



СЕМЕНОВ АНДРЕЙ ОЛЕГОВИЧ

**ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНАТА НЕОДИМА
ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ АКТИНОИДНОЙ ФРАКЦИИ
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ МЕТОДОМ
САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
СИНТЕЗА**

Специальность – 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2022 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель

Долматов Олег Юрьевич,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент отделения ядерно-топливного цикла
Инженерной школы ядерных технологий,
Томский политехнический университет

Официальные оппоненты

Ситников Александр Андреевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технология
автоматизированного производства»,
Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Сачков Виктор Иванович,
доктор химических наук, доцент,
заведующий лабораторией «Инновационно-
технологический центр», Обособленное
структурное подразделение «Сибирский
физико-технический институт», Томский
государственный университет

Защита диссертации состоится «14» апреля 2022 г. на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.04 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. пр. Ленина, 43, ауд. 401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://www.dis.tpu.ru>

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ДС.ТПУ.04,
кандидат технических наук,
доцент



Д.В. Гвоздяков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Активное развитие ядерных программ приводит к накоплению все возрастающих объемов радиоактивных отходов (РАО). Необходимость изоляции наиболее долгоживущих и биологически опасных нуклидов от окружающей среды в течение длительного времени и стремление сократить срок обслуживания мест хранения приводят к неизбежности разработок инновационных технологий и современных материалов, предназначенных для иммобилизации РАО и последующего хранения в течение всего времени, требуемого для снижения их активности до приемлемых уровней.

Согласно МАГАТЭ, жидкие высокоактивные отходы (ВАО), содержащие актиноидные фракции отработанного ядерного топлива, подлежат переводу в химически- и радиационно-устойчивые формы, сохраняющие свою стабильность на протяжении всего времени хранения. Применяющиеся в настоящее время технологии отверждения РАО очень разнообразны: остекловывание, цементирование, битумирование, компактирование. Каждая технология имеет ряд преимуществ и недостатков, используется для разных видов отходов, различается по физико-химическим параметрам процесса, техническому оформлению и включает различные материалы (или их соотношение) в зависимости от вида процесса.

На данном этапе развития науки наиболее часто используемой технологией утилизации РАО является остекловывание радионуклидов в алюминофосфатные или боросиликатные стекла. Между тем, стекловидные матричные материалы не являются идеальными с точки зрения знаний о сроках и условиях хранения композитов с радиоактивными материалами. Боросиликатные и фосфатные стекла не могут гарантировать устойчивость и надежность сохранения ВАО в течение нескольких тысяч лет ввиду их недостаточной химической устойчивости и склонности к спонтанной кристаллизации при повышенных температурах.

Альтернативным материалом для иммобилизационных матриц могут являться кристаллические матрицы, природные аналоги которых просуществовали в изменяющихся естественных условиях в течение длительных периодов времени, доказав тем самым свою долговременную геологическую стабильность. Такие минералы-компаунды способны на протяжении длительного периода надежно удерживать в себе высокоактивные фракции радиоактивных отходов. Однако развитие данных способов обращения затруднено ввиду отсутствия промышленных технологий изготовления, а существующие способы получения, такие как индукционная плавка, плазменное и микроволновое плавление или спекание, сопровождаются сложными технологическими процессами получения и высокими энергетическими затратами. К одному из альтернативных методов получения материалов для иммобилизации радиоактивных отходов относят самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), преимуществом которого является возможность получения материалов с

заранее заданными свойствами и высокой чистотой конечного продукта, низкое энергопотребление и возможность управления процессом на всех этапах синтеза.

Исходя из этого, актуальным направлением является исследование теплофизических процессов горения таких матричных систем, позволяющих получить уникальный материал, способный иммобилизовать актиноидную фракцию радиоактивных отходов. В качестве имитатора радиоактивных отходов в работе используется оксид неодима Nd_2O_3 в связи с близостью его химических свойств актиноидам.

Степень разработанности темы

Существенный вклад в изучение проблемы получения минералоподобных матричных материалов внесли А. Г. Мержанов, И.П. Боровинская, С.В. Юдинцев, Э.М. Глаговский, А.В. Куприн, Ю.В., Глаголенко, С.И. Ровный, Э. Е. Коновалов, А.О. Меркушин, Zhi-meng Guo, R. Zhang, Laura Gaggero и др. Их работы посвящены получению химически устойчивых матриц, исследованию возможности применения альтернативных технологий их изготовления. В настоящее время работы в области иммобилизации высокоактивных отходов ведутся в ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (г. Черноголовка), ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (г. Москва), ФГУП «ПО «Маяк» (г. Озерск), АО СХК (ЗАО Северск), University of Science and Technology Beijing (Китай), University of Genoa (Италия) и др. В значительной части существующие исследования по синтезу иммобилизационных матричных материалов рассматривают сложно-реализуемые химические превращения, требующие создания определенных условий протекания, а также применения комплексных систем с большим исходным числом реагентов. Сведений об экспериментальном исследовании и промышленном освоении метода СВС алюминатных перовскитных матриц в литературе не обнаружено.

Эксплуатационные особенности применения керамических матричных материалов, созданных в режиме СВ-синтеза, требуют нового научного решения при разработке методов его получения в целях обеспечения наилучших гидролитических и физико-механических параметров. Одним из таких решений может быть использование различных методов управления процессом синтеза на стадии подготовки шихты компонентов. Данные способы управления систем подобного состава не изучены, поэтому существует необходимость в изучении теплофизических и физико-химических процессов, протекающих при синтезе разрабатываемого матричного материала.

Цель работы: Создание научных основ получения матричного материала на основе алюмината неодима методом СВС, предназначенного для иммобилизации актиноидной фракции радиоактивных отходов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Определение принципиальной возможности синтеза матричного материала путем термодинамического расчета адиабатической температуры горения СВС-системы при варьировании массового содержания имитатора отходов и температуры предварительного подогрева.

2. Исследование влияния начальной температуры подогрева, плотности исходной шихты реагентов и массового содержания реагирующих компонентов $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ на закономерности протекания СВС.

3. Исследование влияния основных технологических параметров СВС на фазовый состав матричного материала, обеспечивающих максимальное содержание имитатора актиноидной фракции РАО.

4. Экспериментальное исследование гидролитической стабильности и физико-механических характеристик разрабатываемого материала при имитации хранения в геологических формациях.

5. Разработка метода получения матричного материала на основе алюмината неодима методом СВС.

Научная новизна

- Впервые по результатам анализа термодинамического расчета, основанного на определении адиабатической температуры горения, показана возможность синтеза алюмината неодима методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и установлены критические параметры, при которых возможен процесс горения и образования NdAlO_3 : массовое включение компонентов $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ в систему Ni-Al – не более 46 масс.%, начальная температура подогрева – 700 К.

