

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Физико-технический  
Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии  
Кафедра Физико-энергетических установок

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Иммобилизация РАО в перовскитоподобную матрицу</b>

УДК 621.039.73

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Г	Иноземцев Станислав Викторович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель кафедры ФЭУ ФТИ	Семенов А.О.			

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.	к.ЭКОН.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ	Долматов О.Ю.	к.ф.-м.н., доцент		

Томск – 2016 г.

## Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиозоологии, медицинской физике и ядерной медицине.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
<b><i>Общекультурные компетенции</i></b>	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Физико-технический  
Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии  
Кафедра Физико-энергетических установок

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой ФЭУ  
\_\_\_\_\_ Долматов О.Ю.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ4Г	Иноземцев Станислав Викторович

Тема работы:

Иммобилизация РАО в перовскитоподобную матрицу	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	1618/с от 26.02.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2016
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– литературные источники, содержащие информацию о существующих иммобилизационных матрицах и методах их изготовления;</li><li>– порошки: оксид неодима х. ч. марки ТУ 48-4-186-72; никель марки ПНК-ОТ1; алюминий марки ПА-4;</li><li>– реактор СВ-синтеза.</li></ul>
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– обзор способов обращения с радиоактивными отходами;</li><li>– обзор существующих иммобилизационных матриц;</li><li>– определение параметров, которым должна удовлетворять иммобилизационная матрица;</li><li>– разработка технологии синтеза перовскитной матрицы.</li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ фазового состава полученных материалов;</li> <li>– оценка стоимости исследования, определение экономической и социальной эффективности;</li> <li>– анализ факторов, влияющих на безопасность при проведении исследования.</li> </ul>
<b>Перечень графического материала</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– презентация;</li> <li>– чертеж реактора СВ-синтеза ФЮРА.14.04.02.19 Сб.</li> </ul>

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Верховская Марина Витальевна
Социальная ответственность	Гоголева Татьяна Сергеевна
Иностранный язык	Демьяненко Наталья Владимировна

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

Immobilization radioactive waste in the perovskite matrix

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель кафедры ФЭУ ФТИ	Семенов А.О.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM4Г	Иноземцев Станислав Викторович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОАМ4Г	Иноземцев Станислав Викторович

<b>Институт</b>	<b>Физико-технический</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ФЭУ</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Иерархическая структура работ SWOT-анализ Календарный план-график реализации проекта
3. <i>Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности научного исследования</i>	Определение ресурсоэффективности проекта

**Перечень графического материала** (с точным указанием обязательных чертежей)

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Оценочная карта конкурентных технических решений</i></li> <li>2. <i>Матрица SWOT</i></li> <li>3. <i>Иерархическая структура работ</i></li> <li>4. <i>Календарный план проекта</i></li> <li>5. <i>Бюджет проекта</i></li> <li>6. <i>Определение ресурсоэффективности проекта</i></li> </ol>
---

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.	К.ЭКОН.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОАМ4Г	Иноземцев Станислав Викторович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 0AM4Г	ФИО Иноземцев Станислав Викторович
-----------------	---------------------------------------

Институт	Физико-технический	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных факторов производственной среды (метеоусловия, освещение, шумы, электромагнитные поля, ионизирующее излучение);</li> <li>– опасных факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> </ul>
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	электробезопасность, пожаробезопасность, требования при работе на ПЭВМ и СВС-реакторе

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– воздействие на организм;</li> <li>– приведение допустимых норм;</li> <li>– предлагаемые средства защиты.</li> </ul>
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

### Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM4Г	Иноземцев Станислав Викторович		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа включает в себя 108 страниц, 27 рисунков, 18 таблиц, 98 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: перовскит, иммобилизация радиоактивных отходов, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, матричные материалы

Объектом исследования является иммобилизация радиоактивных отходов в матричный материал методом СВС на основе перовскита.

Цель работы – получение химически устойчивой матрицы для иммобилизации актиноидной фракции радиоактивных отходов методом СВС

В процессе выполнения магистерской диссертации отработана технология получения матричного материала методом СВС. В результате исследования были определены закономерности образования фаз состава матриц.

Степень внедрения: организация технологического процесса иммобилизации актиноидной фракции радиоактивных отходов методом СВС

Область применения: атомная промышленность.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013.

## **Обозначения и сокращения**

РАО – радиоактивные отходы;

МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии;

ВАО – высокорadioактивные отходы;

СВС – самораспространяющийся высокотемпературный синтез;

САО – средне-активные отходы;

НАО – низко-активные отходы;

ЖРО – жидкие радиоактивные отходы;

ТРО – твердые отходы;

АЭС – атомная энергетическая станция;

ОЯТ – отработавшее ядерное топливо;

РЗЭ – редкоземельные элементы;

РФА – рентгенофазный анализ.

## Оглавление

Введение.....	4
1 Литературный обзор .....	7
1.1 Обращение с ВАО.....	7
1.2 Свойства матричных материалов и требования, предъявляемые к ним ...	12
1.2.1 Химическая устойчивость.....	13
1.2.2 Радиационная устойчивость .....	15
1.2.3 Требования к матричным материалам.....	16
1.3 Матричные материалы .....	18
1.3.1 Цементы .....	18
1.3.2 Стекло.....	19
1.3.3 Мультифазная керамика.....	22
1.3.4 Монофазная керамика .....	26
1.3.5 Кальцинат.....	30
1.4 Методы синтеза матриц.....	30
1.5 Выбор матричного материала.....	34
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	39
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	39
3.1.1 Анализ конкурентных технических решений .....	40
3.1.2 SWOT-анализ.....	42
3.2 Планирование управления научно-техническим проектом.....	45
3.2.1 Иерархическая структура работ проекта.....	45
3.2.2 Контрольные события проекта .....	45
3.2.3 План проекта.....	46
3.3 Бюджет научного исследования .....	49
3.3.1 Расчёт материальных затрат .....	49
3.3.2 Расчёт затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных работ) .....	50
3.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы .....	51

3.3.4	Дополнительная заработная плата исполнителей темы .....	53
3.3.5	Отчисления во внебюджетные фонды .....	54
3.3.6	Накладные расходы .....	54
3.3.7	Формирование бюджета затрат исследовательского проекта.....	55
3.4	Организационная структура проекта .....	55
3.5	Матрица ответственности .....	56
3.6	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	58
	Список публикаций студента .....	99

## Введение

Рост накопления возрастающих объёмов радиоактивных отходов является одним из самых опасных и долгосрочных последствий ядерных программ. РАО в основном образуются в рамках деятельности, связанной с работой ядерных энергетических, промышленных, исследовательских реакторов и реакторов ядерных силовых установок. В процессе их работы, с одной стороны, нарабатываются высокоактивные продукты деления и актиноиды, а с другой стороны, активируются различные конструкционные элементы. Первоначально подавляющая часть активности сосредоточена в отработавшем (облученном) ядерном топливе (ОЯТ), а также в активированной части конструкций ядерных установок. [1, 2]. Жидкие высокоактивные отходы (ВАО), которые образуются при переработке отработавшего ядерного топлива, представляют наибольшую опасность.

