ($n_{1c} \dots n_{kc}$), плотность гранулы (ρ), плотность частицы стеарата цинка (ρ_c), конструктивный коэффициент (k), а в качестве выходной – коэффициент налипания K_n , который численно равен отношению площади гранул, покрытых частицами стеарата цинка к общей площади гранул. В качестве основы взята ранее разработанную и внедренную в КОД ТП модель процесса усреднения, дополнив ее следующими соотношениями.

Расчет коэффициента налипания K_n производился по формуле [1]:

$$K_n = \frac{S_{\text{нал}}}{S_{\text{общ}}} = \left(\left(\frac{w_{\text{действ.}}}{w_{\text{необ.}}} \right) \left(\frac{1}{1 + e^{-k \left(\frac{w_{\text{действ.}}}{w_{\text{необ.}}} - 1 \right)}} \right) \right) (1 - e^{-\alpha t}),$$

где $S_{\text{нал}}$ – площадь гранулята, покрытая стеаратом цинка, $S_{\text{общ}}$ – площадь гранулята, $w_{\text{необ.}}$ – массовая доля стеарата цинка, для полного покрытия гранулята, $w_{\text{действ.}}$ – массовая доля стеарата цинка, добавленная в аппарат, k – конструктивный коэффициент, α – константа скорости смешения.

Расчёт необходимой массовой доли стеарата цинка производился по формуле:

$$w_{\text{необ.}} = \frac{N \cdot d^3 \cdot \rho_{\text{ст.}}}{D^3 \cdot \rho_{\text{гр.}} + N \cdot d^3 \cdot \rho_{\text{ст.}}},$$

где N – количество частиц стеарата цинка, для покрытия одной гранулы, D – диаметр частиц гранулята, d – диаметр частиц стеарата цинка, $\rho_{\text{гр.}}$ – плотность гранулы, $\rho_{\text{ст.}}$ – плотность частицы стеарата цинка.

Список использованной литературы

1. Dry mixing and coating of powders – URL: <https://www.researchgate.net/publication/45259158> Dry mixing and coating of powders. – Текст: электронный.

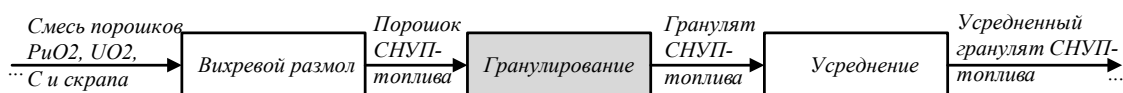
РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УЧАСТКА ГРАНУЛИРОВАНИЯ

Семенов Д.Ю.¹, Сизов С.И.¹

Научные руководители: Ефремов Е.В.¹, Фейгин А.И.²

¹Томский политехнический университет (ТПУ),
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, ²АО «Прорыв», г. Москва
E-mail: dys12@tpu.ru

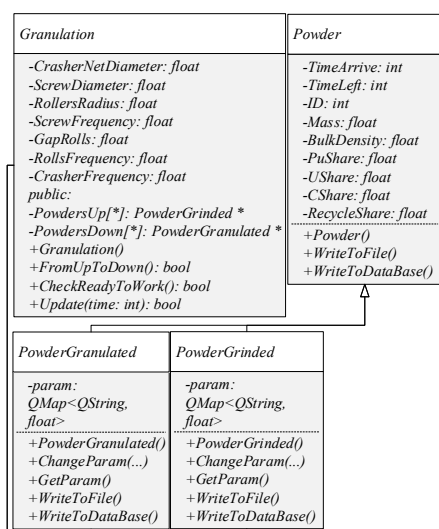
В рамках проекта «Прорыв» госкорпорации Росатом сотрудниками ТПУ разрабатывается программный комплекс КОД ТП. Он предназначен для имитации работы технологических схем замкнутого ядерного топливного цикла. Одним из его процессов является гранулирование смешанного нитридного уран-плутониевого топлива (СНУП-топлива), что объясняет необходимость создания в КОД ТП модуля имитации данного процесса.



Для поиска необходимого в ходе разработки модели распределения гранулята по диаметрам можно воспользоваться распределением Свенсона:

$$f(d) = A e^{-\left(\frac{d}{d_0}\right)^c} \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^{\left(\frac{\rho_{гр} n_{ш} - 1}{k}\right)},$$

где d – диаметр гранул; d_0 – размер отверстий сетки; $\rho_{гр}$ – насыпная плотность гранулята; $n_{ш}$ – частота вращения шнека; c, k, A – параметры распределения.



Для программной реализации данной модели решено было использовать фреймворк QT C++, так как другие модули в КОД ТП к моменту начала разработки модели уже были написаны с помощью упомянутого фреймворка.

Был введен класс Granulation, который описывает общий функционал установки гранулирования. Для этого класса был разработан набор методов, предназначенных для приема входных данных с установки вихревого размолла и передачи данных установке усреднения.

Для передачи информации между установками о составе слоев материала был создан класс Powder. На его основе были разработаны производные классы PowderGrinded и PowderGranulated, которые описывают параметры слоя материала, принятого с установки вихревого размола, и установки гранулирования соответственно.

В результате проведенного исследования была разработана имитационная модель работы участка гранулирования.

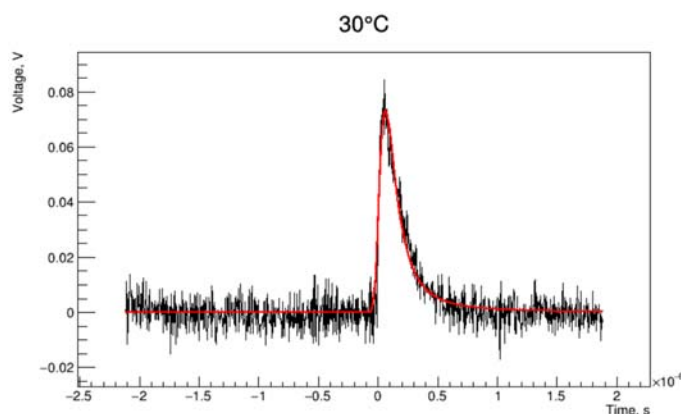
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА SiPM В ФРЕМФОРКЕ ALLPIX²

Флусова Д.С., Бикметов Н.Р.

*Научный руководитель: Гоголев А.С., к.ф.-м.н.
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: dsf7@tpu.ru*

В рамках работы над ЦКП СКИФ встала задача о разработке счетчика рентгеновского излучения с использованием кремниевых фотоумножителей (SiPM) на станции 1–2 «Структурная диагностика» на дифрактометре высокого разрешения. Целью данной работы являлась разработка цифровой модели SiPM серии EQR-15.

Была создана модель SiPM с использованием фреймворка Allpix² [1], который позволяет моделировать полупроводниковые устройства и процессы, происходящие в них. Для генерации спектра, попадающего на сенсор SiPM, был смоделирован сцинтиллятор на основе кристалла LaBr₃ с использованием программного обеспечения GEANT4 [2]. Для обработки экспериментальных данных использовались инструменты CERN ROOT [3].



Моделируемая длительность сигнала при рабочих условиях соотносится с паспортными значениями для выбранного SiPM хорошей точностью.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы «Наука» (Проект № FSWW-2023-0003).

Список использованной литературы

1. Spannagel S. et al. Allpix²: A modular simulation framework for silicon detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2018. V. 901. – P. 164–172.
2. Agostinelli S. et al. Geant4 – a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2003. V. 506. № 3. – P. 250–303.
3. Brun R., Rademakers F. ROOT – An object oriented data analysis framework // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1997. V. 389. № 1–2. – P. 81–86.

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УЧАСТКА ПОДГОТОВКИ И ХРАНЕНИЯ ПРЕСС-ПОРОШКА

Смирнов Л.Ю.¹, Сизов С.И.¹

*Научные руководители: Ефремов Е.В.*¹, *Фейгин А.И.*²

¹Томский политехнический университет (ТПУ),
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, ²АО «Прорыв», г. Москва
E-mail: lys9@tpu.ru

В рамках проекта «Прорыв» госкорпорации Росатом сотрудниками ТПУ разрабатывается цифровой двойник модуля фабрикациирефабрикациии. Среди прочего он предназначен для моделирования процессов, происходящих на участке подготовки и хранения пресс-порошка. Настоящая работа посвящена созданию модели для соответствующего программного блока.

Входными данными для разрабатываемой модели являются гранулометрический состав гранулята, частота вращения и время усреднения. Выход – степень смешения порошка.

Дисперсия распределения целевого компонента по объему загрузки контейнера определяется по формуле $\sigma = (\sum_{i=1}^N (c_i - C)^2 V_i) / (\sum_{i=1}^N V_i)$, где $V_i = M_i / \rho_i$ – объем i -го слоя гранулята; $C_i = m_i / V_i$ – концентрация целевого компонента в i -м слое; $C = (\sum_{i=1}^N m_i) / (\sum_{i=1}^N V_i)$ – концентрация целевого компонента в контейнере, содержащем N слоев гранулята.

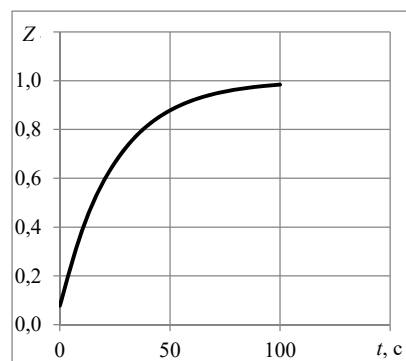
Начальная степень смешения определяется по формуле: $Z_0 = 1 - \sqrt{\sigma/\sigma_0}$, где σ_0 – дисперсия для случая полного разделения компонентов смеси.

Степень смешения в процессе усреднения: $Z = Z_0 + (1 - Z_0)e^{-\Phi t}$, где Φ – эмпирическая константа скорости смешения.

Программа, реализующая модель участка, была написана на языке программирования C++ с использованием фреймворка Qt. Была сформирована следующая система классов, представляющих каждый объект технологического участка: базовый класс для операций участка и классы-наследники, переопределяющие работу некоторых методов базового класса, а также классы для хранения данных о порошке.

Работа модели участка происходит следующим образом: создаются все существующие объекты и установки участка усреднения, выполняется установка атрибутам объектов значений, предусмотренных начальными условиями, запускается цикл по времени, в рамках которого осуществляется ряд проверок, связанных с ходом времени, в результате которых состояние системы обновляется.

В результате работы программа генерирует файлы, содержащие состояния производственного участка и произведенные продукты с их характеристиками. Например, на рисунке представлен график изменения степени смешения при следующих параметрах: $\sigma_{нач} = 0,037$, $\sigma_0 = 0,475$, $n = 30$ об/мин, $k_3 = 0,95$.



ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТОВ ВЫВОДА В СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВНЕШНИХ ПУЧКОВ ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА У400Р

Басс В.И.¹

Научный руководитель: Мышкин В.Ф.², д.ф.-м.н., профессор

¹Объединённый институт ядерных исследований,

Лаборатория ядерных реакций

²Томский политехнический университет,

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

E-mail: vадim2@tpu.ru, vадim2@jinr.ru

Лаборатория ядерных реакций им. Флерова Объединённого института ядерных исследований проводит работы по реконструкции циклотрона У400 в У400Р [1]. В проекте реконструкции ускорителя предусмотрено создание новой системы вывода пучков заряженных частиц. В новой конструкции, после коррекции по углам траектории ускорен-

ных частиц, пучки транспортируются в двух направлениях: к установке SHELS и в Новый экспериментальный зал (НЭЗ). Ускоренный пучок попадает на конечную точку разрабатываемого магнита вывода, который предназначен для согласования горизонтального и вертикального направлений траекторий пучков ионов с осью направления выводного канала системы транспортировки внешних пучков ускорителя.

Расчет новой системы поворотных магнитов транспортировки проводили для пучка ионов $^{48}\text{Ca}^{+9}$, $A/Z = 5.34$, с максимальной жесткостью по рабочей диаграмме $BR = 3.31$ Тл м, с энергией 18.575 МэВ/нуклон и пучок ионов $^{48}\text{Ca}^{+5}$, $A/Z = 9.6$, с жесткостью $BR = 2.99$ Тл м и энергией 4.688 МэВ/нуклон.

В работе приводятся результаты моделирования нескольких вариантов проектируемых магнитов вывода, описываются особенности их конструкций, сравниваются параметры корректирующих магнитов, разработанных для циклотронов ДЦ280 и У400Р. В докладе также демонстрируются:

1) Магнит вывода длиной 200 мм., рассчитанный на угол 3.207° , обеспечивающем радиус поворота центральной траектории 3580 мм.

2) Двухплоскостной поворотный магнит, рассчитанный на магнитное поле 0,4 Тл и предназначенный для коррекции углов частиц в вертикальном и горизонтальном направлениях выводных траекторий.

3) Корректирующие магниты С-образного типа в вертикальном и горизонтальном исполнениях, являющиеся аналогами магнитов, используемых в циклотроне ДЦ280.

Результаты расчетов будут использованы при проектировании системы вывода пучков заряженных частиц циклотрона У400Р.

Список использованной литературы

1. Yu. Ts. Oganessian, G.G. Gulbekyan, B.N. Gikal, I.V. Kalagin et al. "Project of the U400R CYCLOTRON AT THE FLNR JINR", Flerov Laboratory of Nuclear Reaction, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow reg., 141980 Russia, Proceedings of RuPAC XIX, Dubna 2004.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОЙ СОРБЦИИ В ИОНООБМЕННОЙ КОЛОННЕ

Долгих С.С.

*Научный руководитель: Вергун А.П., д.ф.-м.н., профессор-консультант
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: ssd10@tpu.ru*

Способность ионообменного материала существенно концентрировать извлекаемые ионы, в том числе изотопы из различных химических соединений является важным свойством, используемым в технологических процессах водоочистки, разделения, сорбции радионуклидов твердой фазой [1], выделения ценных компонентов из различных сред.