- Установлено влияние плотности исходной шихты и массового содержания реагирующих компонентов алюмината неодима на СВС. Стационарное распространение волны горения наблюдается при плотностях системы 4,8-5,2 г/см³ и включении до 40 % масс. системы $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$. Дальнейшее повышение плотности приводит к потере устойчивости волны горения, а увеличение содержания реагирующих компонентов – к появлению локальных очагов горения с последующим затуханием.

- Изучено влияние массового содержания реагирующих компонентов оксидов алюминия и неодима в исходной шихте на фазовый состав матричных материалов, полученных СВС методом. Определено оптимальное массовое содержание системы $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, позволяющее получить материал, содержащий до 41,5% масс. алюмината неодима.

- Установлена динамика изменения основных матричных характеристик вследствие воздействия потоков ионизирующего излучения при имитации длительного хранения материала на протяжении 1000 лет: снижение гидролитической устойчивости составляет 10 – 13%; изменение пределов прочности не более 7%.

Практическая значимость

На основе проведенного исследования разработан метод получения матричного материала на основе алюмината неодима со структурой перовскита методом самораспространяющегося высокотемпературного

синтеза, обладающего повышенными гидролитическими характеристиками, по сравнению с традиционными боросиликатными и алюминофосфатными стеклами. Его применение позволяет получить матрицы в виде изделия, пригодного для захоронения в геологических формациях без дополнительных операций. Результаты внедрены и используются Учебно-научным центром «Исследовательский ядерный реактор», а также в учебном процессе в Национальном Исследовательском Томском политехническом университете при подготовке выпускных квалификационных работ и магистерских диссертаций студентов, обучающихся по направлению «Ядерные физика и технологии».

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» в части пункта 6 – «Экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульса и энергии в многофазных системах и при фазовых превращениях», и в части пункта 7 – «Экспериментальные и теоретические исследования процессов совместного переноса тепла и массы в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси».

Методология и методы исследования

Методология диссертационного исследования включает: анализ термодинамических параметров реакции СВ-синтеза; оптимизацию параметров смеси и исследование ее морфологических свойств; исследование физико-механических и гидролитических параметров синтезированных образцов; имитацию захоронения посредством изучения влияния дозовых нагрузок на характеристики материала.

Экспериментальные исследования по теме диссертации выполнялись с использованием современных методов и аналитического оборудования (дифрактометр Shimadzu XRD – 6000, ИСП-МС анализатор Agilent 7700х ICP-MS, испытательная машина INSTRON 5980), технологического оборудования, лабораторных установок и методик проведения экспериментов, дающих адекватные результаты. Облучение синтезируемых образцов осуществлялось в центральном канале № 2 исследовательского реактора ИРТ-Т потоком быстрых нейтронов ($\Phi = 10^{14}$ н/см²*с) и набором флюенса с максимальной величиной $9,2 \cdot 10^{19}$ н/см².

Положения, выносимые на защиту:

- методика расчетно-теоретического анализа возможности осуществления СВ-синтеза матричного материала, основанная на определении адиабатической температуры горения при добавлении реагирующих компонентов алюмината неодима в исходную СВС-шихту;
- условия осуществления и закономерности синтеза алюмината неодима при горении порошков Ni-Al с содержанием оксидов алюминия и неодима;

– влияние процесса облучения матричного материала на изменение его физико-механических и гидролитических характеристик при имитации захоронения в геологических формациях;

– метод получения матричного материала на основе алюмината неодима в режиме СВС, предназначенного для иммобилизации актиноидной фракции радиоактивных отходов.

Степень достоверности результатов работы

Достоверность и обоснованность экспериментальных данных, полученных в диссертационной работе, обеспечивается проведением исследований с использованием современного аналитического и технологического оборудования, применением комплексных методов исследования материалов, повторяемостью эксперимента.

Апробация результатов работы

Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях и симпозиумах регионального, всероссийского и международного уровней: XX Всероссийской с международным участием школе-семинаре по структурной макрокинетике для молодых ученых (2012), XIII Всероссийской с международным участием школе-семинаре по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А.Г. Мержанова (2015), Научной сессии НИЯУ МИФИ «Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий» (2017), XV Всероссийской с международным участием школе-семинаре по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А.Г. Мержанова (2017), XV International Symposium on Self-Propagating High-Temperature Synthesis (2019), II Всероссийской научно-методической конференции «Современные технологии, экономика и образование» (2020), X Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Российский и международный опыт подготовки кадров» (2020) и др.

Связь работы с научными программами и грантами

Тематика исследования соответствует приоритетному направлению развития науки, техники и технологий в Российской Федерации (указ Президента РФ № 899 от 7 июня 2011 г.) «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а также программе Российской Федерации «Развитие атомного промышленного комплекса» (Постановление правительства РФ № 289-13 от 16.03.2020 г.), находится в сфере критических технологий федерального уровня «Технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом», так как применение перовскитоподобных иммобилизационных матриц позволяет существенно (кратно) повысить безопасность хранения радиоактивных отходов в течении всего периода обращения.

Личный вклад автора

Проработка литературы по теме диссертации и участие в обсуждении планов экспериментальных исследований. Синтез и подготовка опытных образцов для экспериментальных исследований. Обработка результатов рентгеноструктурного анализа синтезированных образцов, проведение экспериментов по определению гидролитической устойчивости синтезируемых образцов и их анализ. Участие в обсуждении полученных результатов, оформление и подготовка их к публикации.

Публикации

Основные положения диссертации опубликованы в 20 работах, включая 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ; 4 статьи в изданиях, индексируемых базой данных SCOPUS и WoS; 9 публикаций в сборниках международных и российских конференций; 1 патент РФ.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных выводов по работе, списка литературы из 147 источников. Работа изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 20 таблиц и 46 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели, показана научная новизна и ее практическая значимость, обозначены основные этапы исследования.

В первой главе представлен аналитический обзор существующих материалов и методов их получения, предназначенных для иммобилизации актиноидной фракции РАО и отходов, образующихся при переработке отработавшего ядерного топлива. В настоящий момент в мире основной технологией обращения является использование различных стеклоподобных матричных материалов. Так, например, основным способом утилизации отходов во Франции и в Великобритании является применение боросиликатных стекол, а в России – алюмофосфатных стекол.

Существующие стеклянные матрицы нецелесообразно использовать при долговременном хранении вследствие изменения ряда физико-химических свойств, например, снижения их химической устойчивости к процессам выщелачивания; склонности к спонтанной кристаллизации стеклянных матриц при высоких температурах при непрекращающемся энерговыделении вследствие радиоактивных распадов.

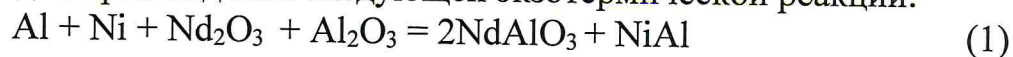
По нормативам МАГАТЭ высокоактивные фракции РАО необходимо переводить в химически- и радиационно-устойчивые формы по аналогии с природными минералами, такими как перовскит, монацит, цирконолит, пироклор и др., предполагающие надежную иммобилизацию и сохранение стабильности радиоактивных отходов на протяжении всего периода хранения.