Радиохимическая переработка ОЯТ является основным «производителем» РАО по количеству активности в рамках замкнутого ЯТЦ. В то же время дополнительными источниками РАО в этих условиях являются и другие производственные процессы: производства по фабрикации МОКС-топлива, предприятия и установки по переработке РАО, которые производят вторичные РАО из радионуклидов, содержащихся в ОЯТ.

Хранение жидких ВАО небезопасно и дорого. Из-за высокой температуры растворов высокоактивных отходов должны они быть охлаждены для предотвращения испарения воды и выпадения осадков. Еще одна проблема, связанная с хранением жидких ВАО – это коррозия металлических контейнеров. Связанная с этим необходимость слива и периодического ремонта ёмкостей может привести к облучению обслуживающего персонала.

Жидкие ВАО, в соответствии с правилами МАГАТЭ, подлежат отвержению [6]. Основная цель заключается в максимальном уменьшении объема и кондиционировании, т.е. перевод в химическо- и радиационно-

устойчивую форму, способную оставаться стабильной в течение всего периода хранения.

Сегодня для иммобилизации ВАО на основе стекла используются два технологических процесса. Установки для иммобилизации ВАО в боросиликатные стекла используются в Великобритании и Франции [7, 8].

С точки зрения экологической безопасности в долгосрочной перспективе, стеклянная матрица может быть использована для иммобилизации отходов, содержащих долгоживущие радионуклиды, представляющие опасность десятки и сотни тысяч лет. В течение этого длительного времени невозможно гарантировать безопасность стекла, входящего в отходы из-за отсутствия химической стойкости и склонностью к спонтанной кристаллизации (расстекловывания) при высоких температурах.

Кристаллические матрицы на основе искусственных минералов обладают неоспоримым преимуществом перед стеклами, природные аналоги которых существуют в различных условиях окружающей среды в течение длительного времени (до 4 миллиардов лет [10]), что доказывает их долгосрочную геологическую стабильность.

Настоящая работа посвящена решению проблемы ВАО. Необходимо определить требования к матричному материалу и в соответствии с требованиями обосновать выбор материалов, способных долгосрочно изолировать радиационно- и биологически-опасные радионуклиды в течение времени, необходимого для снижения их активности до приемлемого уровня.

Целью работы состояло получение химически устойчивой перовкситной матрицы для надёжной долговременной иммобилизации актиноидной фракции ВАО.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- определение требований, которым должна удовлетворять данная матрица;
- выбор подходящих матричных материалов для дальнейших

исследований;

– изучение выщелачивания матричных элементов и включенных радионуклидов из синтезированных матриц.

# 1 Литературный обзор

## 1.1 Обращение с ВАО

Радиоактивные отходы – это вещества, которые не подлежат дальнейшему использованию в любом агрегатном состоянии, а также превышающие уровни содержания радионуклидов, установленные действующими нормами [11]. Объем накопленных отходов в России превышает 880 млн. м<sup>3</sup> с активностью более 8,5 млрд. Ки [2].

В соответствии с действующим санитарным правилами [12] радиоактивные отходы делятся на три группы по уровню удельной активности. Существуют отходы высокоактивные, среднеактивные и отходы низкоактивные. Для биосферы наибольшую опасность представляют высокоактивные отходы [13], т.е., отходы с удельной активностью бета-излучателей, превышающих 10 Бк/кг,  $\alpha$ -излучателей (кроме трансурановых) – 10 Бк/кг, трансурановые элементы – 10 Бк/кг. Большинство из них представлены в виде высокоактивных растворов, полученных в результате переработки облученного ядерного топлива.

В промышленных реакторах используется урановое топливо, обогащенное U-235 от 1,8 до 4,4% [14]. В период работы реактора происходящие ядерные превращения в топливе приводят к образованию других изотопов урана, нуклидов нептуния, плутония и трансплутониевых (ТПЭ), количество и масса которых увеличивается с увеличением глубины выгорания [15].

Деление ядер урана приводит к накоплению активных продуктов деления (ПД) с массовыми числами от 72 до 161 [16]. Их активность в момент остановки реактора может достигать  $10^{17}$ - $10^{18}$  Бк/т [15], но быстро уменьшается в течение пяти лет, после остаётся только около 1% от первоначальной суммы. Актиниды, определяющие совместно с продуктами деления радионуклидный состав ВАО, в основном являются  $\alpha$ -излучателями с радиационной опасностью существенно выше, чем радиационная опасность долгоживущих продуктов деления.

Судьба отработанного ядерного топлива (ОЯТ) вызывает дискуссию. Эксперты из США считают, что оно не должно быть переработано, так как это

может привести к неконтролируемому росту распространения ядерного оружия. Чтобы избежать этого, построены специальные хранилища для отработанного ядерного топлива в Соединенных Штатах. Позиция европейских стран и России (СССР) - хранение отработавшего топлива небезопасно и дорого, и его радиохимическая переработка является неизбежной.

В настоящее время переработка ОЯТ производится гидрометаллургическими способами. Широкое распространение получил метод регенерация урана и плутония посредством экстракции трибутилфосфатом (ТБФ) – Пурекс-Процесс [16].

В разное время предлагались следующие варианты утилизации ВАО: захоронение в стабильных геологических формациях [17, 18], удаление в космос [19], захоронение в океане [20], захоронение в арктических льдах [21], трансмутация составляющих ВАО элементов [22]. На сегодняшний день наиболее применимым вариантом является отвержение ВАО с последующим захоронением в стабильных геологических формациях. В долгосрочной перспективе может быть целесообразным использование трансмутации актинидов [16].