Для получения высокой степени очистки жидких радиоактивных отходов методом ионообменной сорбции, как правило, процесс организуют в два этапа: первым осуществляется обессоливание, а вторым – непосредственное удаление радионуклидов из обессоленных отходов с последующей противоточной регенерацией сорбентов. В целях увеличения производительности фильтров начальная скорость 90–100 м/ч понижается до 10–20 м/ч в конце цикла. Для удаления из отходов цезия, стронция и кобальта, используют добавление селективных сорбентов, чаще всего монтмориллонита (наноглина), что значительно увеличивает степень очистки и получить требуемую величину в 98–99 %. Высокая избирательность селективных ионообменных соединений позволяет обеспечить необходимую степень как выделения, так и дальнейшего концентрирования.

Селективность определяется числом поперечных связей ионообменника, размером его пор, типом функциональных групп, сильно зависит от характеристик внешнего раствора и возрастает при увеличении заряда иона. Коэффициент изотопного разделения на селективном ионообменном материале также значительно выше.

Математическое моделирование данных процессов, протекающих в ионообменных колоннах, с помощью методов регрессионного анализа [2] позволяет учесть основные параметры, которые оказывают наибольшее влияние на процесс сорбции (тип ионообменника, его физико-химические свойства, кинетические параметры процесса, конструктивные особенности колонны), установить их взаимосвязь, оценить вклад каждого параметра, его влияние на величину исследуемой функции.

Применение модифицированных ионообменников с привитыми селективными свойствами значительно повышает эффективность как ионообменной сорбции, так и изотопного обогащения.

Список использованной литературы

1. Research of ceramic matrix for a safe immobilization of radioactive sludge waste // AIP Conference Proceedings. – Tomsk, 2018. – P. 020011.
2. Моделирование и оптимизация разделительных процессов / Л.И. Дорофеева. – Томск: НИ ТПУ, 2008. – 128 с.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ПО СОЗДАНИЮ ТОПОЛОГИИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБЪЕКТА ДЛЯ ПАКЕТА ПРОГРАММ «ЛОГОС»

Суханов Е.А., Чуприков А.И.

*Научный руководитель: Кузнецов М.С., к.т.н., доцент,
Селиваникова О.В., ст. преподаватель
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: eas70@tpu.ru*

Современное развитие технологии позволяет проводить безопасное испытания в различных средах с использованием программ и методов компьютерного моделирования. В данный момент на территории РФ идет процесс импортозамещения иностранного программного обеспечения на отечественное и одним из продуктов, который позволяет проводить моделирование теплопереноса в веществе является «Логос-Тепло».

В пакете программ «ЛОГОС» для расчета применяются различные топологические методы построения моделей. Правильная топология важна для корректных и правильных вычислений. Топологический метод создает прямую зависимость между точностью модели и ресурсами необходимыми для проведения вычисления. Особо влияет метод при триангуляции объемных и многомерных моделей, когда возникает проблема с верификацией расчетов и полученных результатов с реальными данными. Предлагается достичь максимальных моделируемых данных при помощи построения непланарных полигонов различного типа и размеров, принимая во внимание особенности функционирования моделируемого объекта, тем самым перенаправляя ресурсы на важные детали модели. Для снижения затрат ресурсов авторами ранее разработан дополнительный модуль позволяющий проводить параллельно расчеты по теплопроводности и удельной теплоемкости веществ с учетом изменения градиента температуры [2].

Учитывая выше сказанное возникает необходимость в разработке и внедрении модуля позволяющего подготавливать топологическую сетку объекта с использованием различных типов полигонов, чтобы работ-

ник, а в дальнейшем искусственный интеллект, мог самостоятельно определять необходимые участки для более детального моделирования объекта и расчётов. Такой подход позволит сэкономить ресурсы и время.

Список использованной литературы

1. Официальный сайт ПП ЛОГОС / Официальный сайт ПП ЛОГОС [Электронный ресурс] // [сайт]. – URL: <http://www.vniief.ru> (дата обращения: 10.11.2023).

2. Программный модуль по расчету теплофизических свойств диоксида урана / Федеральный институт промышленной собственности [Электронный ресурс] //: [сайт]. – URL: <https://fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=e3c166c6d251647876b851814847319e> (дата обращения: 1.11.2023).

Секция 5

**МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЯДЕРНОМ ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ.
РАДИОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

д.ф.-м.н., профессор В.Ф. Мышкин

ВОЗМОЖНЫЕ НАРУШЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ В ПОЛЕ АЛЬФА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Чеботарев К.Р., Сергеев О.С.

*Научный руководитель: Мышкин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: krc1@tpu.ru¹*

Проблема обращения с радиоактивными отходами стала актуальной из-за роста экологических проблем и потенциального радиоактивного загрязнения. Для минимизации воздействия на окружающую среду и снижения риска для здоровья человека был предложен метод захоронения радиоактивных отходов в геологической среде.

Ключевым аспектом проектирования таких объектов является создание инженерных барьеров безопасности, которые обеспечат безопасное захоронение на протяжении всего срока эксплуатации объекта.

В последние годы глинистые материалы признаны перспективными для использования в инженерных барьерах безопасности.

В процессе моделирования воздействия альфа-излучения на монтмориллонит отслеживаются траектории движения ионизированных частиц в уплотненных слоях. Также моделируются процессы взаимодействия, такие как ионизация, возбуждение, упругое и неупругое рассеяние и образование вторичных частиц.

На основе полученных данных можно отметить следующие изменения, под действием альфа-излучения, глинистых материалов:

- Образование дефектов кристаллической решетки: вакансии, междоузлия и дефекты упаковки, влияют на свойства материала;
- Образование поверхностных повреждений: разрывы и изгибы в слоистых структурах, ухудшает механические характеристики материала;
- Образование вторичные продукты, такие как свободные радикалы и более сложные молекулы, что влияет на химические свойства;
- На зависимость количества радиационных повреждений прямо пропорционально числу облученных частиц, для альфа-частиц с энергией до 2 МэВ;
- Атомы алюминия обладают наибольшей вероятностью выбивания, смещение атома алюминия под воздействием альфа-частицы приводит к изменению зарядового числа на -2 и массового числа на -4 ;
- Радиационное разрушение мишени уменьшается с расстоянием;
- Результаты моделирования согласуются с существующими зависимостями, но имеют неопределённости из-за упрощений в модели.

Список использованной литературы

1. Крупская В.В., Закусин С.В. Определение состава глинистых минералов грунтов методом рентгеновской дифрактометрии // В кн.: Лабораторные работы по грунтоведению / под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королева. Изд. 3-е, испр. и доп. – М.: КДУ, 2017. – С. 120–146.
2. Шлыков В.Г. Рентгеновский анализ минерального состава дисперсных грунтов. – М.: ГЕОС, 2006. – 176 с.

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

Слямбаев Т.Е.¹, Рахимжанова Л.А.²

¹*Национальный университет обороны имени Первого Президента
Республики Казахстан – Елбасы, г. Астана, РК*

E-mail: slyambaev_t@mail.ru

²*Казахский агротехнический исследовательский университет
имени Сакена Сейфуллина, г. Астана, РК*

E-mail: laura-rahimjan@mail.ru

В связи с развитием атомной промышленности в Республике Казахстан, необходимо решать проблемы безопасного обращения с радиоактивными отходами (РАО). К РАО относится облученное топливо и загрязненные радионуклидами элементы конструкций, оснастка, расходные материалы, растворы. На данный момент в РК разработан проект закона «Об обращении с РАО» в связи с планом строительства в республике АЭС. Действующая в РК в настоящее время система классификации РАО удовлетворительно соответствует требованиям радиационной безопасности и обращения на этапах сбора, сортировки, перевозки и хранения РАО в местах их образования и накопления. Но данная система не удовлетворяет требованиям полноты и эффективности на этапах кондиционирования и захоронения РАО.

Основными источниками РАО в РК являются «Казатомпром» и «УМЗ». В результате производственной деятельности уранодобывающих предприятий компании «Казатомпром» образуются только твердые низкорadioактивные отходы (ТРО). Эти ТРО передаются в пункты захоронения РАО (ПЗРО). Вокруг ПЗРО пробурены скважины до первого водоносного горизонта для контроля радиоактивного загрязнения подземных вод.

Размещение РАО, образовавшихся в результате производственной деятельности «УМЗ», производится в сооружениях участка «Хвостовое хозяйство». К ним относятся: пруды-испарители (карты), могильник для

РАО, полученных в ходе переработки концентратов тория и тетрафторида, могильник для хранения радиоактивных экстрагентов и масел, могильники для хранения низко- и среднеактивных ТРО и отработанных ампульных источников ионизированного излучения.

В настоящее время основная деятельность по обращению с РАО сводится к их сбору, сортировке и размещению на хранение. Переработка РАО осуществляется в недостаточной степени. В докладе обсуждаются мероприятия, которые необходимо проводить с учетом требований законодательства РК по каждому из классов РАО. Анализируются проблемы выбора и разработки технологии переработки, отверждения и захоронения в дальнейшем, исходя из класса опасности РАО и специфики деятельности каждого предприятия.

ИЗОТОПНЫЙ ЭФФЕКТ РАДИКАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Зарыкбаева К.С., Нурғалиев Д.Н., Смаилов Д.Е.

*НАО университет имени Шакарима, г. Семей, РК
E-mail: Kamshat.ru@mail.ru, daniarsemei@mail.ru, smlvdr8@gmail.com*

В связи с постоянным расширением потребности в стабильных изотопах в таких отраслях, как медицина, биология, материаловедение, спинтроника, квантовые вычисления актуален поиск инновационных методов и технологий получения изотопной продукции.

Известен магнитный изотопный эффект (МИЭ), открытый Бучаченко А.Л., Молиным Ю.Н. и др., в котором химическая реакция между двумя радикалами, протекающая в слабом постоянном магнитном поле, селективна по изотопам, отличающихся ядерным спином. При высоком коэффициенте однократного разделения, МИЭ не требует использования больших энергетических затрат. Задача исследования – поиск процессов, в котором целевой продукт остается в жидкой фазе.

Если в процессе, в котором наблюдается МИЭ, целевой изотоп остается в жидкой фазе, то такой процесс можно реализовывать в виде каскадной технологии. При этом исключается процесс фазового перехода, требующий больших затрат энергии. Обогащенное по целевому изотопу соединение можно повторно подвергать фотолизу в слабом магнитном поле. В разделительном каскаде можно получить заданную концентрацию целевого изотопа в продуктах радикальных процессов.

Для формирования каскада необходимо ускорять реакции радикалов с целевым изотопом, приводящих к восстановлению исходного соединения. При этом каскад представляет собой одноступенчатую уста-

новку, в которой периодически изменяют, например, величину магнитного поля и/или температуру. Это связано с тем, что из-за изменения изотопного состава рабочей жидкости изменяется значение частоты столкновения радикалов – осколков рабочей жидкости, содержащих целевой изотопов.

В докладе анализируются физико-химические процессы и парамагнитные явления, наблюдающиеся в каскадной технологии. Например, приводятся результаты анализа радикальных процессов при фотолитизе различных жидких систем, находящихся в слабом магнитном поле. Известно, что радикалы с изотопами со спиновым ядром быстрее формируют химическую ковалентную связь. При взаимодействии изотопов одного химического элемента более вероятны химические реакции между радикалами, содержащими разные изотопы, чем одинаковые. Также приводятся результаты экономического анализа – анализируются затраты энергии на получение максимального обогащения рабочей жидкости. Показываются экономически обоснованные технологические параметры каскада.

СВОЙСТВА ОБОГАЩЕННЫХ ПО ИЗОТОПАМ МАТЕРИАЛОВ

Рахимжанова Л.А., Жаламан С.Е.

*Казахский агротехнический исследовательский университет
имени Сакена Сейфуллина, г. Астана, РК
E-mail: laura-rahimjan@mail.ru, sungat.zholaman@mail.ru*

В РФ и странах Запада используется эффективная технология центрифужного разделения изотопов большинства химических элементов. В США запускается ещё более эффективная технология SILEX для разделения изотопов урана. Поэтому актуальны исследования по поиску новых областей эффективного применения изотопных материалов.

Задача исследования связана с обзором научных статей, посвященных использованию обогащенных по изотопам материалов. При этом будут видны наиболее эффективные области технологий и методов применения модифицированных по изотопам материалов.

Все физико-химические свойства вещества соединений в разной мере зависят от изотопного состава. Большинство изотопных эффектов оказываются очень маленькими. Наиболее яркое проявление изотопного эффекта связано с температурами плавления и кипения воды, содержащей H и D. Наблюдается снижение температуры плавления Ge при увеличении массы изотопа. Описаны различия в значениях параметра кристаллической решетки, и коэффициента теплового расширения,

различие в температуре кристаллизации расплавов, температуры перехода в сверхпроводящее состояние природного и обогащенного по изотопам веществ.

Из-за случайного распределения изотопов, в кристаллах образуются неоднородности, характеризующиеся изотопическим беспорядком, которые подтверждаются экспериментальными данными.

Самыми распространенными конструкционными материалами являются сплавы железа. Однако, в литературе приводятся лишь немногочисленные сведения о различии свойств железа разного изотопного состава. Например, при окислении железа природного изотопного состава и обогащенного по ^{57}Fe до 95.1%, по данным рентгенофлуоресцентного анализа, содержание кислорода на поверхности ^{57}Fe оказалось ниже предела обнаружения, а для природного железа оно составило 10–13%. Вероятной причиной отличия процесса окисления может быть связано с различием спинов ядер ^{56}Fe и ^{57}Fe .

Из-за различия в энергии колебания кристаллической решетки материалов с различным изотопным составом параметр кристаллической решетки, содержащей легкий изотоп больше, чем тяжелый. В то же время коэффициент теплового расширения кристалла с легким изотопом меньше. При этом максимальное различие в значениях коэффициента теплового расширения наблюдается при криогенных температурах.