Анализ существующих технологий получения таких материалов минералоподобной формы показывает, что существующие методы горячего и холодного прессования, индукционной плавки в холодном тигле обладают рядом существенных недостатков и не находят промышленного приложения.

Одной из перспективных технологий изготовления является самораспространяющийся высокотемпературный синтез, лишенный многих недостатков традиционных технологий получения керамических матричных материалов. Процесс получения конечного продукта в режиме СВС имеет ряд преимуществ: низкие энергетические затраты; высокую производительность; управляемость процессом на всех этапах синтеза.

Во второй главе описываются объекты, методы и методики исследования получения алюмината неодима в режиме СВС.

В экспериментальных исследованиях использовалась смесь промышленно изготовленных порошков оксидов неодима, являющегося имитатором актиноидной фракции радиоактивных отходов, в связи с близостью его химических свойств актиноидам, и оксида алюминия с добавлением порошков никеля и алюминия, смешанных в стехиометрическом соотношении для прохождения следующей экзотермической реакции:



Смешивание порошков исходных реагентов производилось в кубическом миксере ERWEKA. Прессование исходной шихты производилось с помощью гидравлического пресса модели Р338. Длительность прессования – 60 мин. Полученные образцы были установлены в реактор, где в атмосфере технического вакуума осуществлялся процесс синтеза. Инициирование реакции синтеза производилось с помощью вольфрамовой нити, подключенной к линейному преобразователю тока. Регистрация температурных режимов проводилась с помощью вольфрам-рениевых термопар, подключенных к многоканальному счетчику импульсов Овен СИ8. Исследование фазового состава и структурных параметров синтезированных образцов проводилось методом рентгеновской дифракции с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD 6000 при использовании $\text{CuK}\alpha$ -излучения. При изучении физико-механических параметров синтезируемых образцов проводились испытания прочностных характеристик на универсальной испытательной машине INSTRON 5980. Методика испытания образцов на выщелачиваемость при 90° С основана на статическом тесте для монолитных образцов с известной геометрической поверхностью МСС-1 МАГАТЭ. Для определения удельной поверхности синтезируемых образцов использовался компактный автоматизированный прибор СОРБИ-М, основанный на многоточечном методе БЭТ. Для испытания использовались только монолитные образцы правильной геометрической формы, полученные при варьировании добавки-имитатора от 20 до 40 масс. % и различной плотности образцов от 4,84 до 5,15 г/см³. Диаметр образца составлял 22-25 мм, высота 10-12 мм, масса – 28-32 г. При определении гидролитической стабильности выщелачивающий раствор подвергался масс-спектрометрическому анализу с целью выявления количественных значений матричных элементов на установке Agilent 7700х ICP-MS.

В третьей главе представлены основные закономерности горения системы $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, направленные на получение матричного материала на основе перовскита методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, и описана технология получения данного материала.

При определении возможности получения алюмината неодима с использованием полуэмпирических зависимостей энергии Гиббса, полученных О. Фабричной, С. Хангом и Дж. Саалом, основанных на термодинамическом моделировании системы $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ при высоких температурах, установлена возможность осуществления реакции при температурах выше 900 К.

Для достижения необходимой температуры образования был выбран ряд СВС-реакций образования TiB_2 , VB_2 , TiC , TiSi_2 , ZrN , NiAl с высокими энергетическими выходами и температурами протекания.

Термодинамический анализ процесса горения данных систем с учетом массовой доли реагирующих компонентов $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ получения алюмината неодима в исходной СВС-шихте базировался на определении адиабатической

температуры синтеза в соответствии со следующим соотношением:

$$\int_{T_0}^{T_{ад}} c(T) dT = (1 - x)(Q - vM) - xL, \quad (4)$$

где $c(T)$ – температурная зависимость теплоемкости продукта реакции СВС; L – теплота, необходимая для образования продукта алюмината неодима из оксидных компонентов при температуре выше 900 К; x – доля содержания системы $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$; M – теплота плавления продукта СВС; v – доля жидкой фазы в конечном СВС продукте; $T_{ад}$ – адиабатическая температура горения системы (в случае $T_{ад} > 1500$ К система может быть подвержена СВ-синтезу); T_0 – начальная температура горения исходной СВС-системы (температура предварительного подогрева).

Исследование $T_{ад}$ от T_0 и x показало, что при реализации реакций синтеза TiB_2 , TiC и ZrN методом СВС развиваемые адиабатические температуры значительно превышают пороговое значение температуры ~ 2600 К, при которой возможно разложение алюмината неодима на составляющие. СВС-реакция VB_2 , с содержанием в СВС-системе около 49 масс.% $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, требует достижения высоких значений температур подогрева (выше 1100 К). Снижение температуры до 800 К позволит надежно иммобилизовать не более 42 масс.% реагирующих компонентов. Максимально возможное включение реагирующих компонентов при синтезе TiSi_2 составляет не более 42 масс.% при температуре подогрева около 700 К. Для реакции синтеза NiAl (рис. 1) предельное массовое содержание $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ равно 46 масс.% при $T_0 = 700$ К. Таким образом, использование реакции получения NiAl в режиме технологического горения для получения матричного материала, содержащего алюминат неодима, является наиболее оптимальным среди рассмотренных.

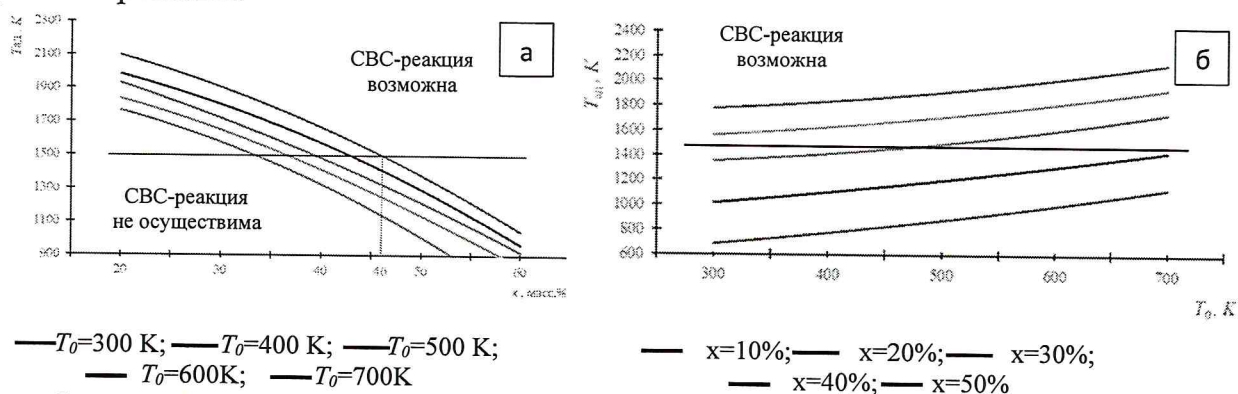


Рисунок 1 – Расчетные значения адиабатической температуры в зависимости от:
а – начальной температуры T_0 ; б – массового содержания x реагирующих компонентов

При исследовании влияния плотности шихты и массового содержания реагирующих компонентов на синтез и фазовый состав иммобилизационной матрицы была подготовлена серия лабораторных экспериментов при варьировании массового содержания $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ от 20 – 50 масс. % и давления прессования 10 – 30 МПа в соответствии с расчетными данными. Теоретическое значение плотности образцов варьировалось от 4,83 до 5,34 г/см³, в зависимости от содержания количества добавки оксидов неодима и алюминия (20 – 50 % масс.).