В настоящее время практически все развитые страны признали такую последовательность оптимальной обработки ВАО [15]:

- хранение в жидком виде для уменьшения до приемлемого уровня остаточного тепловыделения;
- отвержение выдержанных ВАО и временное контролируемое хранение;
- окончательное захоронение в стабильных геологических формациях.

Основой этой концепции обращения с радиоактивными отходами является принцип многобарьерной защиты, в соответствии с которым изоляция ВАО должна быть обеспечена системой инженерных и естественные барьеры, которая включает в себя физико-химическую форму отходов, коррозионную устойчивость контейнера, наполнитель из материала низкой сорбции и проницаемости и геологическую формацию [7, 16, 18]. Так как невозможно

обеспечивать безопасность инженерных барьеров в течение всего времени хранения ВАО (сотни тысяч лет), то очевидно, что наиболее важными являются первые и последние барьеры [15, 18]. Тем не менее, геологические условия могут измениться по прошествии длительного времени, так что погребенные ВАО блоки окажутся на поверхности земли или в соприкосновении с подземными водами. В этом случае, основная нагрузка на удержание радионуклидов в окружающую среду будет на первом барьере, степень которого определяется надежностью изоляционных свойств, сохраняющих матрицу [19].

Трудности в работе с ВАО могут создать радионуклиды, период полураспада которых более 15 лет [20, 21]. Среди продуктов деления такие радионуклиды:  $Cs^{137}$ ,  $Cs^{135}$ ,  $Sm^{151}$ ,  $I^{129}$ ,  $Sn^{121m}$ ,  $Sn^{126}$ ,  $Pd^{107}$ ,  $Tc^{99}$ ,  $Sr^{90}$ ,  $Zr^{93}$ ,  $Se^{79}$ . Длительный период полураспада ( $> 15$  лет) имеют также долгоживущие актиноиды (изотопы  $U$ ,  $Np$ ,  $Am$ ,  $Pu$  и  $Cm$ ). Установленные критерии, которые позволяют оценить долгосрочную опасность, представляемую радионуклидом (группой радионуклидов), пока не разработаны.

Сравнительный анализ возможной опасности компонентов ВАО проведен в [20, 21]. Одним из наиболее точных критериев, который пригоден для этой цели, по мнению авторов, является коэффициент дозы  $\epsilon$  (Зв/Бк). Для оценки потенциальной опасности каждого  $i$ -го радионуклида можно использовать продукт его активности в отходах на коэффициент дозы ( $A_i \epsilon_i$ ). Согласно предложенной концепции, продукты деления не представляют долгосрочную угрозу для биосферы. Наибольший риск связан с радионуклидами  $Cs$  и  $Sr$ , однако, их активность снизится до безопасного уровня в течение нескольких сотен лет. Актиниды также опасны в течение более длительного времени. В связи с тем, что периоды полураспада, биологические и химические характеристики компонентов ВАО сильно различаются, необходимость включения всех радионуклидов в одну матрицу вызывает сомнения. Более того, некоторые сложные виды жидких радиоактивных отходов (ЖРО) не могут быть остеклованы по существующей технологии [22]. Отсюда очевидные преимущества концепций фракционирования. Следует отметить следующие

группы радионуклидов, которые имеет смысл выделить в отдельные фракции. Продукты деления (кроме йода, технеция и РЗЭ). Цезий и стронций в этой группе являются производителями тепла первые 600 лет. Они также представляют наибольшую биологическую опасность в это время. После же 15 лет на них приходится 50% активности ПД [17].

Йод и технеций представляют опасность для окружающей среды в течение очень долгого времени. Технеций является основным источником активности продуктов деления после распада *Cs* и *Sr*. Йод и технеций способны образовывать анионы, которые могут мигрировать в почву со скоростью грунтовых вод без заметной адсорбции или ионным обменом.

Актиноиды и лантаноиды. Актиноиды и их дочерние продукты представляют основную угрозу ВАО после тысячи лет захоронения. Большинство лантаноидов представлены в виде стабильных изотопов в течение нескольких лет, и только небольшое количество являются долгоживущими – самарий и европий. В будущем, с развитием технологий трансмутации может быть целесообразным выделение актиноидов в виде отдельной фракции (без лантаноидов, многие из которых имеют большое сечение захвата нейтронов). Тем не менее, в этом случае необходимо разработать приемлемый метод разделения этих групп элементов.

Однако, известные способы группового разделения ТРЕ-РЗЭ (Трамекс процесс [22], процесс Талспик и его модификации [23-26]) имеют существенные недостатки, препятствующие его промышленному применению. Ведутся работы по синтезу селективных экстрагентов, но информация об их промышленной реализации по-прежнему отсутствует. Поэтому на данном этапе целесообразно включать лантаноиды в минеральную матрицу с актинидами. Для осуществления этого есть следующие причины: их трудно отделить путем фракционирования; кристаллохимически они очень похожи друг на друга; лантаноиды могут служить в качестве разбавителей актиноидов активных, тем самым снижая нагрузку радиационного излучения на материал матрицы.

Следует отметить, что по отношению к необходимости разделения ВАО

на фракции до сих пор нет единого мнения. Во Франции переработка отработавшего топлива заканчивается иммобилизацией ВАО, полученных в стеклянной матрице с последующим их возвращением в страну-заказчик [8]. Разработка австралийских ученых под руководством профессора А. Рингвуда керамика Синрок [25] также обеспечивает условия для фракционирования, а также может включать в себя все радионуклиды, попадающих в отходы. Синрок изначально предназначен для утилизации ВАО американских военных, но в будущем может быть использован для гражданских целей. Синрок состоит из таких минералов, таких как пироклора и криптомелан. Первоначальный вариант Синрок (SINROK-C) был разработан для жидких радиоактивных отходов (рафинат Пурекс-процесса) – результата деятельности отходов реактора на легкой воде. Основными компонентами этого вещества являются голландит, цирконолит ( $CaCr_2O_7$ ) и перовскит ( $CaTiO_3$ ). Цирколонит и перовскит связывают актиноиды, перовскит нейтрализует стронций и барий, голландит - цезий.