В докладе приводятся результаты обзора литературы по высоким изотопным эффектам и областей наиболее эффективного применения изотопных материалов.

РАСЧЕТ ПОГЛОЩЁННОЙ ДОЗЫ В ИОНООБМЕННОЙ СМОЛЕ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ЛЮТЕЦИЯ-177 ОТ ИТТЕРБИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА GEANT4

Чертков М.С., Осокин А.А.

*Научный руководитель: Тимченко С.Н., к.т.н., доцент
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: msc6@tpu.ru*

Лютеций-177 (^{177}Lu) относится к числу наиболее перспективных радионуклидов, служащих основой для производства инновационных радиофармацевтических лекарственных препаратов. В настоящее время изучается возможность использования ^{177}Lu практически во всех классах соединений, используемых в радионуклидной терапии. Пока только один препарат

(^{177}Lu -DOTA-TATE) получил одобрение на клиническое использование, лабораторные исследования ведутся еще для 19 препаратов [1].

Существуют разные методы наработки лютеция, один из которых непрерывной реакторный способ [2]. Мишень из оксида иттербия $\text{Yb}^{2}\text{O}^{3}$, обогащенная до 99,999 % по изотопу ^{176}Yb , облучается на среднепоточном реакторе (с максимальной плотностью потока тепловых нейтронов $2 \cdot 10^{14}$ н/(см²·с)) ИРТ-Т потоком тепловых нейтронов на протяжении 3-х суток. После процесса облучения мишень выдерживают, растворяют в соляной кислоте HCl и полученный раствор пропускают через ионообменную колонку для разделения лютеция от иттербия.

При разделении радиоактивных элементов методом ионообменной хроматографии существует проблема негативного влияния воздействия ионизирующего излучения на смолу. Так, при значениях поглощенной дозы около 1 МГр начинает падать объемная емкость за счет разрушения материала ионита.

Для расчета мощности поглощенной дозы на катионообменной смоле при разделении изотопов лютеция и иттербия была написана программа. В ней построены модели хроматографической колонки, заполненной ионообменником, и источника излучения. Полученные спектры гамма- и бета-излучения лютеция-177 хорошо согласуются с известными экспериментальными спектрами. Для моделирования было проведено 10^6 распадов ^{177}Lu . При прохождении через колонку всей активности (1181,9 ГБк) средняя поглощенная доза составила 3,04 кГр. Ионообменная смола не была повреждена, и обменная емкость, возможно, не пострадала, поскольку средняя поглощенная доза была меньше теоретического значения.

Список использованной литературы

1. Кузнецов Р.А., Бобровская К.С., Светухин В.В. [и др.]. Производство лютеция-177: технологические аспекты // Радиохимия. – 2019. – Т. 61, № 4. – С. 273–285. – DOI 10.1134/S0033831119040014.
2. Патент № 2573475 С2 Российская Федерация, МПК G21G 4/04, G21G 4/08, C01F 17/00. Способ получения высокочистых соединений ^{177}Lu , свободных от носителя, а также соединения ^{177}Lu , свободные от носителя : № 2013155710/05 : заявл. 12.04.2012 : опубл. 20.01.2016 / С. Маркс, М. Харфенштеллер, К. Жерносеков, Т. Никула ; заявитель ИТМ ИЗОТОПЕН ТЕХНОЛОГИЕН МЮНХЕН АГ. – EDN KFDEMY.

ЭКСТРАКЦИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАФТЕНОВОЙ КИСЛОТОЙ

Киеу Б.Т.

*Научный руководитель: Карелин В.А., д.т.н., профессор
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: bachthuan@tpu.ru*

Нафтеновая кислота является относительно дешевым экстрагентом, который используется в гидрометаллургии для извлечения и разделения катионов цветных металлов. Свойства нафтеновой кислоты в углеводородном кольце которой содержится пять атомов углерода (рис. 1) позволяют использовать ее для экстракционного извлечения и разделения не только цветных, но и редкоземельных элементов (РЗЭ) [1].

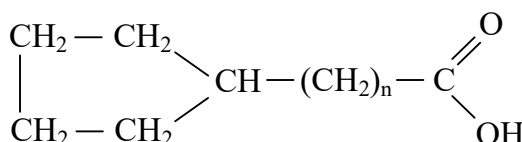
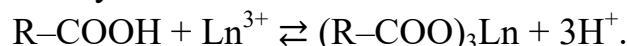
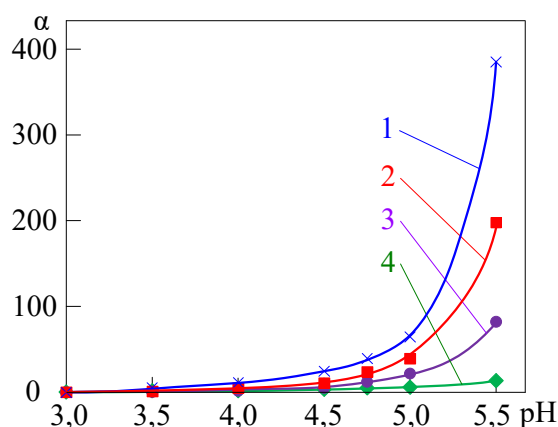


Рис. 1. Структура нафтеновой кислоты

Процесс экстракции нафтеновой кислотой протекает по катионообменному механизму:



Выполнены исследования по экстракционному извлечению La, Ce, Nd и Sm из нитратных растворов в зависимости от pH среды (рис. 2).



1 – Sm; 2 – Nd; 3 – Ce; 4 – La

Рис. 2. Влияние pH на коэффициент распределения α РЗЭ

Из рис. 2 видно, что нафтеновая кислота является эффективным экстрагентом РЗЭ, с увеличением порядкового номера РЗЭ коэффициент распределения α резко возрастает. При увеличении рН от 3 до 5,5 α_{Sm} возрастает примерно на порядок быстрее, чем α_{La} . Используя эту зависимость, можно отделять элементы Y-подгруппы от цериевой, а также разделить РЗЭ внутри подгрупп.

Список использованной литературы

1. Singh D.K., Singh H., Mathur J.N. Extraction of rare earths and yttrium with high molecular weight carboxylic acids / Hydrometallurgy. – 2006, V. 81. – P. 174–181.

ЭКСТРАКЦИЯ ВОЛЬФРАМАТ-ИОНОВ В СИСТЕМЕ АНТИПИРИН-СУЛЬФОСАЛИЦИЛОВАЯ КИСЛОТА

Найверт Е.С.

*Научный руководитель: Карелин В.А., д.т.н., профессор
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: esn8@tpu.ru*

Для определения вольфрама используют тиоционат и дитиол, с которыми W образует комплексные соединения. В 10 М HCl комплекс с дитиолом экстрагируют амилацетатом и бутилацетатом, а тиоционатный комплекс экстрагируют диэтиловым и изопропиловым эфирами [1]. Осадок купферата вольфрама извлекают изоамиловым спиртом в среде 3 М H₂SO₄.

Нами проведены исследования по извлечению WO₄²⁻-ионов в органическую фазу в системе антипирин(АП)-сульфосалициловая кислота (ССК)-H₂O в присутствии неорганических кислот, оснований и высаливателей. При изучении экстракции WO₄²⁻-ионов в системе АП-ССК-H₂O выпадает осадок за счет образования вольфрамовой кислоты. Проведены исследования по распределению W (100 мкг) между органической и водной фазами. Показано, что максимальная степень извлечения WO₄²⁻ (76,6 %) достигается при введении в систему 1 М раствора HCl.

При увеличении кислотности уменьшается извлечение и происходит гомогенизации смеси за счет взаимодействия кислоты с антипирином. При добавлении 1 М раствора NaOH степень извлечения составляет 67,3 %. При добавлении большего количества NaOH взаимодействует с ССК, за счет чего снижается объем органической фазы и происходит гомогенизация. Зависимость степени извлечения от кислотности среды приведена на рис. 1.

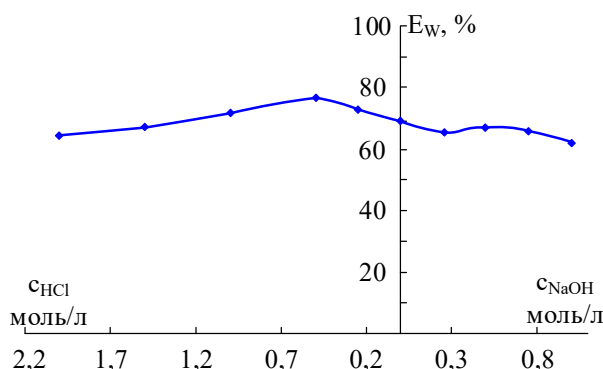


Рис. 1. Зависимость степени извлечения $1 \cdot 10^{-5}$ М WO_4^{2-} от кислотности в системе АП-ССК- H_2O ($C_{АП} = 0,60$ М, $C_{ССК} = 0,30$ М; $C_{HCl} = 1,0$ М; $C_{NaOH} = 1,0$ М)

Система существует в диапазоне рН = 1,09–1,85, за пределами которого происходит гомогенизация. Оптимальное значение рН = 1,38.

Список использованной литературы

1. Elwell W.T., Wood D.F. Analytical chemistry of molybdenum and tungsten // Pergamon Press. – 1971. – P. 31–32.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ АНИОНА НА ЭКСТРАКЦИЮ РЗМ КАРБОНОВЫМИ КИСЛОТАМИ

Силин Г.Е.

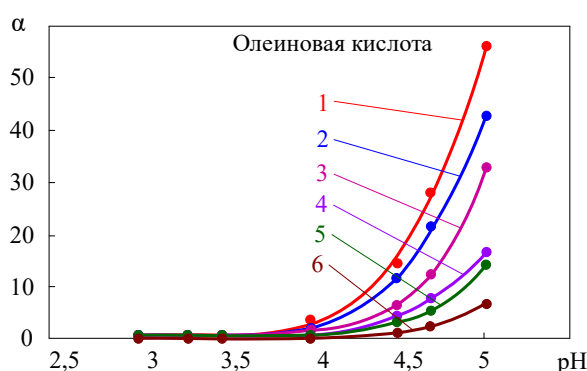
Научный руководитель: Карелин В.А. д.т.н., профессор
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: ges1@tpu.ru

При катионообменной экстракции карбоновыми кислотами неорганические анионы не переходят в органическую фазу (ОФ) [1]. Природа аниона кислоты в водной фазе влияет на ход зависимости $\lg \alpha = f(\text{pH})$. Это связано с различной способностью катионов к комплексообразованию в водной фазе с разными анионами. Сравнивая ΔG°_T образования катионов лантанидов и их комплексов с анионами можно сделать вывод о том, что в сульфатной среде основная форма существования лантанида – его комплекс с SO_4^{2-} -ионом $LnSO_4^+$ или $Ln(SO_4)_2^-$.

При переходе от нитратной среды к хлоридной оказывает экстрагируемость Се возрастает за счет образования в растворе прочных комплексов $SeCl_x^{3-x}$. При увеличении концентрации Cl^- -ионов резко снижается коэффициент распределения церия α_{Ce} и других лантанидов, в тоже

время у Y^{3+} этого не происходит из-за того, что образование хлоридных комплексов него менее характерно.

При низких значениях pH и концентрации экстрагента различия в α_{Ce} и α_Y при экстракции олеиновой кислотой не сказываются из-за того, что эти РЗЭ не извлекаются в ОФ. При увеличении pH и концентрации экстрагента коэффициент распределения возрастает и проявляются различия в поведении Ce^{3+} и Y^{3+} в различных средах (рис. 1). α_Y в нитратной и хлоридной средах близки. Переход Y в ОФ в сульфатных растворах происходит заметно хуже. При экстракции Ce при замене аниона-лиганда с нитрата на хлорид и, затем на сульфат коэффициента распределения постепенно уменьшается.



1 – $Ce-NO_3^-$; 2 – $Ce-Cl^-$; 3 – $Ce-SO_4^{2-}$; 4 – $Y-NO_3^-$; 5 – $Y-Cl^-$; 6 – $Y-SO_4^{2-}$

Рис. 1. Зависимость α_{Ce} и α_Y от pH водной фазы для нитратной, хлоридной и сульфатной сред при экстракции 0,5 М растворами олеиновой и нафтеновой кислоты в о-ксилоле

Список использованной литературы

1. Miller F. Carboxylic acids as metal extractants // Talanta. 1974. V. 21. P. 685–703.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ЛИНИЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ, ВЫВЕДЕННЫХ ИЗ ЦИКЛОТРОНА У400Р

Басс В.И.¹

Научный руководитель: Мышкин В.Ф.², д.ф.-м.н., профессор

¹*Объединённый институт ядерных исследований, ЛЯР, г. Дубна*

²*Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30*

E-mail: vadim2@tpu.ru, vadim2@jinr.ru

Циклотронный комплекс U400 эксплуатируется в ЛЯР ОИЯИ с 1985 года. В настоящее время комплекс готовится к реконструкции, которая включает в себя модернизацию основных узлов циклотрона, а также создание новой системы транспортировки частиц по каналам, ведущим в два основных направления: к установке SHELS и в новый экспериментальный зал (НЭЗ) [1].

В проекте реконструкции циклотрона U400 предполагается транспортировка пучков заряженных частиц до поворотного магнита ТМ1, где с нулевым поворотом пучок частиц направляется в НЭЗ, а для транспортировки к установке SHELS траектория пучка частиц поворачивается на угол $40,6^\circ$. Транспортировка выведенных пучков в НЭЗ осуществляется после поворотного магнита ТМ1 до разводящего магнита ТМ5, после которого пучки частиц направляются на различные физические установки. Элементами линии транспортировки являются поворотный магнит ТМ2, осуществляющий поворот пучка в горизонтальном направлении, и вертикальные поворотные магниты ТМ3 и ТМ4. Компоновка магнитной системы линий транспортировки представлена на рис. 1.