На следующем этапе спрессованные образцы помещались в СВС-реактор для проведения синтеза матричного материала в условиях остаточного давления 300 Па и регистрацией развивающихся температур горения. На рис. 2 показаны термограммы горения полученных образцов с различными параметрами подготовки исходной шихты.

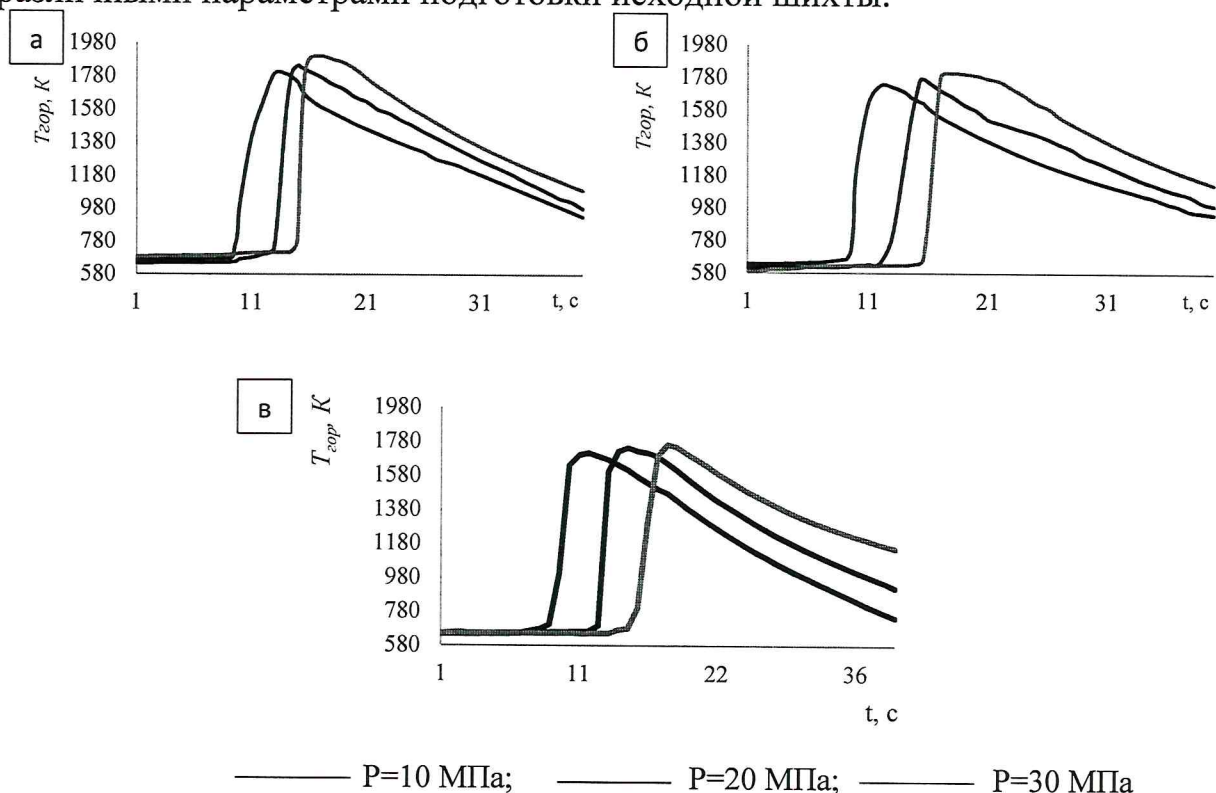


Рисунок 2 – Термограммы горения системы образцов при варьировании параметров шихты: а – $x=20\%$; б – $x=30\%$; в – $x=40\%$.

В результате нагревания исходных образцов с плотностью системы 4,8 – 5,2 г/см³ (10 – 30 МПа) и массовым содержанием реагирующих компонентов не выше 40%, а также нагревом полученной системы до температуры около 650 – 700 К (в зависимости от подготовки исходной смеси компонентов), на кромках торцов инициировалась волна горения, которая распространялась по объему образца. При этом температура процесса быстро росла, после чего стабилизировалась, и горение осуществлялось практически в изотермическом режиме при температуре 1600 – 1900 К. После прохождения волны горения по объему образцов они остывали до температуры окружающей среды.

При массовом содержании реагирующих компонентов Nd₂O₃-Al₂O₃ в образцах выше 40 % масс. вне зависимости от плотности шихты наблюдаются локальные очаги горения без разрастания в волну горения с последующим затуханием реакции синтеза, обусловленные излишним содержанием и повышенными энергетическими затратами на осуществление реакции синтеза алюмината неодима.

При увеличении плотности системы до 5,27 г/см³ и выше (давление прессования 40 МПа) наблюдается термомеханическое разрушение образцов, вследствие нестационарности распространения волны горения. Данный эффект обусловлен образованием слишком высокой плотности исходной шихты, что приводит к значительному росту удельного энергетического

выхода реакций, протекающих в единице объёма образца, и коэффициента теплопроводности системы, то есть увеличения теплоотода из предреакционного объема. Эти факторы служат причиной термомеханического разрушения в процессе синтеза.

Кроме того, для всех рассматриваемых систем при повышении давления прессования скорость выноса тепла из ожидаемой зоны реакции увеличивается, необходим более долгий прогрев образцов, реакция синтеза начинается чуть позже.

Далее синтезируемые образцы подвергались рентгенофазовому анализу. Результаты фазообразования в процессе синтеза для разного массового содержания реагирующих компонентов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты рентгенофазового исследования

Номер образца	Р, МПа	х, %	Фазовый состав, % масс.					
			Nd ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Ni ₂ Al ₃	Al ₃ Ni	NiAl	NdAlO ₃
1	10	20	1,2	8,3	32,4	21,1	21,2	15,7
2	20	20	2,3	7,2	35,2	16,2	23,4	15,6
3	30	20	2,6	4,5	31,7	1,1	33,5	26,6
4	10	30	8,3	7,4	27,3	16,2	24,3	16,5
5	20	30	2,8	6,6	31,7	15,6	25,4	17,9
6	30	30	4,9	2,7	27,2	-	27,2	37,9
7	10	40	13,8	12,6	19,9	22,2	15,4	16,1
8	20	40	8,1	7,1	26,2	14,3	19,6	24,7
9	30	40	2,8	4,7	26,8	-	24,2	41,5

Во всех образцах, полученных при разных условиях синтеза, наблюдается наличие фазы алюмината неодима со структурой перовскита NdAlO₃ от 15 до 41,5 % масс. Максимальная доля перовскита получена в образце с 40% содержанием добавки и давлением прессования 30 МПа, соответствующего плотности 5,15 г/см³.