Концепция фракционирования ВАО частично реализована на ФГУП «ПО «Маяк» [10]. Главной задачей фракционирования являются кислые растворы солей, которые не предназначены для отвержения с помощью существующих технологий в печи типа EP-500 из-за сложности состава. Общая методика процесса следующая. Кубовый остаток после экстракционного доизвлечения  $U$  и  $Pu$  от кислых рафинатов аффинажного цикла и выпаривание воднохвостовых растворов направляется на совместное извлечение радионуклидов  $Cs$  и  $Sr$  экстракционного раствора хлорного дикарболлида кобальта в разбавителе. Полученный концентрат  $Cs$  и  $Sr$  после разрушения гидразиннитрата выпаривается и остекловывается вместе с военными ВАО. Из воднохвостовых растворов после отделения  $Cs$  и  $Sr$  извлекают  $\alpha$ - и  $\beta$ -активные радионуклиды методом осаждения оксалатов. Концентрат РЗЭ и ТУЭ, полученный после растворения осадка оксалатов из  $HNO_3$ , как предполагается, будет направлен на отвержение.

Фракция ТУЭ-РЗЭ представлена в основном трехвалентными элементами с очень схожими свойствами. Это условие определяет специфику выбора

матрицы, пригодной для их иммобилизации.

## **1.2 Свойства матричных материалов и требования, предъявляемые к ним**

Для того, чтобы включенные в матрицу радионуклиды надежно иммобилизовались в течение требуемого времени, матрица должна иметь определенный комплекс физических и химических характеристик.

Тепловые свойства материала – теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность – должны помочь облегчить отвод тепла во время хранения, чтобы избежать чрезмерного нагрева иммобилизованного блока, который может сопровождаться нарушением его целостности или изменения фазового состава. Для многофазной матрицы разница значений коэффициентов теплового расширения отдельных фаз может вызвать микроскопические напряжения, что приводит к уменьшению механической прочности матрицы [38].

Механические характеристики (прочность на сжатие, изгиб и т.д.), также важны, потому что при получении, хранении, транспортировке и утилизации в геологической среде отвержденные отходы испытывают механические нагрузки, которые при недостаточной прочности захороненных блоков могут привести к образованию трещин и разрывов (т.е. увеличению площади поверхности материала), которые в свою очередь влияют на стабильность затвердевших отходов к выщелачиванию подземными водами.

Другие важные особенности матричных материалов включают стойкость к радиационному излучению и химическую стабильность. Поскольку основной способ попадания радионуклидов из захороненных отходов в окружающую среду является выщелачивание грунтовыми водами, оценка свойств отвержденных отходов должна начинаться с химической стойкости [24].

### 1.2.1 Химическая устойчивость

Главным параметром, который характеризует химическую устойчивость матрицы, является скорость выщелачивания радионуклидов и матричных элементов.

Наиболее распространенной и эффективной единицей измерения величины выщелачивания принято считать нормированную скорость выщелачивания [26, 27], выражающую соотношение между активностью радионуклидов, растворенных в воду в течение суток с 1 см поверхности образца, к удельной активности твердого материала [26].

Иногда используется скорость проникновения (penetration rate)

$$PRi = Wi/\rho \quad (1)$$

(см/сут), что является очень важной характеристикой матричных элементов при выщелачивании, так как показывает линейную скорость коррозии матрицы [28].

Как правило, скорость выщелачивания радионуклидов определяется сложным процессом, который связан со скоростью проникновения воды к верхним слоям материала, диффузией радионуклидов на поверхности микроспор, образованных в результате выщелачивания растворимых компонентов, и скоростью обмена сформировавшегося в порах раствора с растворителем [29, 30]. По истечению времени, по мнению ряда авторов разработанных моделей, уменьшается скорость выщелачивания [31, 32, 33].

Реальное поведение отвержденных отходов в геологическом захоронении будет зависеть от целого ряда факторов [34, 35], которые включают температуру, скорость водообмена, состав подземных вод (соленость и  $pH$ ), и т.д.

Влияние  $pH$  и состава выщелоченного раствора может быть выражено в формировании пленки труднорастворимых соединений на поверхности материала, снижая его скорость выщелачивания или растворения. Большинство подземных имеют  $pH \sim 5,5-8$ . В месте захоронения  $pH$  подземных вод может увеличиться (за счет удаления отвержденных отходов щелочных компонентов)

или уменьшиться (за счет накопления продуктов радиолиза). Диапазон этих изменений оценивается как  $\sim 3-9$  [36]. Уменьшение  $pH$  ниже уровня обычно приводит к более быстрому растворению матрицы и увеличению скорости выщелачивания. Увеличение содержания  $pH$  или соли в растворе действует как правило, в направлении противоположном, благодаря образованию труднорастворимых пленок на поверхности материала, за исключением случаев, где матричные элементы способны образовывать прочные комплексы или другие гидроксогруппы.

Влияние скорости потока фильтрата анализировали профессор Хьюз и его коллеги [36]. По их взглядам, в случае разбавленных растворов (большие количества или кратковременные контакты) скорость потери веса контролируется кинетикой гидролиза матрицы. При очень малых объемах или длительном контакте, когда достигается предел растворимости, скорость выщелачивания лимитируется диффузией через поверхность системы "пористое тело / поверхностный слой раствора". При промежуточных скоростях выщелачивающего потока скорость выщелачивания непосредственно влияет на концентрацию различных компонентов, особенно матричных. Влияние соотношения контактной поверхности отходов с раствором для выщелачивания к объёму раствора ( $S/V$ ) менее выражено [37].

К сожалению, в прошлом были некоторые разногласия по поводу выбора соответствующего теста для выщелачивания, и до сих пор не существует какого-либо соглашения, какой именно метод следует рассматривать как "предпочтительный" [38]. Следовательно, прежде чем выбрать конкретный метод исследования определенного матричного материала, важно понимать разнообразие существующих технологий и найти пределы их применимости.

Все существующие тесты могут быть разделены на две группы, в соответствии с режимом, используемым по выщелачиванию. Есть два режима: статический и динамический. В статических условиях отвержденные отходы подвергаются выщелачиванию определенным объемом раствора в течение длительного времени в изотермических условиях. Общий объем растворенных

веществ определяется в конце теста. Обычно, растворение отвержденных отходов практически останавливается после насыщения раствора одним или несколькими основными компонентами, с последующим резким снижением скорости выщелачивания. Такая модель может считаться действительной для условий медленного протекания воды в хранилища с последующим проникновением в биосферу растворов, которые близки к насыщению.

В динамических условиях свежие (ненасыщенные) выщелачивающие растворы непрерывно в контакте с поверхностью отвержденных отходов, и анализируются периодически. Такая ситуация может возникнуть в случае затопления хранилища потоком воды, впоследствии биосфера будет содержать большое количество загрязненной воды, но очень далекой от насыщения.