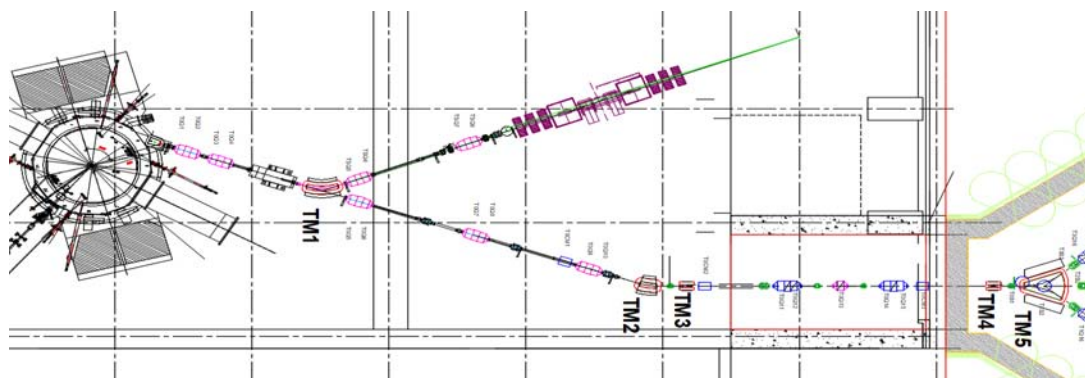


Рис. 1. Компоновка каналов транспортировки пучков от циклотрона У-400Р к установке SHELS и к установкам в НЭЗ

Результаты расчетов будут использованы при проектировании линий транспортировки пучков заряженных частиц от циклотрона У400Р. В докладе приводятся результаты расчетов трехмерных поворотных магнитов ТМ как части магнитной системы линий для транспортировки получаемых пучков заряженных частиц и обсуждаются особенности процедуры расчета.

Список использованной литературы

1. Yu. Ts. Oganessian, G.G. Gulbekyan, B.N. Gikal, I.V. Kalagin et al. "Project of the U400R CYCLOTRON AT THE FLNR JINR", Flerov Laboratory of Nuclear Reaction, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow reg., 141980 Russia, Proceedings of RuPAC XIX, Dubna 2004.

ЛИНИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ ДЛЯ НОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗАЛА ЦИКЛОТРОНА У400Р

Басс В.И.¹

*Научный руководитель: Мышкин В.Ф.*², д.ф.-м.н., профессор

¹Объединённый институт ядерных исследований,

Лаборатория ядерных реакций

²Томский политехнический университет,

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

E-mail: vadim2@tpu.ru, vadim2@jinr.ru

Основная деятельность Лаборатории ядерных реакций имени Флерова, связана с фундаментальной наукой. В настоящее время в лаборатории продолжаются работы по реконструкции циклотрона У400, обеспечивающего исследования по трем основным направлениям физики тяжелых ионов: синтез тяжелых и экзотических ядер, исследования ядерных реакций и исследования взаимодействия вещества с тяжелыми ионами. После реконструкции циклотрон У400 будет называться У400Р [1]. Для У400Р необходимо разработать и рассчитать новую схему линий транспортировки ионов от У400Р к мишеням, расположенным в новом экспериментальном зале (НЭЗ).

Для расчета проектируемых поворотных магнитов системы транспортировки были взяты пучок ионов $^{48}\text{Ca}^{+9}$, $A/Z = 5.34$, с максимальной жесткостью по рабочей диаграмме $BR = 3.31 \text{ Т}\cdot\text{м}$, с энергией 18.575 МэВ/нуклон и пучок ионов $^{48}\text{Ca}^{+5}$, $A/Z = 9.6$, с жесткостью $BR = 2.99 \text{ Т}\cdot\text{м}$ и энергией 4.688 МэВ/нуклон.

В состав каналов входит коммутирующий магнит ТМ5 с индукцией переменного магнитного поля до 1,3 Тл, который позволяет поворачи-

вать пучок на три направления: на углы 0° и $\pm 40^\circ$, что обеспечивает транспортировку ионов к трем экспериментальным установкам. Коррекция пучков осуществляется СМ-корректирующими магнитами (СМ-corrective magnet), а фокусировка обеспечивается дублетами квадрупольных линз $T_x Q_y$, имеющих градиенты магнитного поля до 7,7 Тл/м. Это позволяет сформировать пучок частиц диаметром 1 см в зоне облучения образца [2].

Результаты расчетов будут использованы при проектировании линий транспортировки пучков заряженных частиц от коммутирующего магнита (turning magnet) ТМ5, разделяющего пучки частиц по трем основным каналам транспортировки, до установок с мишенями.

Список использованной литературы

1. Oganessian Yu. Ts., Gulbekyan G.G., Gikal B.N., Kalagin I.V. et al. "Project of the U400R Cyclotron at the FLNR JINR", Flerov Laboratory of Nuclear Reaction, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow reg., 141980 Russia, Proceedings of RuPAC XIX, Dubna, 2004.
2. Kalagin I.V. et.al., Heavy ion cyclotrons of FLNR JINR – status and plans / Proc. of 26th Russian Particle Accelerator Conference, Protvino, Russia, Oct. 2018. – P. 60–64, doi:10.18429/JACoW-CYCLOTRONS2019-FRB02.

ЕМКОСТЬ КАТИОННОГО ОБМЕНА ПРИРОДНОЙ И ОБЛУЧЕННОЙ ГЛИНИСТОЙ СМЕСИ

Капокова А.Р., Оммик А.К., Ван Ц.

Научный руководитель: профессор ТПУ Мышкин В.Ф.

Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: ark18@tpu.ru, akob@tpu.ru

Глина широко используется при создании инженерного барьера безопасности при захоронении ядерных отходов. Известны работы по исследованию влияния радиации на физико-химические свойства глины. Однако, недостаточно изучено воздействие радиации на свойства глины. ЕКО определяет барьерные свойства глинистых смесей. Поэтому актуальны исследования, связанные определением взаимосвязи поглощенной дозы и барьерных свойств. Ставилась задача измерения и сравнения значения показателей, определяющих барьерные свойства природной и облученной глин, например, емкость катионного обмена (ЕКО).

Для экспериментальных значений нами использовалась смесь глин, содержащая минералы монтмориллонит, каолинит, вермикулит. Эта смесь облучалась γ -излучением изотопа ^{60}Co до поглощенной дозы

0,3 МГр. Смесь находилась при комнатной температуре и атмосферном давлении. Плотность облучаемой смеси составляла $1,4 \text{ г/см}^3$.

ЕКО высушенной глины определяли по ГОСТ 17.4.4.01-84. Экспериментально получено значение ЕКО природной глины составляло 26,725 (мг экв.)/100 г. В результате радиационного воздействия на глину её ЕКО уменьшилась на 8,725 (мг экв.)/100 г. Известно, что ЕКО определяется удельной поверхностью частиц глины и количеством противоионов между пакетами минерала. Также известно, что ионизирующее излучение приводит к формированию точечных дефектов в структуре минерала. Известна публикация, в которой показано, что полная аморфизация (разрушение кристаллической структуры) глинистого минерала происходит, при облучении бета-частицами, происходит при поглощенной дозе около 10^{10} Гр. Поэтому разрушения, получаемые минералами при поглощенной дозе гамма-излучения 0,3 МГр, не столь значительны.

В докладе анализируются причины уменьшения величины ЕКО. Например, изменение ЕКО может произойти в результате уменьшения удельной поверхности глины. Второй причиной изменения ЕКО может быть изменение заряда железа, содержащегося в пакетах глинистого минерала, в результате взаимодействия с гамма-излучением. Из сертификата на используемую смесь видно, что содержание оксида железа составляет 3,85 %. Также теоретически анализируются возможное влияние температуры и давления на радиационное разрушение различных минералов. Эти условия связаны с возможным «отжигом» минерала, определяющем конечную концентрацию дефектов.

ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФфуЗИИ ПРОТивоИОНОВ ПРИ ПОЯВЛЕНИИ РАЗРЫВА ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В СТРУКТУРЕ ГЛИНИСТОГО МИНЕРАЛА

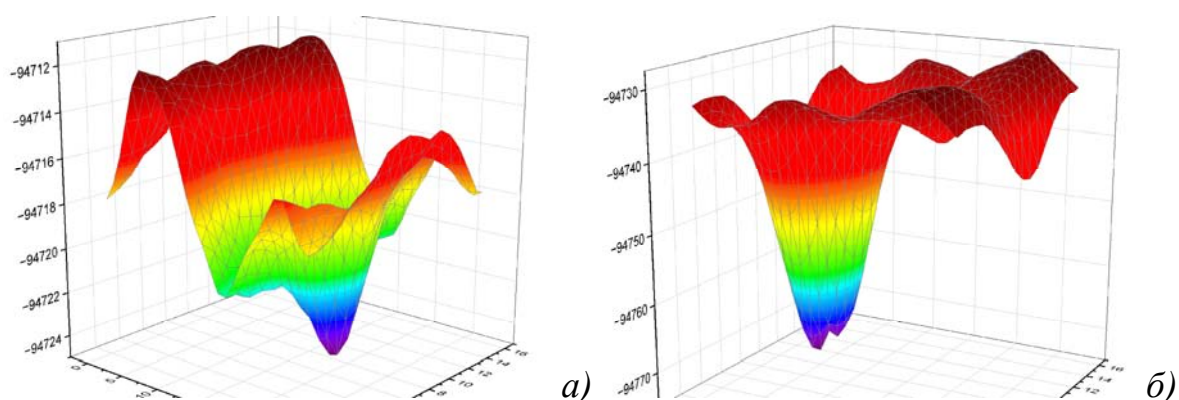
Шукшина Д.Д., Ван Цайлунь

*Научный руководитель: Мышкин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: dds17@tpu.ru*

Для создания инженерных барьеров безопасности при захоронении радиоактивных отходов (РАО) используют смеси, обогащенные монтмориллонитом. При контакте с РАО в кристаллической структуре минерала появляются дефекты, которые ухудшают его барьерные свойства. Это увеличивает вероятность попадания радионуклидов в окружающую среду.

Квантово-химическое моделирование позволяет имитировать различные дефекты. Анализировали влияние вакансии в тетраэдрическом слое минерала на его барьерные свойства. Materials Studio контролирует количество молекулярных орбиталей. Поэтому для заполнения недостающих ковалентных связей использовали радикалы $\bullet\text{H}$ или $\bullet\text{OH}$.

Путем квантово-химического моделирования рассчитывали энергию взаимодействия ионов Na^+ , Li^+ , Cs^+ , Rb^+ , находящихся между пакетами монтмориллонита, с расчетной ячейкой. Суперячейка, использованная для расчетов, содержала один пакет из 3×3 ячеек. Результаты расчетов приведены на рисунках: а – исходный минерал, б – минерал с дефектом.



Из рисунков видно, что, для исходного минерала, в котором отсутствует вакансия, потенциальная яма наблюдается в точке замены Al^{3+} на ион Mg^{2+} в октаэдрическом слое, в связи с появлением заряда. Глубина ямы составляет 3 эВ для одного моля расчетных ячеек.

При наличии дефекта формируется более глубокая яма, чем в исходной структуре. При этом глубина ямы равна 30 эВ. Логично предположить, что при этом коэффициент диффузии катионов должен уменьшаться из-за продолжительного нахождения катиона в этой точке, представляющей для катиона потенциальную яму. Это противоречит экспериментальным результатам. В докладе анализируются возможные причины несоответствия экспериментальных данных расчетным результатам.

ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ГИПЕРСКОРОСТНОЙ ГАЗОВОЙ ЦЕНТРИФУГИ ИГУАССУ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ ЦЕЛЕВОГО ИЗОТОПА В ПОТОКЕ ОТБОРА

Васильев А.В.

Научные руководители: Боговалов С.В., д.ф.-м.н., профессор;

Тронин И.В., к.ф.-м.н., доцент

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,

115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

E-mail: AVVasilev@mephi.ru

У современных центрифуг, применяющихся для разделения изотопов урана, скорость вращения ротора достигает порядка 900 м/с, согласно открытым данным. В обозримом будущем могут быть созданы материалы, позволяющие достичь скоростей свыше 1000 м/с. Однако вопросы об оптимальных режимах работы таких гиперскоростных газовых центрифуг (ГГЦ), при которых достигается оптимальная (максимально возможная) разделительная способность ΔU , как функция от таких параметров как давление на стенку ротора P , поток питания F , перепад температуры на единицу длины ΔT на торцах ротора и мощность газового трения W [1], остаются открытыми.

С другой стороны, скорости вращения более 1000 м/с позволяет надеяться на получение концентрации целевого компонента более 5 % без использования каскадов. В данной работе проведены оптимизационные расчеты, при которых дополнительным критерием являлось получение концентраций изотопа урана-235 в потоке отбора C_p фиксированной величины.

В качестве первого этапа были проведены численные расчёты по поиску оптимальных режимов работы в ГГЦ при условии, что концентрация в потоке отбора C_p была зафиксирована от 1 до 5 %. Было установлено, что оптимальная разделительная способность ΔU убывает линейно с увеличением концентрации C_p , уменьшаясь в этом промежутке примерно в три раза.

На втором и третьем этапе исследования, были получены оптимальные режимы от длины L в диапазоне от 1 до 5 м и скорости вращения ротора v от 1000 до 1500 м/с, при условии, что концентрация изотопа урана-235 в потоке отбора $C_p = 5$ %.

Список использованной литературы

1. Glaser A. Characteristics of the gas centrifuge for uranium enrichment and their relevance for nuclear weapon proliferation // Science & Global Security. – 2008. – Т. 16. – № 1–2. – С. 1–25.

2. Doneddu F., Roblin P., Wood H.G. Optimization studies for gas centrifuges // Separation Science and Technology. – 2000. – Т. 35. – № 8. – С. 1207–1221.

ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ КАТИОНОВ НА ИХ КОЭФФИЦИЕНТ ДИФФУЗИИ ЧЕРЕЗ ГЛИНИСТЫЕ МИНЕРАЛЫ

Ван Ц., Шукшина Д.Д., Атутова Я.Е.

*Научный руководитель: профессор ТПУ Мышкин В.Ф.
Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: yeab@tpu.ru*

Изучение взаимодействия радионуклидов с глинистыми минералами представляет собой актуальное направление, влияющее на безопасность хранения радиоактивных отходов. С увеличением объемов радиоактивных отходов необходимо не только оптимизировать методы их захоронения, но и предсказывать возможные пути миграции радионуклидов в глубоких слоях Земли. В настоящее время недостаточно изучены процессы взаимодействия катионов радионуклидов с глинами в различных условиях.

Мы моделировали процесс диффузии катионов через уплотненный слой набухшей глины в программе Materials Studio. Использовался Na-вермикулит, у которого между пакетами глины содержится Na^+ . При этом часть межпакетных ионов натрия заменяли на ионы Cs^+ или Rb^+ , имеющими эквивалентный заряд. Также заменяли два иона натрия на один двухвалентный катион Mg^{2+} или Ba^{2+} .

Моделирование методом молекулярной динамики проводили при условии постоянной плотности глины. Расчеты показывают, что катионы в межпакетном пространстве глины распределены не равномерно, а сгруппированы в слои. Также видно, что катионы распределены неравномерно в межпакетном пространстве. Это связано с тем, что в изучаемой нами расчетной модели атомы Si, находящиеся в тетраэдрах, замещены на Al лишь на одной стороне пакета глины. При этом катионы сильнее адсорбируются поверхностью с одной стороны пакета, содержащего большее количество замененных атомов пакета.

Перемещение катионов в межпакетном пространстве глины с одной точки в другую точку возможна при условии, если энергия их тепловых колебаний превышает величину потенциальной ямы. При этом концентрация зарядов тетраэдрического слоя пакета вермикулита, которая определяет энергию взаимодействия с ионами, оказывает наибольшее изменение коэффициента диффузии катионов при изменении температуры.

Установлено, что влияние температуры на диффузию воды намного больше, чем на миграцию катионов. При низкой гидратации глин температура незначительно влияет на диффузию воды и катионов, а размер и масса гидратированного иона оказывают сильное влияние на его диффузию между пакетами и сорбцию. В докладе приводятся ре-

зультаты расчетов коэффициента диффузии между пакетами разных ионов и обсуждаются полученные результаты моделирования; обосновываются причины взаимного влияния катионов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ В ПОЛЕ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Сергеев О.С., Чеботарев К.Р.

*Научный руководитель: Мышкин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск*

В свете резкого обострения экологических проблем во второй половине XX века, включая вероятность радиоактивное заражения, вопрос обращения с радиоактивными отходами стал предметом особого внимания. Глинистые материалы являются наиболее перспективными, когда рассматривается вопрос о конструировании хранилищ для радиоактивных отходов (РАО).

Глинистые минералы подвергаются эрозионному проникновению радиоактивных отходов при глубинном захоронении РАО. Ионизирующее излучение РАО и пучки тяжелых ионов формируют в глине дефекты, которые вызывают изменения физико-химических свойств вышеупомянутых материалов. Поэтому необходимо исследовать процесс разрушения глинистых материалов для обеспечения требуемых характеристик и предсказуемости их поведения на протяжении всего жизненного цикла объекта консервации или захоронения РАО, выполненного с применением глинистых материалов.

В докладе приводятся результаты моделирования радиационных повреждений минерала монтмориллонит в поле β -излучения. Определена зависимость количества образовавшихся вакансий в мишени, имитирующей монтмориллонит (ММТ), от поглощенной дозы. Показана линейная зависимость количества радиационных разрушений от поглощенной дозы в диапазоне 0–0,4 МГр. Очевидно, что количество выбиваемых атомов пропорционально их концентрации и сечению взаимодействия с бета-частицами. При этом количество выбитых атомов разного вида существенно отличаются из-за отличия их концентраций. Определены конечные координаты атомов, выбиваемых из решетки мишени под воздействием ионизирующего излучения, что позволяет определять, атомы каких элементов в ММТ наиболее чувствительны к воздействию β -излучения и какие области пакетов минерала наиболее чувствительны к излучению.

Наблюдается радиационное разрушение как минерала, так и молекул воды. При этом радикалы Н и ОН из межпакетного пространства как легко «закрывают» оборванные химические связи минерала, так и сами «атакуют» поверхность пакета. Атомы Al, большая часть из которых располагаются в октаэдрическом слое пакета, выбивается наиболее часто.

В тетраэдрическом слое возможно взаимодействие радикалов Н и ОН как с вакансией Al, так и разрушение «целой» части пакета. Вакансии Al в октаэдрическом слое не могут так легко образовать новую химическую связь. Однако существует вероятность заброса, при ударе с налетающей частицей, радикалов Н и ОН в область вакансии Al в октаэдрическом слое.

Исходные координаты выбиваемых изотопов неравномерно распределены по глубине мишени.

ПОЛУЧЕНИЕ ТРИФТОРИДА ПЛУТОНИЯ

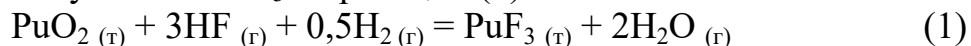
Синько Н.С.

*Научный руководитель: Жерин И.И., д.х.н., профессор
ФГУП «ГХК», 662972, Россия, г. Железногорск, ул. Ленина, д. 53
E-mail: natalisee@list.ru*

Замыкание ядерного топливного цикла – одна из ключевых задач для сегодняшней атомной энергетики. Одним из направлений по решению данной задачи является создание жидкостного, на основе расплава фторидов, жидкосолевого реактора (ЖСР) для трансмутации минорных высоко радиоактивных актинидов, основную массу которых составляют Am, Np, Cm. В этих расплавах в качестве инициатора трансмутации минорных актинидов применяют нелетучий трифторид плутония [1].

Исходное соединение для гидрофторирования представлено PuO₂.

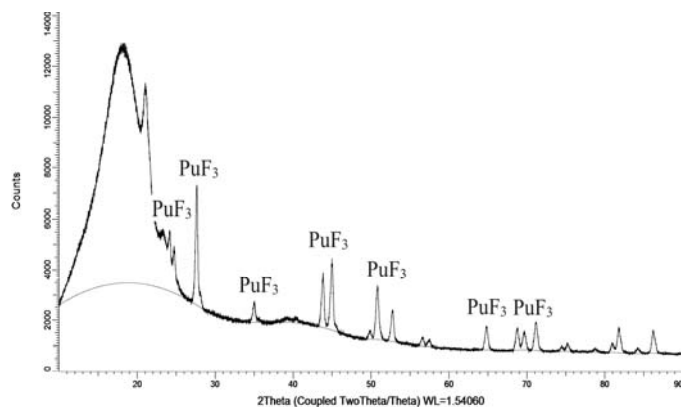
Обработку диоксида плутония вели реакционной смесью Ar-HF-H₂ при 500 °С с получением PuF₃ по реакции (1):



Далее проводили довосстановление непрореагировавшего Pu(IV) до его трёхвалентного состояния реакционной смесью Ar-H₂ при 600 °С.

Для идентификации PuF₃, провели рентгенофазовый анализ полученного образца, результаты представлены на рисунке.

Сопоставление дифрактограммы образца с данными базы рентгеновских данных COD (характерные рефлексы в области 2Θ: 24,5; 25,1; 28; 35,3; 44,2; 45,3; 50,2; 51,1; 53,1; 65,1; 69; 70; 71,4), показало их идентичность, что свидетельствует о том, что кристаллическая фаза образца соответствует брутто-формуле PuF₃.



Список использованной литературы

1. Игнатъев В.В., Фейнберг О.С., Загнитько А.В. и др. Жидкосоле-
вой реактор: новые возможности, проблемы и решения // Атомная энер-
гия, 2012, т. 112, вып. 3

СТАНОВЛЕНИЕ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

Умыржанов Т.Н., Мясоедова Е.Н., Мухамеджанова Е.С.

НАО университет имени Шакарима, г. Семей, РК

E-mail: timirlan-95@mail.ru, kate_white89@mail.ru, merkezhhan04@mail.ru

Ядерная медицина – это область, основанная на использовании радиоактивных нуклидов в диагностических и терапевтических целях. Разработка технологий радионуклидной терапии для Республики Казахстан (РК) является особенно важной, так как использование данного метода только входит в клиническую практику лечения онкозаболеваний. Особенностью радионуклидной терапии является высокая специфичность и эффективность, вызывающая минимальное количество побочных эффектов.

Основным разработчиком технологий ядерной медицины является институт Ядерной физики РК. Была проведена оценка способов наработки радиоактивных изотопов для определения перечня наиболее перспективных для облучения на ректоре ВВР-К редкоземельных элементов для наработки радиоактивных изотопов и анализ их ядерно-физических характеристик. Такие изотопы как: ^{166}Ho , ^{165}Dy , ^{90}Y , ^{175}Yb , ^{153}Sm , ^{177}Lu , ^{147}Nd , ^{170}Tm , ^{159}Gd и ^{141}Ce могут быть использованы в терапии онкологических заболеваний.

Ядерная медицина действует на клеточном уровне. Это ее отличительная особенность от всех других методов исследования или лечения. Именно с помощью радиофармпрепаратов мы можем увидеть патологические из-

менения на уровне метаболических нарушений. Ни один из методов лучевой диагностики не дает такого уровня, как радиоизотопные исследования. Среди преимуществ таких исследований, перед другими методами диагностики, можно назвать: амбулаторность обследования; отсутствие побочных действий и возрастных ограничений; неинвазивность; возможность многократного повторения без риска для больного; малая разовая доза.

Современную ядерную медицину можно разделить на две отрасли – диагностическую и лечебную. В диагностическом плане ядерная медицина в Казахстане располагает пока только двумя технологиями: позитронно-эмиссионной томографией и однофотонно-эмиссионной томографией. До сих пор используется лишь один радиофармпрепарат – фторглюкоза.

Ядерная медицина в терапевтическом направлении в РК делает только первые шаги. В настоящее время в Республике Казахстан функционируют 7 центров и отделений ядерной медицины. Однако, только в одном из них используют радионуклидную терапию при лечении рака щитовидной железы.

В докладе приводится подробный анализ проблем, возможностей и достижений учреждений РК, в которых разрабатываются методики лечения, технические устройства или используется ядерная медицина.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ КАТИОНОВ ЧЕРЕЗ БАРЬЕР

Ван Ц., Атутова Я.Е., Седнев В.В.

*Научный руководитель: профессор ТПУ Мышкин В.Ф.
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск
E-mail: caylun1@tpu.ru*

Глина считается перспективным материалом для формирования инженерных барьеров безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов (РАО). Основной характеристикой барьера безопасности является время защитного действия, определяемое коэффициентом диффузии катионов радионуклидов. Коэффициент диффузии между пакетами минерала можно определить из результатов квантово-химического моделирования. Однако, моделирование не учитывает все возможные траектории диффузии радионуклидов. Поэтому только экспериментальные исследования позволяют определить коэффициент диффузии, учитывающий все факторы.

Известные установки для экспериментального определения коэффициента диффузии, как правило, содержат отдельные емкости с высоким содержанием соли и дистиллята, а также уплотненного слоя гли-

ны, размещаемого между двумя емкостями. В некоторых случаях, емкости с запасом жидкости отделены от узла с барьерным материалом и сообщаются с ним с помощью резиновых трубок. В этом случае требуется непрерывная прокачка жидкостей. Для определения концентрации радионуклида используют датчики радиоактивного излучения, а при использовании имитаторов радионуклидов – кондуктометры.

В нашей экспериментальной установке уплотненный слой глины находился, в контактном узле, между емкостями с объемом 2 см^3 , находящиеся в которых жидкости периодически обновлялись. Запас жидкостей находился в кюветах: количество 1 М раствора NaCl составляло 500 мл, а «дистиллята» – 120 мл. Жидкости периодически прокачивали с помощью перистальтических насосов со скоростью 110 мл/мин в течении 20–15 минут.

Все детали контактного узла выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Оказалось, что в растворе NaCl сварные швы корродируют. Поэтому контактный узел предварительно подвергали химической полировке.

Барьерный слой уплотненной глины диаметром 30 мм имел толщину 3–4 мм. Путем стягивания половинок контактного узла задавали плотность глины в диапазоне $1,5\text{--}2,0 \text{ г/см}^3$. Содержание NaCl в кювете с «дистиллятом» определяли один раз в сутки с помощью кондуктометра в течении 20–30 дней.

В докладе приводятся графики изменения концентрации Na^+ в кювете с «дистиллятом». По этому графику определяли коэффициент диффузии катиона через уплотненный слой глины по формуле, учитывающей количество жидкостей и исходную концентрации соли. Многократные повторения показали, что доверительный интервал ошибок измерения не превышают значений $\pm 5 \%$.

ОБЛУЧЕНИЕ ГЛИНИСТОГО МИНЕРАЛА МЕЖПАКЕТНЫМ ИСТОЧНИКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Черепнев М.С., Капокова А.Р., Оммик А.К.

*Научный руководитель: профессор ТПУ Мышкин В.Ф.
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск
E-mail: maxcherepnev@tpu.ru*

Глинистые минералы широко используются при захоронении радиоактивных отходов (РАО) атомной промышленности. Уплотненная глина, из-за малой скорости микрофльтрации водных растворов, является хорошим барьерным материалом. При плотности слоя глины более $1,9 \text{ г/см}^3$ распространение радионуклидов определяется лишь диффузией, протекающей как между глинистыми частицами, так и между паке-

тами одной микрочастицы. Если глина контактирует с радионуклидами, то источник ионизирующего излучения оказывается между пакетами минерала. Как правило, при ускоренных радиационных испытаниях, источник излучения находится за пределами испытываемого материала. Поэтому ускоренные испытания не могут в полной мере имитировать условия натурального облучения. Цель исследования – облучение глинистых минералов с помощью радионуклидов, внедряемых в пространство между пакетами.