При давлении прессования 10 – 20 МПа в синтезированных образцах наблюдаются фазы непрореагировавших реагентов в количестве: Nd₂O₃ 1,2 – 13,86 %; Al₂O₃ 6,6 – 12,6 % масс. При увеличении массового содержания реагирующих компонентов доля непрореагировавших продуктов при одинаковой плотности возрастает, однако, при увеличении приложенного давления прессования наблюдается снижение непрореагировавших фаз системы Nd₂O₃-Al₂O₃ со смещением в сторону фазообразования перовскита. Так, например, при х=20% и увеличении давления прессования с 10 до 30 МПа происходит повышение содержания синтезируемой фазы алюмината неодима в образце на 9% масс., при х=30% и х=40% на 21% и на 25% масс., соответственно. Данный факт объясняется увеличением температуры горения, развиваемой в процессе синтеза, вызванной повышением площади контакта между частицами в шихте и, как следствие, уменьшением теплотерь. Кроме того, изменение массового содержания реагирующих компонентов также оказывает влияние на процесс образования фазы NiAl в сторону получения Ni₂Al₃ и NiAl₃, обусловленное снижением температуры синтеза вследствие роста энергетической потребности на образование фазы алюмината неодима.

Повышение плотности шихты позволяет перенаправить фазообразование в сторону NiAl .

Наличие фаз Ni_2Al_3 и NiAl_3 может привести к повышению прочностных характеристик матричного материала вследствие искаженности их кристаллических решеток по сравнению с NiAl .

Для исследования влияния температуры предварительного подогрева на максимальную температуру синтеза были изготовлены образцы с 40% массовым содержанием реагирующих компонентов и давлении прессования 30 МПа, что соответствует максимально возможному включению имитатора актиноидов и реализации процесса синтеза. Величина предварительного подогрева варьировалась от комнатной температуры до 900 К. Результаты экспериментов представлены на рис. 3.

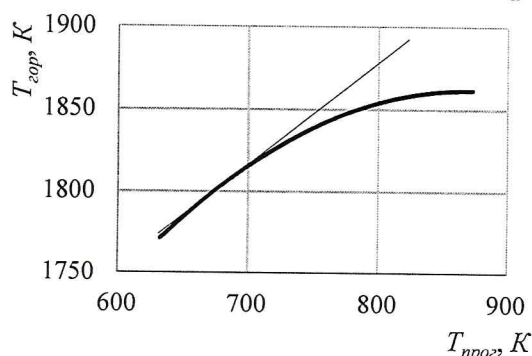


Рисунок 3 – Максимальные $T_{гор}$ в процессе синтеза

При величине предварительного подогрева приблизительно до 633 К наблюдается неустойчивое распространение волны горения и регистрируются лишь локальные очаги горения без перехода в объемное горение. При увеличении температуры предварительного подогрева выше 633 К наблюдается стационарный режим горения шихты. Линейный рост

максимальной температуры горения с увеличением начальной температуры процесса происходит до 720 К, в дальнейшем наблюдается слабая зависимость $T_{гор}$ от $T_{прог}$, при этом увеличение максимальной температуры горения стремится к значению температуры плавления NiAl (1951 К).

На основании вышеописанных результатов, технологические операции производства матрицы на основе NdAlO_3 включают в себя следующие стадии: дозирование, перемешивание, запрессовка образца, проведение СВ-синтеза. Схема основных операций осуществляется следующим образом (рис. 4).

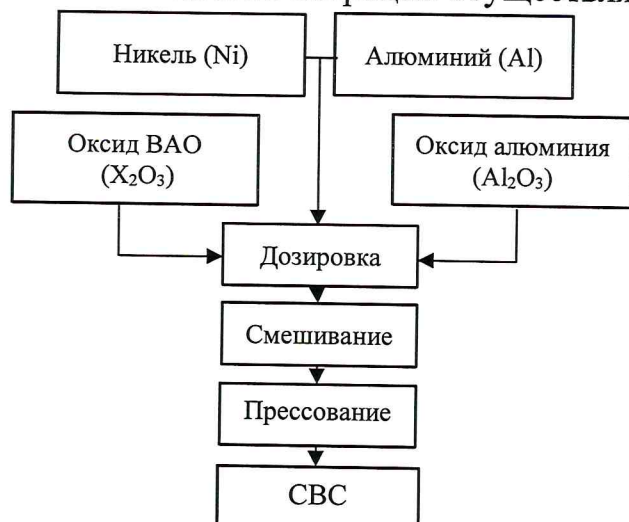


Рисунок 4 – Технологическая схема синтеза матричного материала

Исходные вещества: оксид алюминия, оксид актиноида, алюминий и никель дозируются весовым методом из расчета на прохождение реакции синтеза NiAl с образованием алюмината: Al и Ni – 31,5 и 68,5 масс. %, соответственно, к ним добавляется 40 масс. % оксидов актиноида и алюминия. При этом дозировка оксидов осуществляется в следующем соотношении: 3,3 : 1. Далее шихта перемешивается сухим

методом в шнековом кубическом смесителе в течении 30 минут. После чего проводится помещение шихты в пресс-формы для изготовления образцов цилиндрической формы при давлении прессования 30 МПа в течение 1 часа. Для обеспечения стационарного режима горения шихта прогревается до температуры порядка 650 К. Скорость нагрева вещества при СВ-синтезе составляет от 5 до 15 град/сек, скорость распространения волны горения – 2,5 мм/сек. Синтез происходит в режиме послойного горения в условиях технического вакуума в установке постоянного давления.

В четвертой главе представлены результаты исследования физико-механических и физико-химических свойств разрабатываемого матричного материала на основе NdAlO_3 : определена гидролитическая устойчивость и пределы прочности на сжатие синтезируемого продукта при различных параметрах подготовки исходной шихты и дозовых нагрузках компонентов материала.