### **1.2.2 Радиационная устойчивость**

Матрица входит ВАО АЭС будут подвергаться воздействию  $\alpha$ -,  $\beta$ - $\gamma$ -излучению вследствие распада радионуклидов, содержащихся в отходах. Основным источником радиационных эффектов в затвердевших ВАО является  $\alpha$ -распада; вклад  $\beta$ -частиц, и нейтронов деления гораздо меньше [39].

Излучение может повлиять на стабильность отвержденных отходов, во-первых, из-за индуцированного повреждения твердого тела. Основной эффект радиации здесь – формирование вакансий и междоузельных атомов [23]. Во-вторых, эффект радиации проявляется, когда происходит взаимодействие с водой, воздухом или паром в формировании различных коррозионных радиолитических продуктов, включающих азотную кислоту, перекись водорода и радикалов. Радиолитические продукты могут повлиять на стабильность матрицы из-за изменений в условиях  $pH$  раствора или комплексообразовании [71-75]. В некоторых системах эффект радиоллиза может доминировать над процессами ядерных смещения вследствие упругих столкновений [36]. Это особенно актуально для остеклованных отходов при хранении на воздухе [27].

Накопленные в отвержденных отходах радиационные эффекты вызывают

структурные и химические модификации на атомном уровне, что приводит к изменению в объеме микроструктуры, механических свойствах матрицы, его устойчивости к выщелачиванию и к накоплению гелия [23, 39].

Отходы, накопленные в эффектах радиации твердеет индуцированных структурных и химических модификаций на атомном уровне, что может привести к изменению объема микроструктуры

Изменения в структуре/микроструктуре под действием радиации характерно для обеих фаз матрицы: аморфной и кристаллической. Радиационное воздействие на аморфную фазу (например, стекло) может сопровождаться кристаллизацией. Кристаллические фазы отвержденных отходов под действием ионизирующего излучения могут претерпевать аморфизацию. И тот, и другой процесс в конечном итоге приведет к увеличению скорости выщелачивания отвержденного материала – либо из-за физического разрушения материала (увеличение имеющейся площади поверхности), или из-за снижения химической стабильности фазы, содержащей радионуклиды.

Механические свойства матрицы (прочность, пористость) также могут быть изменены путем воздействия облучения. Прочность может быть уменьшена за счет микротрещин, вызванных увеличением внутренних напряжений в материале. При длительном внутреннем накоплении гелия вследствие облучения происходит увеличение пористости, что, в итоге, будет также влиять на прочность материала.

Скорость выщелачивания может быть увеличена путем облучения матрицы. Как правило, это является следствием указанных выше эффектов, ведущих к разрушению кристаллической структуры или росту удельной поверхности твердого тела. Кроме того, как отмечалось выше, выщелачивание может быть ускорено путем воздействия коррозионных продуктов радиолиза.

### **1.2.3 Требования к матричным материалам**

В настоящее время в Российской Федерации требования к основным

свойствам отверждённых высокоактивных отходов регламентируются ГОСТом Р 50926-96 [53].

Во время хранения на отходы воздействует определённое давление. Требование ГОСТа к механической прочности отвержденного блока при давлении составляет 9 МПа. Реальное давление на блоки отходов является зависимой от глубины среды хранения и геологии величиной. Комплексное литостатическое давление за счет веса колонны породы будет соответствовать этой величине на глубине около 330 м (градиент давления  $\sim 27$  МПа/км [39]). Тем не менее, современная концепция обращения с затвердевшими ВАО предполагает обеспечить захоронение в глубоких скважинах – от 500-700 метров до нескольких километров. В таком случае, механическая прочность захороненных блоков, очевидно, должна быть выше.

Обоснованность требований к пребыванию матрицы со встроенными актинидами в радиационно-активной обстановке также вызывает сомнения. Возможно, эти требования слишком жесткие, т. к. через более 100 тысяч лет хранения удельное количество  $\alpha$ -распадов в матрице с 40% -ной загрузкой актинидов составит только  $\sim 4-10$  /г, что значительно ниже, чем значения, заданного в ГОСТе. Следует иметь в виду, что, когда актиноиды в матрице находятся вместе с РЗЭ, радиационная нагрузка в матрице будет существенно ниже.

Интересные и весьма высокие значения максимально допустимой скорости выщелачивания  $10^{-6}$  г/(см<sup>2</sup>·сут) для цезия и стронция, и  $10^{-7}$  г/(см<sup>2</sup>·сут) для плутония. Для иммобилизации цезия и стронция подходит матрица с выщелачиванием матричных элементов со скоростью менее  $2 \cdot 10^{-7}$  г/(см<sup>2</sup>·сут). Матрица, предлагаемая для иммобилизации плутония, не должна обладать скоростью выщелачивания матричных элементов более  $10^{-8}$  г/(см<sup>2</sup>·сут).

Вследствие найденных противоречий, требования действующего ГОСТа к характеристикам отверждённых ВАО, возможно, нуждаются в доработке.

## 1.3 Матричные материалы

### 1.3.1 Цементы

Такой матричный материал как цемент был успешно использован в Соединенных Штатах и Европе для иммобилизации низко- и среднеактивных отходов [40], но захоронения высокоактивных отходов, включенных в цементные блоки, не были проведены. В опытно-промышленных масштабах (лаборатория Саванна Ривер, США) были изучены методы иммобилизации военных ВАО в цемент. Дальнейшее развитие метод получил в Окриджской национальной лаборатории в США, где был разработан FUEТАР-процесс (FUEТАР - это аббревиатура от англ. Formed Under Elevated Temperatures And Pressures). Было показано, что Са-А1 цемент, полученный горячим прессованием со свойствами превосходит портландцемент [41]. Скорость выщелачивания элементов ВАО из FUEТАР-цемента, определенной по методу Сокслета (97 °С, 14 дней), был  $7 \cdot 10^{-4}$  г/(см<sup>2</sup>·сут), что значительно выше, чем значение, полученное для остеклованных отходов в этих же условиях. Технические и физико-химические свойства цементного раствора можно улучшить путем введения в его состав гранул полиэтилена. Полимерные модифицированные цементы имеют высокую удерживающую способность по отношению к щелочным и щелочноземельным металлам (например, Cs и Sr), но при иммобилизации α-активных элементов их преимущества несущественны [42].