Известно, что в пространство между пакетами глинистого минерала легко затягиваются катионы, нейтральные частицы, а анионы отталкиваются.

Работа с радионуклидами требует наличия специальной лаборатории. Поэтому необходимо выбрать радионуклид, использование которого не представляет опасности для персонала. Таким радионуклидом является радон.

Радон, радиоактивный благородный газ, встречается в природе в малых количествах как промежуточный нуклид в цепочке радиоактивного распада, в ходе которой из урана последовательно образуются различные короткоживущие радиоактивные изотопы. В конечном счете образуется стабильный изотоп ^{206}Pb . Непосредственно радон является продуктом распада Ra. Поэтому материалы, содержащие уран, выделяют газообразный радионуклид ^{222}Rn . Самый долгоживущий изотоп ^{222}Rn имеет период полураспада 3,82 суток. Абсорбированный в глине радон распадается до свинца, облучая её изнутри. При этом свинец остается между пакетами минерала, что также имитирует последствия взаимодействия радионуклидов с уплотненным слоем глины.

В докладе приводятся результаты исследования сухой смеси минералов глин, длительно находившихся в атмосфере, в которой поддерживалась высокая концентрация ^{222}Rn . Приводятся графики распределения свинца по объему уплотненного слоя глины. На основе экспериментальных данных сформулирована физическая и математическая модели протекающих процессов, объясняющих наблюдающиеся распределения свинца. Путем анализа цепочки распада дочерних радионуклидов радона оценено распределение по объему глины поглощенной дозы излучения.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗОТОПНОГО ОБМЕНА В ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ С ИОНООБМЕННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Балашков В.С.¹, Дорофеева Л.И.², Вергун А.П.²

¹*ООО «Связь Автоматики», г. Северск*

²*Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск*

E-mail: balashkov_vit@mail.ru

Ионообменные технологии, эффективно используемые в процессах водоподготовки, селективного выделения и концентрирования, изотопного обогащения, нашли широкое применение в науке, медицине и промышленности.

Актуальным приложением в исследованиях настоящего времени является внедрение гибких производственных систем, основанных на возможностях требуемой перенастройки оборудования под нужды технологического процесса. Противоточные обменные колонны с применением ионообменных материалов позволяют проводить изотопное обогащение до необходимой степени и по широкому ряду изотопов при минимальной перенастройке технологического оборудования.

Моделировался процесс непрерывного изотопного обогащения при взаимно противоположном перемещении фаз в двухфазной системе ионообменник – раствор в обменной колонне с последующим обращением потоков электрохимическим методом в электродиализаторе [1] с учетом ряда факторов, которые обеспечивали эффективную работу всего устройства.

Количество вещества, переносимого через поперечное сечение колонны, определялось с учетом линейной скорости движения твердой фазы и типа ионообменного материала [2]. Величина высоты эквивалентной теоретической ступени находилась с учетом продольной, внешней и внутренней диффузии в колонне. Величина степени разделения изотопов легких щелочных элементов изменялась в пределах $1,021 \div 1,092$ в зависимости от условий осуществления процесса. Полученные расчетные значения хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Применение обменных двухфазных систем с обращением потоков фаз электрохимическим методом позволяет значительно сократить затраты на выделение целевого изотопа, обеспечить непрерывность процесса разделения с необходимой степенью автоматизации и мобильностью оборудования, создать перенастраиваемую технологию процесса обогащения.

Список использованной литературы

1. Определение оптимальных условий процесса электрохимического обращения потоков фаз при изотопном обмене // Известия вузов. Физика – 2022. – Т. 65, № 4 (773). – С. 107–112.
2. Modeling of sorption processes on solid-phase ion-exchangers // AIP Conference Proceedings – 2018. – Vol. 1938 – P. 020021.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТА ИЗОТОПИЧЕСКИХ ИОНОВ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗА

Алтынцев Т.Д.¹, Балашков В.С.²

¹ООО «Связь Автоматики», г. Северск

²Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск
E-mail: tda1@tpu.ru

Электродиализные методы очистки растворов эффективно применяются в процессах водоподготовки, очистки и концентрирования технологических растворов во многих отраслях промышленности, в том числе и на предприятиях атомной промышленности. В качестве узла обращения потоков фаз, поступающих со стадий обогащения [1], используют электродиализные аппараты, различающиеся как количеством камер, так и типом используемого мембранного материала.

Анализируя кинетические характеристики транспорта изотопических ионов в условиях электродиализа с катионитовыми мембранами, можно сделать вывод об основных факторах, которые оказывают наибольшее влияние на скорость переноса по межмембранному пространству [2], заполненному катионитом. Скорость переноса в данном случае будет определяться отношением подвижностей, плотностью тока и ионообменной ёмкостью, используемого ионообменного материала. Процесс вытеснения переносимых ионов с уменьшением их концентрации происходит при замещении зоны обогащенной по легкой составляющей зоны более тяжёлого изотопа для легких щелочных элементов.

Время, которое необходимо для завершения процесса диффузии изотопических ионов, в основном зависит от межэлектродного расстояния, напряжения, приложенного к электродиализному аппарату с учетом подвижности изотопических ионов и конструктивных параметров рабочей камеры. Оптимальная плотность тока на таком аппарате находится в диапазоне значений 0,01–0,04 мА/м² и определяется в зависимости от горизонтальной и вертикальной составляющей времени в динамических условиях работы электроди-

ализного аппарата. Анализ условий переноса изотопических ионов показывает, что с изменением pH эффективность будет возрастать, если процесс электролиза протекает в щелочной среде, в этом случае также наблюдается уменьшение энергозатрат на процесс электромиграции.

Список использованной литературы

1. Моделирование процесса электрохимического обращения потоков фаз при изотопном обмене // *Изотопы: технологии, материалы и применение* – Томск: ТПУ, 2020. – С. 88.

2. Определение оптимальных условий процесса электрохимического обращения потоков фаз при изотопном обмене // *Известия вузов. Физика* – 2022. – Т. 65, № 4 (773). – С. 107–112.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ИЗОТОПНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ НА СЕЛЕКТИВНЫХ ИОНООБМЕННИКАХ

Присяжнюк Н.Р.¹, Балашков В.С.²

¹*ООО «Связь Автоматики», г. Северск*

²*Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск*

E-mail: nrp1@tpu.ru

Селективные ионообменники эффективно применяются при избирательной сорбции ценных компонентов из технологических растворов, при разделении и концентрировании изотопов, извлечении золота и урана из руд, а также в процессах водоподготовки в различных отраслях промышленности.

Избирательность ионообменника, как правило, определяется отношением активностей [1] и проявляется, когда энергии притяжения твердой фазой различны, что обусловлено различием в радиусах поглощаемых ионов и их зарядах, так как ионы, сорбируемые твердой фазой, вступают во взаимодействие с фиксированными потенциалобразующими ионами ионообменного материала матрицы. С увеличением заряда иона увеличивается энергия его притяжения противоположно заряженной твердой фазой ионообменника, чем больше изменяется энергия Гиббса при переходе границы раздела между внешним раствором и твердой фазой, тем лучше сорбируется вещество, тем более выпуклой становится изотерма сорбции, которая определяет общее количество обменивающихся ионов в каждой из фаз, тем эффективней в свою очередь и процесс изотопного разделения [2], так как применение ионообменников с привитыми селективными свойствами эффективно, как для процессов сорбции и ионообменного поглощения, так и изотопного обогащения.

При увеличении скоростей переноса [3] в жидкой фазе до верхней границы, определяемой коэффициентом перемешивания в колонне, увеличивается время, требуемое для полного насыщения ионообменника, а также возрастает высота эквивалентной теоретической ступени. Оптимальная скорость перемещения твердой фазы изменялась в диапазоне от 0,01 до 0,1 см/с, величина степени разделения для легких щелочных элементов в диапазоне от 1,021 до 1,092 в зависимости от типа ионообменника, кинетики и параметров ионообменной колонны.

Список использованной литературы

1. Захаров Е.И., Рябчиков Б.Е., Дьяков В.С. Ионообменное оборудование атомной промышленности. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.
2. Modeling of Sorption Processes on Solid – phase Ion – exchangers // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1938: Isotopes: Technologies, Materials and Application (ITMA – 2017). 020021, 6 p.
3. Дорофеева Л.И. Моделирование и оптимизация разделительных процессов – Томск: ТПУ, 2008.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В ПРОТИВОТОЧНЫХ СИСТЕМАХ С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ОБРАЩЕНИЕМ ПОТОКОВ ФАЗ

Ананьев Д.С.

*Научный руководитель: Вергун А.П., д.ф.-м.н., профессор-консультант
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: dsa26@tpu.ru*

В настоящее время актуальным является направление исследований, связанное с эффективным объединением различных методов разделения с целью организации непрерывного замкнутого процесса, позволяющего осуществить изотопное разделение с последующим обращением потоков фаз, когда извлекаемый изотоп переводится из твердой в жидкую фазу, в условиях дальнейшего его дообогащения на электрохроматографическом аппарате и возвратом части потока в исходную систему каскада обменных противоточных колонн.

Организация такого процесса основана на совмещении изотопного обмена в каскаде противоточных ионообменных колонн [1] с электролизатором для обращения потоков фаз [2] и процесса электрохроматографии [3] в устройстве с катионитовыми мембранами при динамических условиях перемещения твердого ионообменного материала

и внешнего раствора. Основные параметры, моделирующие процесс в установке изотопного обогащения, определяются с учетом исходной концентрации питания, требуемой величины отбора и однократного коэффициента разделения. При этом коэффициент разделения определяется типом ионообменника и конструкционными особенностями колонн. Необходимое количество ступеней изменялось до 135 в каскаде из 7 колонн с высотой эквивалентной теоретической тарелки в 50 см. Распределение концентраций по ступеням каскада показывает увеличение исходной концентрации до 95 % со стороны отбора.

Математическое моделирование процессов в установке изотопного обогащения для легких щелочных элементов устанавливает взаимосвязь основных параметров и показывает их влияние на отбор обогащенного продукта, что позволяет проводить гибкую настройку оборудования с целью изменения выходной концентрации до требуемой величины.

Список использованной литературы

1. Моделирование и оптимизация разделительных процессов / Л.И. Дорофеева. – Томск: НИ ТПУ, 2008. – 128 с.
2. Разделение изотопов и ионов с близкими свойствами в обменных процессах с электрохимическим обращением потоков фаз // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306, № 3. – С. 66–70.
3. Разделение изотопов в обменных и электрохроматографических колоннах с движущимся слоем ионита // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 4–2. – С. 69–72.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ БАРЬЕРНЫХ СВОЙСТВ ПРИРОДНОЙ И ОБЛУЧЕННОЙ СМЕСИ ГЛИН

Ван Ц., Капокова А.Р., Седнев В.В.

*Научный руководитель: Мышкин В.Ф., профессор ТПУ
Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: saylun1@tpu.ru*

В связи с развитием ядерной энергетики и постоянным накоплением радиоактивных отходов (РАО), актуальна задача утилизации РАО. На сегодняшний день глинистые минералы считаются наиболее подходящим барьерным материалом для пунктов захоронения РАО. При контакте с РАО глинистые минералы облучаются, что приводит к некоторому изменению их структуры и тем самым влияет на их защитные свойства. Цель исследования – измерение и сравнение коэффициентов диффузии катионов Na^+ в природных и облученных глинистых смесях.

Для исследования использовалась смесь минералов монтмориллонит, каолинит и вермикулит, которая облучалась γ -излучением изотопа ^{60}Co до поглощенной дозы 0,3 МГр. Плотность облучаемой смеси составляла 1,3 г/см³. При этом неравномерность облучения по объему не превышала 20 %. Для усреднения поглощенной дозы глина после облучения перемешивалась.

При определении коэффициента диффузии навеска порошкообразной глины закладывалась в цилиндрический корпус уплотнялось до значения от 1,62 до 1,9 г/см³. При диаметре уплотненного слоя 40 мм его толщина составляла 4–5 мм. Вначале измерения, с одной стороны барьерного слоя заливали 1 М раствор NaCl, а с другой стороны – дистиллят. Ежедневные измерения продолжались в течении 20–30 дней.

Экспериментально полученное значение коэффициента диффузии природной глины составляло $6,75 \cdot 10^{-12}$ м²/с. Для образца облученной глины коэффициент диффузии составлял $8,05 \cdot 10^{-12}$ м²/с. Оценивали время защитного действия (ВЗД) уплотненного слоя смеси глинистых минералов толщиной 1 метр по формуле, приведенной в ГОСТ 26412-85. Получены следующие значения: ВЗД_{гр} = 138,2 лет, ВЗД_{обл} = 115,9 лет.