Цель проведения экспериментов по выщелачиванию полученных образцов заключалась в определении химической устойчивости отвержденных имитаторов радиоактивных отходов посредством выщелачивания радионуклидов в матричном материале при длительном контакте с водой. Методика испытания образцов на выщелачиваемость осуществлялась при 90° С и основана на статическом тесте МСС-1 МАГАТЭ для монолитных образцов с известной геометрической поверхностью. Значения средних скоростей выщелачивания образцов сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Значение средних скоростей выщелачивания Nd из матричного материала в зависимости от среднего размера частиц исходной шихты

Параметры образца	Массовое содержание реагирующих компонентов Nd2O3-Al2O3								
	20 %			30 %			40 %		
	Образец								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Давление Р, МПа	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Удельная поверхность образца S, см²/г	26,20	23,67	20,21	25,45	24,33	19,40	27,11	23,94	19,99
Плотность образца ρ, г/см³	4,84	5,01	5,14	4,87	5,09	5,19	4,9	5,04	5,15
Открытая пористость s, %	27,10%	23,40%	16,20%	27,32%	26,40%	15,96%	27,90%	24,60%	16,14%
Средняя скорость выщелачивания υ, $10^{-10} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^2 * \text{сут}} \right)$	24,83	23,53	22,39	25,95	25,3	24,85	26,78	26,18	25,38

В общем случае значение скорости выщелачивания водой при температуре 90° С из матричного материала на основе алюмината неодима лежит в пределах $(2,24 - 2,68) \cdot 10^{-9} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{сут}} \right)$. Среднее значение составляет $2,46 \cdot 10^{-9} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{сут}} \right)$. Скорость выщелачивания меняется в зависимости от пористости образцов, обусловленных разными режимами подготовки исходной шихты. Так, при увеличении давления прессования с 10 до 30 МПа, т.е. изменении плотности с 94 до 98% от теоретической, происходит снижение

открытой пористости в среднем на 11%, приводящее к уменьшению скорости выщелачивания имитатора актиноидной фракции РАО на 5–6%.

Для оценки механических свойств матричного материала была проведена серия тестов на определение пределов прочности на сжатие (таблица 5).

Таблица 5 – Пределы прочности на сжатие образцов

Параметры образца	Массовое содержание реагирующих компонентов Nd ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃								
	20 %			30 %			40 %		
	Образец								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Р, МПа	10	20	30	10	20	30	10	20	30
ρ, г/см ³	4,81	5,03	5,14	4,86	5,11	5,18	4,92	5,03	5,16
σ _{сж} , МПа	64,34	68,12	70,44	61,37	64,42	66,16	58,37	61,91	64,33

Как видно из представленной таблицы, предел прочности на сжатие монотонно увеличивается при повышении давления прессования, и как следствие, снижения пористости конечного продукта. Так, при увеличении давления с 10 до 30 МПа происходит изменение предела прочности в среднем на 10%. Однако, вследствие разбавления имитатором РАО значение прочности снижается на 7 – 9%.

Согласно существующему ГОСТ Р 50926-96 «Отходы высокоактивные отвержденные. Общие технические требования», регламентирующему характеристики отходов, минимальный предел прочности на сжатие должен быть не менее 9 МПа. Таким образом, все исследуемые образцы отвечают необходимым требованиям по прочности материалов.

Вследствие облучения матричного материала в процессе долговременного обращения с РАО возможно наблюдение следующих процессов: нагрев, происходящий по причине непрекращающегося распада коротко- и долгоживущих элементов в соответствии с цепочками α - и β -распадов; локализованное замещение ионов: разупорядочение или другие глобальные перегруппировки катионов и анионов в матричной структуре.

Для рассмотрения радиационной устойчивости было изготовлено 3 образца с $x = 20$; 30 и 40 масс.%. Полученные образцы размещались в центральном канале № 2 исследовательского реактора ИРТ-Т для облучения потоком быстрых нейтронов ($\Phi = 10^{14}$ н/см²*с) и набора флюенсов с максимальной величиной $9,2 \cdot 10^{19}$ н/см². Быстрые нейтроны рассеивают энергию при упругих столкновениях, что приводит к многочисленным смещениям атомов, облучение действует подобно ядрам отдачи и имитирует радиационные повреждения, возникающие от α -частиц и ядер-отдачи в кристаллических структурах.

Макроскопическое изменение объемов образцов $\frac{\Delta V}{V_n}$ в зависимости от дозы облучения, обусловленное ростом плотности, представлено на рис. 6:

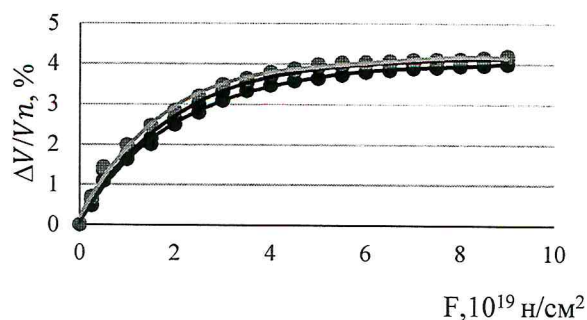


Рисунок 6 — Относительное увеличение объема образцов при облучении с разным содержанием добавки

матричного образца предельное значение изменения объема стремится к значению $\Delta V/Vn = 4,3\%$. Полученные распределения изменения объема хорошо коррелируют с теоретической зависимостью влияния дозы облучения на изменения объема, описанной Валдом и Вебером.

Общая схема развития радиационных повреждений характеризуется двухстадийным процессом и наблюдается на представленном рис. 7. Первая стадия наблюдается при дозе в 10^{17} н/см², обусловлена резкими брэгговскими дифракционными максимумами с незначительными вкладами диффузионно-рассеянных компонент. Повреждения определяются накоплением изолированных точечных дефектов, вызывающих искажения и увеличение объема элементарной ячейки.

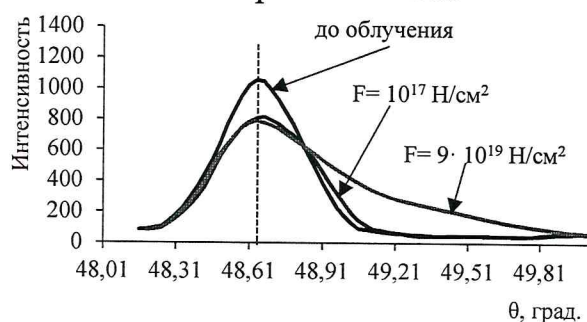


Рисунок 7 — Выделенные рефлексы из рентгенограмм образцов в зависимости от набранного флюенса нейтронов

области с искаженной кристаллической структурой, образованные перемещением ядер отдачи.

Как видно из представленных зависимостей, в процессе облучения образцов при дозовых нагрузках до $4 \cdot 10^{19}$ н/см² наблюдается разрушение кристаллической структуры, обусловленное появлением дефектов, приводящих к изменению плотности образцов, наблюдается распухание.

При дальнейшем облучении

Вторая стадия проявляется при дальнейшем облучении и дозовых нагрузках $10^{17} - 9 \cdot 10^{19}$ н/см² и характеризуется незначительным уменьшением интенсивности брэгговских дифракционных максимумов с проявлением ассиметричности, вследствие повышенного вклада диффузионно-рассеянных компонент, микроструктура должна включать

Таблица 7 – Изменение параметров кристаллической решетки образцов облучения

Образец с массовым содержанием реагирующих компонентов, % масс.	Параметры решетки, нм	
	до облучения	после облучения
20	a= 5.3149 c=12.9145	a= 5.5236 c=13.8401
30	a=5.3154 c=12.9160	a=5.5245 c=13.8362
40	a=5.3251 c=12.9250	a=5.5110 c=13.8349

Данные постоянных решетки перовскита для наблюдаемых образцов до и после облучения максимальным флюенсом сведены в таблицу 7. Для всех образцов анизотропия расширения характерна в направлении оси «с» и вызывается размещением выбитых атомов в этом направлении.