Несмотря на то, что фазы цементной матрицы, которые достаточно устойчиво включают в себя радионуклиды (например, циркон и апатит), сегодня не предполагается использовать цемент в качестве материала, пригодного для отверждения ВАО, вследствие высокой проницаемости и, следовательно, относительно низкой устойчивостью к выщелачиванию. Этот метод отверждения ограничен до удельной активности отходов иммобилизации  $3,7 \cdot 10^6$  Бк/кг [43].

### 1.3.2 Стекло

Процесс объединения в стекле отходов заключается в добавлении оксидов ВАО, например, в виде прокаленного порошка или суспензии в стеклообразующие материалы с последующим плавлением полученной смеси до образования однородной массы. Общее содержание оксидов в стекле отходов, как правило, в диапазоне 10-30 масс. %. Большинство радионуклидов растворяется в структуре стекла, образуя решетки, или помещаясь внутрь него. При превышении предела растворимости некоторые элементы образуют дисперсные частицы вторичных фаз.

Одним из наиболее изученных и широко распространенным классом оксидного стекла, используемого для иммобилизации радиоактивных отходов, является силикатное стекло. Его основой является диоксид кремния, действующий в качестве стеклообразователя. Тетраэдры  $SiO_4^{4-}$ , включающие ионно-ковалентными связями кислородный мостик, образуют трехмерный каркас, который легко включает в свой состав оксиды других элементов, обычно связанных с цепями сетки, не перекрывающей кислорода [44].

Природа добавок оказывает существенное влияние на свойства стекла. Добавки в виде оксида цинка, кальция или магния, лишь незначительно увеличивает их устойчивость к воде; добавки оксидов бора и алюминия - значительно [45]. Тем не менее, для того, чтобы алюмосиликатные материалы включали в себя отходы, необходима температура выше 1200 °С; достаточно текучие системы получены только при 1350 °С.

Получение боросиликатного стекла является предпочтительным, поскольку введение бора позволяет уменьшить температуру обработки до 1000-1150 °С, что снижает вязкость расплава и расплав увеличивает растворимость некоторых компонентов отходов [46]. Самый простой состав имеет французское стекольное соединение АVM – 56,1%  $SiO_2$ , 25,3%  $B_2O_3$  и 18,6%  $Na_2O$ . Большинство других марок боросиликатного стекла имеют более сложную структуру, в том числе, в некоторых случаях оксиды  $Li$ ,  $Ca$ ,  $Mg$ ,  $Al$ ,  $Zr$ ,

*Ti, Zn, La*, и т.д. [47].

Наиболее растворимы в боросиликатных стеклах элементы щелочных металлов – бор и кремний. При 60 °С кремний по минимальной степени выщелачивается со скоростью около  $2,6 \cdot 10^{-10}$  г/(см<sup>2</sup>·сут) [48]. Химическая стабильность стекол увеличивается при увеличении содержания диоксида кремния [62], и достигает максимума при содержании его выше 66,67 мол. % [48]. По скорости выщелачивания высококремнеземное стекло может превосходить обычное стекло на 1-2 порядка. Тем не менее, очень высокая температура плавления (1400 °С и выше), летучесть компонентов, чувствительных к составу отходов [49] может сделать такое стекло непригодным для иммобилизации радиоактивных отходов [50]. Применение золь-гелевого процесса позволяет снизить температуру для получения высококремнеземного стекла до ~ 1000 °С, однако, образуют трехвалентные элементы образуют в такой системе сравнительно растворимые силикатные фазы, что снижает стойкость стекла к выщелачиванию [50, 51].

Наряду с силикатными системами в качестве шаблонов для включения радиоактивных отходов используется и фосфатное стекло, химическая стойкость которого определяется присутствием полимерного фосфатного скелета. Большое внимание было уделено фосфатным стеклам в 60-х годах прошлого века, в основном из-за относительно низкой температуры их получения (~ 900-1000 °С), а также возможности включать большое количество молибдатов и сульфатов в качестве компонентов без угрозы ликвации расплава и сокращения химической стойкости материала [50, 52]. Типичное фосфатное стекло содержит  $50 \pm 5\%$   $P_2O_5$ ,  $20 \pm 5\%$   $Na_2O$ , и  $30 \pm 5\%$  оксидов многовалентных металлов [51].

Существенными недостатками фосфатных стекол являются высокая коррозионная способность фосфатного расплава по отношению к металлу и керамике [51, 53], а также тенденции к расстеклованию при относительно низких температурах (~ 400 °С), что приводит к значительным (на три порядка) ухудшениям химической устойчивости. Вследствие этого, фосфатная матрица стекла включена в список материалов, названных МСС бесперспективными. В

результате, к 1972 году исследование фосфатных стекол было практически прекращено в Соединенных Штатах.

В Европе, однако, продолжают исследования возможности использования алюмофосфатных стекол для иммобилизации ВАО. Упор был сделан на натриево- и железо-алюмофосфатные стекла. Эти стекла образуются при температурах ниже 1000 °С (в интервале оптимальных составов – в диапазоне 750-900 °С). Тем не менее, они могут быть получены лишь в виде небольших шариков. В крупных отливках стекла они разрушались при охлаждении [53]. Кроме того, при повышенной температуре алюмо-фосфатное стекло, в присутствии водных растворов, характеризуется относительно низкой химической стойкостью [54].

Устойчивость фосфатного стекла к выщелачиванию примерно того же порядка, что и у боросиликатного. Скорость выщелачивания плутония в диапазоне 20-25 °С  $(0,1-1) \cdot 10^{-7}$  г/(см<sup>2</sup>·сут) [55]. Хотя до сих пор предлагаются более стойкие стекла (например, железо-свинцово-фосфатное), перспектива их реализации в промышленном масштабе еще не была определена.

Хотя многие стекла имеют приемлемую механическую прочность, теплофизические характеристики и радиационную стойкость, однако, анализ литературных данных не может позволить стекольной промышленности выпускать свои изделия в качестве матрицы, пригодной для иммобилизации актиноидов.

Во-первых, стекло не обладает достаточной химической стойкостью. Скорость выщелачивания актинидов из стекла составляет более  $10^{-8}$  г/(см<sup>2</sup>·сут). Учитывая скорость выщелачивания кремния, с точки зрения неизменности скорости выщелачивания в динамических условиях, можно предположить, что при плотности боросиликатных стекол примерно 2,6 г/см<sup>3</sup> линейная скорость коррозии составляет приблизительно  $3,65 \cdot 10^{-4}$  см/год, что указывает на очень ограниченный срок службы стекла в грунтовых водах.