В докладе приводится анализ причин ухудшения барьерных свойств глинистых смесей после лучевого воздействия. Обзор литературы по образованию радиационных повреждений в глинах показывает протекание следующих процессов: радиолиз воды; изменение валентности таких элементов, как Si, Fe и Mg; образование точечных дефектов при малых дозах, а также разрушение структуры минералов при больших дозах. Изменение валентности элементов сопровождается повышением их энергии связи с окружающими атомами. Эти изменения минералов при облучении приводят к ослаблению энергии связи межпакетных противоионов с минералом. В результате обеспечивается более легкое прохождение катионов через уплотненный слой глины.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

- F -
Filippova E.O. 73, 74, 77
- G -
Ghoneim Y. 87
Glushenko P.V. 77
Golinskiy I.E. 74
- N -
Novoselov I.Yu. 81
- P -
Pautov K.G. 73
- T -
Tikhonov A.E. 81
- A -
Абдуллоева С.Дж. 43
Азизов М.Н. 35
Алтынцев Т.Д. 170
Ананьев Д.С. 172
Аникин М.Н. 123
Арефьева Е.А. 59, 60, 61
Арыштаев А.М. 68, 110
Арыштаев С.А. 109
Атутова Я.Е. 101, 162, 166
- Б -
Балашков В.С. 169, 170, 171
Баранов О.Г. 53
Баранова П.А. 83
Басс В.И. 140, 156, 157
Белозеров Н.А. 79, 89
Бельков А.М. 128, 131, 132
Бикметов Н.Р. 138
Болтабоев А.О. 35
Большаков А.Д. 124, 126, 129
- В -
Ван Ц. 158, 162, 166, 173
Ван Цайлунь, 159
- Васильев А.В. 161
Вергун А.П. 169
Видяев Д.Г. 117, 118
Виноградов А.С. 114
Волков М.И. 95
- Г -
Гадельшин В.М. 48, 96
Гадельшин М.Ш. 96
Гребёнкин Д.М. 42
Груббе М.С. 134
Гусев Н.В. 54
- Д -
Даминов О.М. 45
Демидов В.А. 106
Джуля Д.Н. 33
Долгих С.С. 142
Доняева Е.С. 105
Доржиев А.Е. 111
Дорофеева Л.И. 169
- Е -
Евстратенко А.С. 101, 102, 107, 113
- Ж -
Жаламан С.Е. 31, 149
- З -
Зайцев И.К. 116, 117
Зарыкбаева К.С. 30, 32, 69, 148
Зубов В.В. 82
Зукау В.В. 105, 106
- И -
Игнатъев И.А. 42
Илекис В.М. 51
- К -
Капокова А.Р. 112, 158, 167, 173
Каренгин А.А. 88

- Кенжиев А. 83
Кенжиев А.А. 75
Киеу Б.Т. 152
Клименко Ю.Д. 99
Кобелев А.М. 59, 60, 61
Коваленко М.А. 48
Кодыров Н.А. 38
Комшина М.Е. 104
Кривобородько В.А. 126, 129
Кублинский М.К. 122
Кузнецов С.Ю. 92
Кузнецова А.А. 84
Кузьменко А.С. 95, 100
Курдюмов Н. 75, 83
Кушков О.О. 124, 129
Кулмаханбет О.К. 32
- Л -
- Лебедев И.И. 123
Леякова М.К. 70
Леонова Е.С. 75
Литвинов И.И. 53
Лубнин С.С. 49
- М -
- Марков Д.Я. 58
Менжуренко И.В. 78
Мухамеджанова Е.С. 165
Мухаметжанова Е.С. 69
Мышкин М.Г. 112
Мясоедова Е.Н. 165
- Н -
- Найверт Е.С. 153
Наймушин А.Г. 122
Неволин Н.Р. 98
Нестерова Е.А. 47
Новоселов И.Ю. 85
Носиров Ф.К. 38
Нургалиев Д.Н. 30, 148
Нурпеисова Н.Т. 31
- О -
- Овезова А.В. 37
- Огородников С.А. 68, 101, 102,
107, 109, 110
Оммик А.К. 158, 167
Оммик А.-М. К.-Р. 112
Осокин А.А. 111, 150
- П -
- Партобзода З. 35
Петров М.В. 37
Плетнев А.О. 126, 133
Плетнёв А.О. 132
Плеханов В.Г. 8
Помесячная Е.Д. 91
Присяжнюк Н.Р. 171
Прытков Л.Н. 55, 56, 62, 63, 64,
65, 67
- Р -
- Разина В.А. 40, 41
Расторгуев В.И. 85
Рахимжанова Л.А. 31, 147, 149
Рахимов М.Р. 43
Рахматов М.Н. 28
Романис М.Е. 70
- С -
- Сабанин К.А. 48
Савостиков Д.В. 118
Сатыбалдинова А.Е. 32
Седнев В.В. 166, 173
Селин П.Е. 50
Семенов А.С. 121
Семенов Д.Ю. 137
Сергеев О.С. 146, 163
Сизов С.И. 135, 137, 139
Силин Г.Е. 154
Синько Н.С. 164
Слямбаев Т.Е. 147
Смаилов Д.Е. 30, 69, 148
Смирнов Л.Ю. 139
Смольников Н.В. 122, 123
Смороков А.А. 50
Степанченко Е.К. 132, 134

Сумин Г.В. 128, 131, 133

Суханов Е.А. 143

Сычева А.А. 78

- Т -

Темляков А.К. 96

Тикина И.В. 55, 56, 62, 63, 64, 65,
67

Титов С.А. 55, 56, 59, 60, 61, 62,
63, 64, 65, 67

Тихонов А.Е. 84

Третьякова А.В. 116

Туксов И.В. 86

- У -

Умыржанов Т.Н. 165

Усков Т.И. 118

Ушаков А.О. 51

Ушаков И.А. 105, 106

- Ф -

Фейгин А.И. 128, 132, 133

Флусова Д.С. 138

- Х -

Холматов О.Б. 34

Хорохорин Д.М. 53

Хохленков М.Е. 135

Хусаинов Т.К. 97

- Ч -

Чеботарев К.Р. 146, 163

Черепнев М.С. 167

Чертков М.С. 150

Чумаков Д.К. 127

Чуприков А.И. 143

Чуринова П.А. 95

- Ш -

Шавалеев М.Р. 58

Шаров Р.В. 114

Шевченко И.Н. 113

Шелихова Е.А. 99

Шибецкая Ю.Г. 40, 41

Шодиев Ш.Ш. 43

Шукуров Е.Г. 45

Шукшина Д.Д. 159, 162

Шумовская К.Ф. 104

- Щ -

Щербина Д.С. 80

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	6
ИЗОТОПИЧЕСКОЕ СОЗДАНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	
Плеханов В.Г.....	8
Секция 1	
МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ И ОЧИСТКИ ВЕЩЕСТВ.....	27
СОДЕРЖАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ	
В АТМОСФЕРНОМ АЭРОЗОЛЕ НА ПРАВОМ БЕРЕГУ СЫР-ДАРЬИ	
В ПРЕДЕЛАХ ХУДЖАНДА	
Рахматов М.Н.	28
ИЗОТОПНЫЙ ЭФФЕКТ РАДИКАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ	
В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	
Зарыкбаева К.С., Нургалиев Д.Н., Смаилов Д.Е.	30
ИЗОТОПНАЯ СЕЛЕКТИВНОСТЬ РАДИКАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ	
ПРИ ФОТОЛИЗЕ ЖИДКОСТЕЙ В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	
Рахимжанова Л.А., Нурпеисова Н.Т., Жаламан С.Е.	31
СЕПАРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ И ОБЛУЧЕННОГО ГРАФИТА	
Сатыбалдинова А.Е., Зарыкбаева К.С., Кулмаханбет О.К.	32
ВЛИЯНИЕ ВОЛН НА ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ	
В СВЕРХСИЛЬНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПОЛЯХ	
Джуля Д.Н.	33
СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОДЕРЖАНИЯ	
РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В АТМОСФЕРНОМ АЭРОЗОЛЕ	
СЕВЕРНОГО ТАДЖИКИСТАНА	
Холматов О.Б.	34
СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОДЕРЖАНИЯ	
РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В ПОЧВАХ СЕВЕРНОГО	
ТАДЖИКИСТАНА	
Партобзода З., Азизов М.Н., Болтабоев А.О.....	35
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ Q-КАСКАДОВ ПО ПОЛУЧЕНИЮ	
ВЫСОКООБОГАЩЕННЫХ ИЗОТОПОВ КРЕМНИЯ	
Овезова А.В., Петров М.В.....	37
ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ	
НА ОСОБО ЗАГРЯЗНЁННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ СЕВЕРНОГО	
ТАДЖИКИСТАНА	
Кодыров Н.А., Носиров Ф.К.....	38
ОСАДИТЕЛЬНЫЕ И СОРБЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ	
²¹⁰ Pb И ²¹⁰ Po ИЗ ПРИРОДНЫХ СРЕД	
Разина В.А., Шибецкая Ю.Г.	40
ВОЛОКНИСТЫЕ ФЕРРОЦИАНИДНЫЕ СОРБЕНТЫ	
ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ¹³⁷ Cs: РАЗРАБОТКА, СИНТЕЗ И ИСПЫТАНИЯ	
Шибецкая Ю.Г., Разина В.А.	41

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В КАСКАДАХ	
Игнатъев И.А., Гребёнкин Д.М.	42
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В АТМОСФЕРНОМ АЭРОЗОЛЕ И ПОЧВАХ СЕВЕРНОГО ТАДЖИКИСТАНА	
Абдуллоева С.Дж., Шодиев Ш.Ш., Рахимов М.Р.	43
ИЗУЧЕНИЕ СОДЕРЖАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В ПРОБАХ ПОЧВ СЕВЕРНОГО ТАДЖИКИСТАНА	
Шукуров Е.Г., Даминов О.М.	45
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ Q-КАСКАДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО ^{34}S	
Нестерова Е.А.	47
О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ИОНИЗАЦИИ В МАСС-СПЕКТРОМЕТРЕ ВТОРИЧНЫХ ИОНОВ $\text{PHI TRIFT V NANOTOF}$	
Сабанин К.А., Коваленко М.А., Гадельшин В.М.	48
МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЯМОУГОЛЬНОГО КАСКАДА ВАРЬИРОВАНИЕМ СРЕЗОВ ПАРЦИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ	
Лубнин С.С.	49
ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ИЗ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ	
Селин П.Е., Смороков А.А.	50
КОНТРОЛЬ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА БОРА В ТРИФТОРИДЕ БОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИК-СПЕКТРОМЕТРИИ	
Илекис В.М., Ушаков А.О.	51
ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ	
Хорохорин Д.М., Баранов О.Г., Литвинов И.И.	53
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ АМЕРИЦИЯ ОТ ПЛУТОНИЯ	
Гусев Н.В.	54
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ТЕЛЛУРА ПРИ НАГРЕВЕ НАТРИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АТМОСФЕРЕ АРГОНА	
Прытков Л.Н., Титов С.А., Тикина И.В.	55
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ МАРГАНЦА ПРИ НАГРЕВЕ НАТРИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АТМОСФЕРЕ АРГОНА	
Прытков Л.Н., Титов С.А., Тикина И.В.	56
ПЕРЕРАБОТКА РЕАКТОРНОГО ГРАФИТА В АТМОСФЕРЕ АЗОТА В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ	
Марков Д.Я., Шавалеев М.Р.	58
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ НИКЕЛЯ ПРИ НАГРЕВАНИИ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА В ВОДЯНОМ ПАРЕ	
Арефьева Е.А., Кобелев А.М., Титов С.А.	59

<p>ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ НИКЕЛЯ ПРИ НАГРЕВАНИИ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА В ОКСИДНО-СОЛЕВОМ РАСПЛАВЕ И ВОДЯНОМ ПАРЕ Арефьева Е.А., Кобелев А.М., Титов С.А.</p>	60
<p>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ НИКЕЛЯ ПРИ НАГРЕВАНИИ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ Арефьева Е.А., Кобелев А.М., Титов С.А.</p>	61
<p>ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ГРАФИТА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА Титов С.А., Прытков Л.Н., Тикина И.В.</p>	62
<p>ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕАКТОРНОГО ГРАФИТА Титов С.А., Прытков Л.Н., Тикина И.В.</p>	63
<p>ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ УРАНА ПРИ СЖИГАНИИ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА, ОБОГАЩЕННОГО КИСЛОРОДОМ Титов С.А., Прытков Л.Н., Тикина И.В.</p>	64
<p>АВАРИИ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ. ПОВЕДЕНИЕ РАДИОНУКЛИДА ЦЕЗИЯ Титов С.А., Тикина И.В., Прытков Л.Н.</p>	65
<p>ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДА НИКЕЛЯ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ПОЖАРА НА УРАН-ГРАФИТОВОМ РЕАКТОРЕ Титов С.А., Тикина И.В., Прытков Л.Н.</p>	67
<p>МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ПО ОБЪЕМУ КРИСТАЛЛА NaCl Арыштаев А.М., Огородников С.А.</p>	68
<p>МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗОТОПОВ В ХИМИИ Мухаметжанова Е.С., Зарыкбаева К.С., Смаилов Д.Е.</p>	69
<p>РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ Q-КАСКАДА ПО ПОЛУЧЕНИЮ ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО СВИНЦА-206 Леякова М.К., Романис М.Е.</p>	70
Секция 2	
<p>ПЛАЗМЕННЫЕ И ВОДОРОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</p>	72
<p>FRICION COEFFICIENT OF POLYLACTIC ACID FILMS AFTER THE PLASMA TREATMENT Pautov K.G., Filippova E.O.</p>	73
<p>STUDY OF THE FRICTION COEFFICIENT OF POLY(ε-CAPROLACTONE) FILMS AFTER THE PLASMA TREATMENT Golinskiy I.E., Filippova E.O.</p>	74
<p>ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ГИДРИДА МАГНИЯ И НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ МЕХАНОСИНТЕЗА Леонова Е.С., Кенжиев А.А., Курдюмов Н.</p>	75