Облучение матричного материала не показало появления трещин или растрескивания, таблетки сохранили форму и механическую целостность вследствие наличия пор, обеспечивающий релаксацию возникающих эффектов набухания кристаллической решетки в процессе набора флюенса.

В целях определения влияния процессов облучения на гидролитическую стабильность матричных элементов были определены скорости выщелачивания образцов при максимальном флюенсе нейтронов по предложенной ранее методике (таблица 8).

Таблица 8 – Средняя скорость выщелачивания образцов

Содержание реагирующих компонентов $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, % масс.	Средняя скорость выщелачивания $v, 10^{-10} \frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{сут}}$	
	до облучения	После облучения
20	22,39	19,78
30	24,85	21,83
40	25,38	23,43

Для всех образцов наблюдается уменьшение гидролитической стабильности в среднем на 10 – 13%. Наиболее вероятное объяснение данного явления обусловлено ростом объема отдельных дефектов вследствие увеличения числа и среднего диаметра пор матричного материала,

а также развитием дислокационных петель. Как видно из таблицы, значения скоростей для всех образцов не превышают требования ($10^{-7} \frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{сут}}$), предъявляемые к матричным материалам в соответствии с ГОСТ Р 50926-96.

Изменение прочностных свойств матричных образцов, вызванное имитацией дозовых нагрузок в процессе длительного хранения, представлено в таблице 9.

Таблица 9 – Предел прочности на сжатие матричных образцов

Параметры образца	Массовое содержание реагирующих компонентов Nd ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃								
	20 %			30 %			40 %		
	Образец								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ _{сж} ДО облучения, МПа	64,34	68,12	70,44	61,37	64,42	66,16	58,37	61,91	64,33
σ _{сж} После облучения, МПа	59.52	64.03	66.31	58.30	61.74	61.52	54.88	58.50	60.42

Как видно из представленной таблицы, изменение пределов прочности на сжатие в среднем составило 7%, обусловленное появлением различного рода дефектов в кристаллической структуре матричного материала. Данные $\sigma_{\text{сж}}$ не превышают порогового значения $\sigma_{\text{сж}} = 9$ МПа в соответствии с ГОСТ Р 50926-96.

Основные выводы

1. В результате расчетно-теоретического анализа реакции получения алюмината неодима было установлено, что протекание реакции возможно лишь при температурах выше 900 К, следовательно, необходимо использование дополнительной СВС-реакции с высоким энергетическим выходом.

2. Численные исследования, основанные на определении адиабатической температуры горения системы Ni-Al при включении в нее реагирующих компонентов $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, позволили определить критические параметры, при которых возможен процесс горения и образование NdAlO_3 : содержание реагирующих компонентов не должно превышать ~ 46 масс. %; начальная температура подогрева шихты ~ 700 К. Структура полученного материала должна иметь никель-алюминиевый каркас, диспергированный включениями требуемых фазовых составляющих алюмината неодима.

3. Экспериментально установлено, что процесс синтеза матричного материала осуществим при плотностях исходной системы 4,8 – 5,2 г/см³ и содержании реагирующих компонентов не выше 40% масс. Дальнейший рост плотности системы приводит к термомеханическому разрушению образцов, вследствие нестационарности распространения волны горения. При увеличении содержания реагирующих компонентов выше 40 % масс. вне зависимости от плотности шихты наблюдаются локальные очаги горения без разрастания в волну горения с последующим затуханием реакции синтеза.

4. Экспериментальное исследование влияния параметров проведения синтеза на фазовый состав материала показало, что максимальная доля алюмината неодима получена в образце с 40 % массовым содержанием реагирующих компонентов и плотностью системы, равной 5,15 г/см³.

5. Среднее значение скорости выщелачивания имитатора актиноидов из матрицы составляет $2,46 \cdot 10^{-9}$ г/(см²·сут), что ниже известных значений боросиликатных и фосфатных стекол приблизительно в 10^3 раз и не превышает рекомендуемого значения 10^{-7} г/(см²·сут). Предел прочности на сжатие синтезированных образцов лежит в диапазоне 61,37 – 70,44 МПа.

6. В процессе имитации долговременного хранения матричного материала наблюдается незначительное разрушение кристаллической структуры, обусловленное появлением дефектов. Снижение гидролитической стабильности в среднем составило 10 – 13%, а изменение пределов прочности на сжатие – 7%, при этом характеристики образцов отвечают необходимым требованиям, предъявляемым ГОСТ Р 50926-96.

7. Разработана технологическая схема получения матричного материала на основе алюмината неодима методом СВС. Рекомендуемая дозировка компонентов Al и Ni – 31,5 и 68,5 масс. %, соответственно, к ним добавляется 40 масс. % реагирующих компонентов оксидов актиноида и алюминия в соотношении 3,3 : 1. Перемешивание осуществляется в течение 30 минут с дальнейшим помещением шихты в пресс-формы при давлении прессования 30 МПа в течение 1 часа. Скорость нагрева компонентов шихты

при СВ-синтезе в условиях остаточного давления 300 Па составляет от 5 до 15 град/сек до температуры 650 К и последующего старта реакции синтеза, позволяющего получить иммобилизационный материал актиноидной фракции радиоактивных отходов с характеристиками, отвечающими необходимым требованиям.

Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации:

В изданиях из перечня ВАК

1. **Семенов, А.О.** Иммобилизация актиноидной фракции радиоактивных отходов в перовскитоподобную матрицу методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / О. Ю. Долматов [и др.] // Атомная энергия – 2021. — Т.131. — № 1. — С. 12-15.
на английском языке
Semenov A.O. Immobilization of the actinide fraction of radioactive waste in a perovskite-like matrix by self-propagating high-temperature synthesis method / Dolmatov O. Yu. [et al.] // Atomic Energy — 2021. — Vol. 131 — iss.1. — pp. 12-15.
2. **Семенов, А.О.** Разработка матричного материала для иммобилизации радиоактивных отходов на основе модифицированного перовскита в режиме технологического горения / О. Ю. Долматов [и др.] // Фундаментальные исследования : научный журнал. — 2016. — № 5, ч. 2. — [С. 237-241].
3. **Семенов, А.О.** Современные методы получения матричных материалов для иммобилизации радиоактивных отходов / Д. Г. Демянюк [и др.] // Известия вузов. Физика / Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ). — 2013. — Т. 56, № 4, ч. 2. — С. 124-128.
4. **Семенов, А.О.** Моделирование температурных полей волны самораспространяющегося высокотемпературного синтеза при введении в шихту тепловыделяющей добавки NiAl / В. И. Бойко [и др.] // Цветные металлы : научно-технический и производственный журнал / Норильский Никель ; Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС" ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2010. — № 5. — С. 79-82.
5. **Семенов, А.О.** Управление процессом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза двухкомпонентных борсодержащих материалов ядерно-энергетических установок / Д. Г. Демянюк [и др.] // Известия Томского политехнического университета / Томский политехнический университет (ТПУ). — 2010. — Т. 316, № 4: Энергетика. — С. 23-29.