Во-вторых, стекло подвержено спонтанному расстекловыванию – девиртификации. Вероятность расстекловывания увеличивается с ростом

температуры. Типичное боросиликатное стекло, предложенное для иммобилизации ВАО девиртифицируется под действием пара при температуре 300 °С в течение двух недель; при 350-400 °С и 1000 атм. процесс занимает менее 24 часов [56].

Кроме того, существует неопределенность, связанная с долгосрочной стабильностью стекла в местах захоронения. Как известно, общее количество стекла в земной коре, по сравнению с кристаллическими фазами исчезающе мало [54]. Хотя возраст некоторого природного стекла достаточно большой [43], это говорит лишь о том, что стекло может просуществовать в течение длительного периода времени при определенной комбинации физических и химических условий (низкой влажности, низкой температуре в отсутствие её колебаний). Тем не менее, следует помнить, что эффекты, производимые перепадом тепла и влажности на радиоактивное стекло, скорее всего, будут обнаружены после захоронения.

Таким образом, стекло можно рассматривать как надежную матрицу для десятков или даже сотен лет, только при очень щадящих условиях хранения, которые не могут быть гарантированы в течение такого длительного времени.

Недостатки стекла внесли вклад в развитие альтернативных направлений, связанного с использованием кристаллических матриц, имеющих большую стабильность.

### **1.3.3 Мультифазная керамика**

Понятие иммобилизации радиоактивных отходов в группу минеральных фаз заключается в использовании устойчивых минералов в земной коре. Первоначально речь шла не о фракционировании отходов, поэтому большинство из ранних исследований матриц были посвящены минералам, которые способны включать компоненты из всего спектра ВАО. Следовательно, маловероятно подобрать кристаллическую фазу, которая способна обеспечить надежную иммобилизацию радионуклидов ВАО при значении нагрузки, обеспечивающей

рентабельность процесса отверждения. Эта проблема может быть решена только с помощью многофазных керамик, каждая из которых отвечает за фазовые иммобилизации отдельных групп радионуклидов.

С 80-х годов прошлого века, внимание уделяется включению высокоактивных отходов, которые содержат редкоземельные и трансурановые элементы в титанатную керамику, основным компонентом которой является  $TiO_2$  с меньшими количествами других оксидов (как правило, сочетание  $CaO$ ,  $ZrO_2$ ,  $Al_2O_3$  и  $BaO$ ) [115]. Широкое распространение получила мультифазная керамика с высокой устойчивостью, называемая Синрок (Synroc с английского Synthetic Rock – искусственный камень).

Есть несколько разновидностей Синрок керамики. Первым соединением был Синрок-А, который готовили путем плавления при температуре 1300 °С с дальнейшим медленным охлаждением. Кристаллический материал состоял из минеральных фаз перовскита, голландита, цельзиана (бариевого полевого шпата), цирконолита, лейцита и кальцита. В дальнейшем состав был упрощен за счет устранения алюмосиликатных минералов, менее устойчивых к выщелачиванию. Этот модифицированный материал получил название Синрок-В. Он состоял только из трех минералов - голландита, цирконолита и перовскита. Новая модификация требовала для его получения более высокой температуры плавления и в будущем было предложено получение Синрок-В путём горячего прессования при температуре около 1300 °С [55, 57, 58].

Большое количество работ посвящено изучению химической стабильности Синрока. Результаты А. Рингвуда и др. [58, 60, 61] указывают на очень низкую скорость выщелачивания элементов горячепрессованной керамики с имитатором ВАО (9-20%). Так, при 95 °С и 9%-ой нагрузке имитатором ВАО скорость выщелачивания  $Zr$ ,  $Ti$ ,  $Sr$ ,  $Ca$ ,  $U$ ,  $Ba$  и  $Nd$  была соответственно  $5 \cdot 10^{-9}$ ,  $3 \cdot 10^{-9}$ ,  $1,5 \cdot 10^{-7}$ ,  $15 \cdot 10^{-8}$ ,  $5 \cdot 10^{-10}$ ,  $2 \cdot 10^{-7}$ ,  $8 \cdot 10^{-9}$  г/(см<sup>2</sup>·сут). Видно, что скорость выщелачивания различных элементов различаются – сначала выщелачиваются одно- и двухзарядные катионы, оставляя поверхностный слой, обогащенный  $TiO_2$  и в меньшей степени –  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  и  $ZrO_2$  [69, 70, 81],

частично гидратированный в гидротермальных условиях с образованием гидроксидов [62] Аналогичные результаты были получены при изучении обогащенной цирконолитом керамики на выщелачивание. [63, 64]. Слой чрезвычайно труднорастворимых титана, циркония и оксидов/гидроксидов, является дополнительным препятствием на пути дальнейшего растворения матрицы.

Выщелачивание из Синрока таких трансурановых элементов как плутоний, нептуний, кюрий и америций изучено К. Ривом и К. Смитом и их коллегами [88-89] (использовался МСС-1 тест). Скорость выщелачивания  $\text{Am}^{241}$  деионизированной воды в среднем  $2 \cdot 10^{-9}$  г/(см<sup>2</sup>·сут) при 70 °С, а при использовании силиката и бикарбоната скорость ещё меньше. Скорость выщелачивания плутония уменьшается со временем от  $1 \cdot 10^{-9}$  до  $(3-4) \cdot 10^{-10}$  г/(см<sup>2</sup>·сут) (50 дней) [65].

В. Оверсби и А. Рингвудом [67] было установлено, что Синрок керамика не очень чувствительна к нагрузке отходов. Они обнаружили небольшое увеличение скорости выщелачивания с 20% загрузкой, которая, однако, может быть связана с небольшими различиями между условиями горячего прессования образцов. Другие исследователи нашли четкую взаимосвязь между загрузкой керамических отходов (в диапазоне 5-22 масс.%) и их устойчивостью к выщелачиванию [68]. С ростом загрузки отходов (10-23%) в керамике наблюдается увеличение доли крупных минеральных фаз - голландита, цирколонита и перовскита, при этом распределение радионуклидов существенно не меняется между фазами [69].