ROUGHNESS OF POLY(ϵ -CAPROLACTONE) FILMS AFTER THE LOW-TEMPERATURE PLASMA TREATMENT Glushenko P.V., Filippova E.O.	77
ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННАЯ КОНВЕРСИЯ ОБЕДНЕННОГО ПО ИЗОТОПУ УРАН-235 ГЕКСАФТОРИДА УРАНА Менжуренко И.В., Сычева А.А.	78
ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ПОСЛЕ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА Белозеров Н.А.	79
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ТОПЛИВНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ТОЛЕРАНТНОГО REMIX-ТОПЛИВА Щербина Д.С.	80
SYNTHESIS OF OXIDE AND CARBON-OXIDE COMPOSITIONS FOR DISPERSION NUCLEAR FUEL IN NON-EQUILIBRIUM PLASMA OF AIR Tikhonov A.E., Novoselov I.Yu.	81
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ « ND_2O_3 - CE_2O_3 -MGO», МИТИРУЮЩИХ УРАН-ТОРИЕВОЕ ДИСПЕРСИОННОЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО Зубов В.В.	82
ХРАНЕНИЕ ВОДОРОДА В КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ ГИДРИДА МАГНИЯ И НАНОРАЗМЕРНОГО ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ Баранова П.А., Кенжиев А., Курдюмов Н.	83
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ТОПЛИВНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ УРАН-ТОРИЕВОГО ТОЛЕРАНТНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА Тихонов А.Е., Кузнецова А.А.	84
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ТОПЛИВНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ТОЛЕРАНТНОГО МОХ-ТОПЛИВА Расторгуев В.И., Новоселов И.Ю.	85
ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА Туксов И.В.	86
AIR-PLASMA DISPOSAL OF SPENT NUCLEAR FUEL REPROCESSING WASTE Ghoneim Y.	87
МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ МЕТАЛЛОВ Каренгин А.А.	88
ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННАЯ УТИЛИЗАЦИЯ РАФИНАТОВ ПОСЛЕ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА Белозеров Н.А.	89
ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ИЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БАССЕЙНОВ-ХРАНИЛИЩ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ Помесячная Е.Д.	91

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОЙ УТИЛИЗАЦИИ ХЛОРСОДЕРЖАЩИХ ОТРАБОТАННЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ Кузнецов С.Ю.	92
Секция 3	
СВОЙСТВА, ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОТОПНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	94
СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАММА-КОМПЛЕКСА «РАДИАН» Чуринова П.А., Кузьменко А.С., Волков М.И.	95
ИЗГОТОВЛЕНИЕ МИШЕНИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИЦИНСКИХ РАДИОИЗОТОПОВ СКАНДИЯ НА ЦИКЛОТРОНЕ УРФУ Темляков А.К., Гадельшин М.Ш., Гадельшин В.М.	96
ПОИСК ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА ИЗОТОПА ZR-96 НА ВОЗБУЖДЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОТОПА MO-96 Хусаинов Т.К.....	97
МЕТОД ПАСПОРТИЗАЦИИ ОДНОРОДНОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КРУПНОБЛОЧНЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ С ПОМОЩЬЮ РАДИОКТИВНОГО ИСТОЧНИКА Неволин Н.Р.	98
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ТСХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОХИМИЧЕСКОЙ ЧИСТОТЫ РАДИОФАРМПРЕПАРАТА НА ОСНОВЕ ПРОСТАТ-СПЕЦИФИЧЕСКОГО МЕМБРАННОГО АНТИГЕНА (PSMA), МЕЧЕННОГО ИЗОТОПОМ ^{99m} Tc Клименко Ю.Д., Шелихова Е.А.	99
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ И НАВЕДЕННОЙ АКТИВНОСТИ В ПАКЕТЕ GEANT4 Кузьменко А.С.	100
ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА НАНОЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ Евстратенко А.С., Огородников С.А., Атутова Я.Е.	101
АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ НАНОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ Евстратенко А.С., Огородников С.А.	102
СПЕКТРЫ ИК И КРС ОБРАЗЦОВ ИЗОТОПНО ОБОГАЩЕННЫХ SiO ₂ Шумовская К.Ф., Комшина М.Е.	104
РАСЧЕТ НАРАБОТКИ ТЕРБИЯ-161 НА РЕАКТОРЕ ИРТ-Т Ушаков И.А., Зукау В.В., Доняева Е.С.....	105
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫДЕЛЕНИЯ LU-177 ИЗ ИТТЕРБИЕВОЙ МИШЕНИ Ушаков И.А., Демидов В.А., Зукау В.В.	106
АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ И РОСТЕ ЧАСТИЦ В СЛАБОМ ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ Огородников С.А., Евстратенко А.С.	107

ПАРАМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РАСТУЩЕГО ИЗ РАСТВОРА КРИСТАЛЛА В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	
Огородников С.А., Арыштаев С.А.....	109
ИЗОТОПНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ИЗ РАСТВОРА, НАХОДЯЩЕГОСЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ	
Арыштаев А.М., Огородников С.А.....	110
ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОПОРОШКОВ W-CU, FE-PB И FE-CU	
Доржиев А.Е., Осокин А.А.	111
МЕДИЦИНСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ОБОГАЩЕННЫХ ПО ИЗОТОПАМ ПРЕПАРАТОВ	
Мышкин М.Г., Капокова А.Р., Оммик А.-М. К.-Р.....	112
ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ПАРОВ ВОЛЬФРАМА, ПРОТЕКАЮЩЕГО В МАГНИТНОМ ПОЛЕ	
Евстратенко А.С., Шевченко И.Н.	113
АНАЛИЗ СХЕМ ПОСТРОЕНИЯ КАСКАДОВ ПО РАЗДЕЛЕНИЮ ИЗОТОПОВ БОРА	
Виноградов А.С., Шаров Р.В.	114
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДИСПЕРСИОННОГО ТОПЛИВА С УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЕЙ	
Зайцев И.К., Третьякова А.В.	116
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ТАБЛЕТОК ИЗ МОДЕЛЬНЫХ ОКСИДОВ С УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЕЙ	
Зайцев И.К., Видяев Д.Г.....	117
ОЦЕНКА РЕЖИМА СПЕКАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ТАБЛЕТОК СО СТЕАРАТОМ ЦИНКА В КАЧЕСТВЕ ПЛАСТИФИКАТОРА	
Видяев Д.Г., Усков Т.И., Савостиков Д.В.	118
Секция 4	
ЦИФРОВИЗАЦИЯ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ	120
ДОКЛИНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ЛЕКАРСТВЕННОГО ПРЕПАРАТА НА ОСНОВЕ МЕЧЕННЫХ ¹²³ I РЕКОМБИНАНТНЫХ АДРЕСНЫХ МОЛЕКУЛ ДЛЯ РАДИОНУКЛИДНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ С ГИПЕРЭКСПРЕССИЕЙ HER-2/NEU	
Семенов А.С.	121
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ РЕАКТОРА ИРТ-Т МЕТОДАМИ МАШИНОГО ОБУЧЕНИЯ	
Кублинский М.К., Смольников Н.В., Наймушин А.Г.....	122
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ИРТ-Т	
Смольников Н.В., Аникин М.Н., Лебедев И.И.	123
ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЦИФРОВОМ ДВОЙНИКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УЧАСТКА СБОРКИ И ГЕРМЕТИЗАЦИИ ТВЭЛОВ	
Кушков О.О., Большаков А.Д.....	124

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ПРОВЕРКИ АЛГОРИТМОВ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ И РЕГУЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ В ЗАЩИТНОМ БОКСЕ Кривобородько В.А., Плетнев А.О., Большаков А.Д.	126
АЛГОРИТМ ТРЕКИНГА ЧАСТИЦ ДЛЯ СБОРОК STRAW-ДЕТЕКТОРОВ С ОТБОРОМ ПО УГЛУ ПАДЕНИЯ Чумаков Д.К.	127
РАЗРАБОТКА ВИДЕОГРАММ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ОБНОВЛЯЕМЫХ ДАННЫХ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА МОДУЛЯ ФАБРИКАЦИИ И РЕФАБРИКАЦИИ Бельков А.М., Сумин Г.В., Фейгин А.И.	128
АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ УРАНОВОГО СЫРЬЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТРЕНАЖЕРНОЙ МОДЕЛИ Большаков А.Д., Кривобородько В.А., Кушков О.О.	129
РЕАЛИЗАЦИЯ МОДУЛЯ ОБРАБОТКИ ОБНОВЛЯЕМЫХ ДАННЫХ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА МОДУЛЯ ФАБРИКАЦИИ И РЕФАБРИКАЦИИ Сумин Г.В., Бельков А.М.	131
ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЛИНИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК Степанченко Е.К., Бельков А.М., Плетнев А.О., Фейгин А.И.	132
РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА Плетнев А.О., Сумин Г.В., Фейгин А.И.	133
РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК Груббе М.С., Степанченко Е.К.	134
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ ПОРОШКА СО СТЕАРАТОМ ЦИНКА Хохленков М.Е., Сизов С.И.	135
РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УЧАСТКА ГРАНУЛИРОВАНИЯ Семенов Д.Ю., Сизов С.И.	137
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА SIRM В ФРЕМФОРКЕ ALLPIX ² Флусова Д.С., Бикметов Н.Р.	138
РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УЧАСТКА ПОДГОТОВКИ И ХРАНЕНИЯ ПРЕСС-ПОРОШКА Смирнов Л.Ю., Сизов С.И.	139
ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТОВ ВЫВОДА В СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВНЕШНИХ ПУЧКОВ ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА У400Р Басс В.И.	140
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОЙ СОРБЦИИ В ИОНООБМЕННОЙ КОЛОННЕ Долгих С.С.	142

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ПО СОЗДАНИЮ ТОПОЛОГИИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБЪЕКТА ДЛЯ ПАКЕТА ПРОГРАММ «ЛОГОС» Суханов Е.А., Чуприков А.И.	143
Секция 5	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЯДЕРНОМ ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ. РАДИОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ	145
ВОЗМОЖНЫЕ НАРУШЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ В ПОЛЕ АЛЬФА-ИЗЛУЧЕНИЯ Чеботарев К.Р., Сергеев О.С.	146
ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН Слямбаев Т.Е., Рахимжанова Л.А.	147
ИЗОТОПНЫЙ ЭФФЕКТ РАДИКАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ Зарыкбаева К.С., Нургалиев Д.Н., Смаилов Д.Е.	148
СВОЙСТВА ОБОГАЩЕННЫХ ПО ИЗОТОПАМ МАТЕРИАЛОВ Рахимжанова Л.А., Жаламан С.Е.	149
РАСЧЕТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ В ИОНООБМЕННОЙ СМОЛЕ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ЛЮТЕЦИЯ-177 ОТ ИТТЕРБИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА GEANT4 Чертков М.С., Осокин А.А.	150
ЭКСТРАКЦИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАФТЕНОВОЙ КИСЛОТОЙ Киеу Б.Т.	152
ЭКСТРАКЦИЯ ВОЛЬФРАМАТ-ИОНОВ В СИСТЕМЕ АНТИПИРИН-СУЛЬФОСАЛИЦИЛОВАЯ КИСЛОТА Найверт Е.С.	153
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ АНИОНА НА ЭКСТРАКЦИЮ РЗМ КАРБОНОВЫМИ КИСЛОТАМИ Силин Г.Е.	154
МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ЛИНИЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ, ВЫВЕДЕННЫХ ИЗ ЦИКЛОТРОНА У400Р Басс В.И.	156
ЛИНИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ ДЛЯ НОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗАЛА ЦИКЛОТРОНА У400Р Басс В.И.	157
ЕМКОСТЬ КАТИОННОГО ОБМЕНА ПРИРОДНОЙ И ОБЛУЧЕННОЙ ГЛИНИСТОЙ СМЕСИ Капокова А.Р., Оммик А.К., Ван Ц.	158
ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ПРОТИВОИОНОВ ПРИ ПОЯВЛЕНИИ РАЗРЫВА ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В СТРУКТУРЕ ГЛИНИСТОГО МИНЕРАЛА Шукшина Д.Д., Ван Цайлунь	159

ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ГИПЕРСКОРОСТНОЙ ГАЗОВОЙ ЦЕНТРИФУГИ ИГУАССУ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ ЦЕЛЕВОГО ИЗОТОПА В ПОТОКЕ ОТБОРА	
Васильев А.В.	161
ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ КАТИОНОВ НА ИХ КОЭФФИЦИЕНТ ДИФФУЗИИ ЧЕРЕЗ ГЛИНИСТЫЕ МИНЕРАЛЫ	
Ван Ц., Шукшина Д.Д., Атутова Я.Е.	162
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ В ПОЛЕ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ	
Сергеев О.С., Чеботарев К.Р.	163
ПОЛУЧЕНИЕ ТРИФТОРИДА ПЛУТОНИЯ	
Синько Н.С.	164
СТАНОВЛЕНИЕ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН	
Умыржанов Т.Н., Мясоедова Е.Н., Мухамеджанова Е.С.	165
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ КАТИОНОВ ЧЕРЕЗ БАРЬЕР	
Ван Ц., Атутова Я.Е., Седнев В.В.	166
ОБЛУЧЕНИЕ ГЛИНИСТОГО МИНЕРАЛА МЕЖПАКЕТНЫМ ИСТОЧНИКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ	
Черепнев М.С., Капокова А.Р., Оммик А.К.	167
ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗОТОПНОГО ОБМЕНА В ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ С ИОНООБМЕННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ	
Балашков В.С., Дорофеева Л.И., Вергун А.П.	169
МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТА ИЗОТОПИЧЕСКИХ ИОНОВ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗА	
Алтынцев Т.Д., Балашков В.С.	170
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ИЗОТОПНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ НА СЕЛЕКТИВНЫХ ИОНООБМЕННИКАХ	
Присяжнюк Н.Р., Балашков В.С.	171
ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В ПРОТИВОТОЧНЫХ СИСТЕМАХ С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ОБРАЩЕНИЕМ ПОТОКОВ ФАЗ	
Ананьев Д.С.	172
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ БАРЬЕРНЫХ СВОЙСТВ ПРИРОДНОЙ И ОБЛУЧЕННОЙ СМЕСИ ГЛИН	
Ван Ц., Капокова А.Р., Седнев В.В.	173
ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ.	175

Научное издание

ИЗОТОПЫ: ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ И ПРИМЕНЕНИЕ

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

Издано в авторской редакции

Компьютерная верстка *К.С. Чечельницкая*

Зарегистрировано в Издательстве ТПУ
Размещено на корпоративном портале ТПУ



ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