Публикации в изданиях, входящих в базы Scopus и Web of Science

6. **Semenov A.O.** Self-Propagating High-Temperature Synthesis and Properties of the Material Based on Neodymium Aluminate for Immobilization of High-Level Radioactive Wastes / Semenov A.O., Dolmatov O.Y., Kuznetsov M.C. // Chemistry for Sustainable Development. — 2021. — Vol. 3. — pp.359-367.
7. **Semenov A.O.** Development of matrix material based on aluminate perovskite for immobilization of actinides by self-propagating high-temperature synthesis / Semenov A.O., Dolmatov O.Yu., Kuznetsov M.S. // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. — 2021. — Vol. 332. — iss. 10. — pp. 160-170.

8. **Semenov A.O.** Effect of the Compaction Pressure and Ni Content on the Modified Aluminum-Based Perovskite Synthesis Designed to Immobilize the Radioactive Waste in Combustion Mode / E. S. Tarasova [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2016. — Vol. 135: Issues of Physics and Technology in Science, Industry and Medicine. — 012046, 5 p.

9. **Semenov A.O.** Synthesis and properties of the materials obtained by SHS mode for radiation protection / D. S. Isachenko [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2016. — Vol. 135: Issues of Physics and Technology in Science, Industry and Medicine. — 012015, 5 p.

Объекты интеллектуальной собственности

10. Пат. 2569875 РФ: МПК B22F 3/23. Способ получения материала, содержащего гексаборид лантана и диборид титана: / Демянчук Д.Г., Долматов О.Ю., Исаченко Д.С., Кузнецов М.С., **Семенов А.О.**, Чурсин С.С.; заявл. 12.05.2014; опубл. 27.11.2015, Бюл № 33.

Публикации в других изданиях

11. **Семенов, А.О.** Исследование скорости выщелачивания образцов на основе аллюмината неодима со структурой перовскита синтезированного методом CBC = Investigation of the leaching rate of samples based on neodymium aluminate with a perovskite structure synthesized by the SHS method / А. М. Герасимчук, А. О. Семенов // Современные технологии, экономика и образование сборник материалов II Всероссийской научно-методической конференции, г. Томск, 2-4 сентября 2020 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет ; под ред. А. Г. Фефеловой, Е. А. Покровской, И. О. Болотиной [и др.] . — Томск: Изд-во ТПУ, 2020 . — С. 160-162.

12. **Семенов, А.О.** Определение скорости смещения на атом под действием нейтронных потоков в иммобилизационном матричном материале на основе NdAlO_3 / М. В. Полтавец, О. Ю. Долматов, А. О. Семенов // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Российский и международный опыт подготовки кадров сборник тезисов докладов X Международной научно-практической конференции, г. Томск, 09 – 11 сентября 2020 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа ядерных технологий; Российский фонд фундаментальных исследований; ред. кол. И. В. Шаманин, В. П. Кривобоков, А. Г. Горюнов, В. А. Карелин. — Томск : Ветер , 2020 . — [С. 78-79]

13. **Semenov A.O.** Perovskite-like matrix for immobilization of high-level radioactive waste produced by SHS method / A. O. Semenov, M. S. Kuznetsov, O. Yu. Dolmatov // XV International Symposium on Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 16-20 September, 2019 — Chernogolovka: IPCP RAS, 2019 — P. 415-418

14. **Semenov A.O.** Control Model of SH-Synthesis for Two-Component Systems / D. G. Demyanuk [et al.] // Advanced Materials Research: Radiation and nuclear techniques in material science : Scientific Journal. 2015. — Vol. 1084 : Physical-

Technical Problems of Nuclear Science, Energy Generation, and Power Industry (PTPAI -2014). — P. 728-732.

15. **Семенов А.О.** Control Model of the Synthesis of Binary Systems under Loading Reactive Additives into the Mixture / D. G. Demyanuk [et al.] // Computation, Automation, Information Technologies and Safety Systems in Nuclear Industry : Scientific Journal. — 2015. — Vol. 1084 : Physical-Technical Problems of Nuclear Science, Energy Generation, and Power Industry (PTPAI -2014). — P. 647-651.

16. **Семенов, А.О.** Влияние давления прессования на получение модифицированного перовскита на основе алюминия, предназначенного для иммобилизации радиоактивных отходов в режиме технологического горения / А. О. Семенов, С. В. Иноземцев // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине : сборник тезисов докладов VIII Международной научно-практической конференции, г. Томск, 1-3 июня 2016 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; под ред. О. Ю. Долматова [и др.]. — Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — С. 193.

17. **Семенов, А.О.** Зависимость фазового состава перовскитоподобной иммобилизационной матрицы от параметров подготовки шихты / А. А. Пермикин, А. О. Семенов // XV Всероссийская с международным участием школа–семинар по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А.Г. Мержанова : сборник материалов, Черноголовка, 22-24 ноября 2017 г. / Российская академия наук (РАН), Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения (ИСМАН) ; Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ) ; Московский государственный институт стали и сплавов (МИСиС). — Черноголовка: ИСМАН, 2017. — С. 130-132.

18. **Семенов, А.О.** Определение скоростей выщелачивания образцов матричного материала, полученного в режиме СВС / А. Е. Овсенёв, А. А. Пермикин, А. О. Семенов // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий : материалы конференции в рамках Научной сессии НИЯУ МИФИ, 10-14 апреля 2017г., г. Северск — Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2017. — С. 41.

19. **Семенов, А.О.** Исследование влияния температуры предварительного подогрева на адиабатическую температуру горения матричного материала на основе NdAlO_3 в режиме СВС [Электронный ресурс] / А. А. Пермикин, А. Е. Овсенёв, А. О. Семенов // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий : материалы конференции в рамках Научной сессии НИЯУ МИФИ, 10-14 апреля 2017г., г. Северск — Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2017. — С. 44

20. **Семенов, А.О.** Влияние температуры предварительного подогрева на синтез матричного материала на основе NdAlO_3 в режиме СВС / А. А. Пермикин, А. Е. Овсенёв, А. О. Семенов // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий : материалы конференции в

рамках Научной сессии НИЯУ МИФИ, Северск, 21-25 Марта 2016 / Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" ; Сибирский химический комбинат (СХК) ; Сибирский технологический институт (СТИ) ; под ред. М. Д. Носкова. — Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2016. — С. 42-42а.