Механические свойства керамики Синрок отвечают необходимым требованиям. Таким образом, предел прочности при сжатии 810 МПа (для модификации С) [70], в то время как изгиб - 64 МПа (для Формы В) [71]. Тепловые характеристики материала также вполне приемлемы. Небольшое превышение коэффициента линейного расширения значения, установленного ГОСТ Р 50926-96 компенсируется более высокой теплопроводностью [69, 72], что снижает температурный градиент и уменьшает механические напряжения в

материале.

Предлагались и другие многофазовые керамические матрицы для иммобилизации радионуклидов, но они не были изучены с такой степенью детализации, как Синрок. П. Морган и др. [73] исследовали керамику, предназначенную для крупных загрузок коммерческими ВАО. Его основные фазы представлены пироксолом, перовскитом, голландитом, сложными фосфатами РЗЭ, *Ti*, *Sr*, *Zr*, *U*, *Cs*, *Ba* и металлическими сплавами, *Ru*, *Re*, *Mo*. Следует отметить, что высокая степень наполнения отходов достигается во многих случаях, и только щелочных металлов, особенно в паре с фосфатами преподносят трудности, поскольку образуют фазу стекла.

Как вид многофазной керамики может также рассматриваться "суперкальцинат", разработанный в Государственном университете Пенсильвании в 1974-1976 гг Соединенных Штатов представляющий собой коллекцию преимущественно кристаллической огнеупоров, устойчивых к выщелачиванию взаимно совместимых фаз (в основном - флюорит, апатит, поллуцит, шеелит и монацит) [85, 150]. Суперкальцинаты первоначально предназначались для крупногабаритных отходов (70-80% - для ВАО в Пурекс-процессе) [74]. Однако, получение материала высокой плотности, необходимого для применения горячего прессования с материалом матрицы - кремнеземом, приводит к образованию стекловидной массы [59].

В качестве матрицы для иммобилизации ВАО также считается ферросиликатный минералоподобный материал [44], полифазная керамика для иммобилизации завода военных отходов в Саванна-Ривер, США, цирконолит-пироксоловая керамика, гранитоподобная керамика и другая керамика, которые являются основными фазами которого были магнетоплюмбит  $A^{2+} (Al, Fe)_{12}O_{19}$ , корунд  $Al_2O_3$ , фазы типа ловеренгита  $(Ca, Ce)(Ti, Fe, Cr, Mg)_{21}O_{39}$ , нефелин  $NaAlSiO_4$  [73].

Необходимо заметить, что применение многофазной керамики (например, Синрок) может быть предназначено для работы только с нефракционированными отходами. Включение отдельных фракций ВАО

(актининов + РЗЭ) в неё вряд ли оправдано, поскольку иммобилизация произойдет только в хост-фазах данных элементов (перовскита и zirconolite частично). Остальные фазы будут балластом, значительно увеличивающих объем захораниваемых отходов, это неизбежно приведет к росту цен на всю деятельность в течение всего процесса отверждения в целом. Таким образом, отдельно выделенную фракцию актинидов для иммобилизации предпочтительно включать в монофазные керамики.

Многие из изучаемых материалов, такие как минералоподобная керамика, «Синрок», витрометры и т.п., являются перспективными формами отверждения радиоактивных отходов, однако технология их получения и аппаратурное оформление процессов развиты значительно слабее, чем для остекловывания.

### 1.3.4 Монофазная керамика

В качестве мультифазной матрицы рассматривались устойчивые к радиации минералы: глинозем, кремнезем,  $\alpha$ -кварц, рутил, муллит, поллучит, полевой шпат, цеолит, гранит, апатит, и многие другие.

По данным анализа литературных источников основные фракции, пригодные для длительной иммобилизации актинидов фракции ВАО, включают перовскит ( $A^{3+}B^{3+}O_3$ ), монацит, гранат, цирконолит, муратаит NZP и пироклор.

Монацит – это смешанный ортофосфат лантаноидов  $LnPO_4$  ( $Ln = La, Ce, Nd$  и т.д.). Природный монацит содержит примеси урана и тория (до 28% в общей сложности) [74]. В разработке стабильной матрицы для иммобилизации актинидной фракции ВАО был совершён большой объем работы по изучению ортофосфатов РЗЭ со структурой монацита, основные результаты которых приведены в обзоре [75]. Способ парамагнитного резонанса (ЭПР), показал, что ионы в керамических компонентах радиоактивных отходов, полученные путем холодного прессования и спекания, занимают ту же структурную позицию выращиваемых монокристаллов из потока расплава. Это указывает на высокую

стабильность длинной формы ВАО. Образование твердых растворов в серии монацита увеличивает вероятность образования однофазной керамики с равномерным распределением актиноидов [76].

Однако, попытки разработать способ получения монацитово́й матрицы столкнулись с некоторыми трудностями, связанными с повышенными требованиями к раствору, подаваемого для отверждения. Избыток фосфорной кислоты в этом растворе приводит к образованию метафосфата; с её отсутствием происходит фазовое падение типа  $Se_2O_3$ . Обе фазы имеют повышенную выщелачиваемость по сравнению с монацитом. Кроме того, долгосрочная стабильность геологического монацита сомнительна в свете того факта, что он как твердый объект не встречается в природе. Форма этого минерала в природе – монацитовые пески.

Гранат имеет обобщенную формулу  $A^{VIII}_3B^{VI}_2 [XO_4]$ . Основой его структуры является совокупностью чередующихся тетраэдров  $XO_4$  и октаэдров  $BO_6$ , соединенных общими вершинами в трехмерный каркас [74, 75]. В полостях расположены восьмикоординированные катионы. Структура гранат может иметь силикаты, алюминаты, ферриты, германаты и ванадаты. В ней могут быть накоплены актиноиды и редкоземельные элементы в количестве 4,6 масс.% [76].

Из теоретического анализа можно было предположить характер распределения компонентов ионов отходов в структурных позициях NZP. Тем не менее, в последнее время, было показано, что, например, элементы группы железа, способны вступать в структуры спеченной керамики NZP в очень ограниченных количествах (не более 2-3 мол.%, в расчете на  $Fe_2O_3$  или  $Cr_2O_3$ ) [77]. Поэтому, несмотря на, казалось бы, вполне обоснованную теоретическую емкость NZP изоморфного класса соединений по отношению к почти всем компонентам отходов и высокой химической стабильностью самой керамики для окончательных выводов о его полезности в качестве однофазной керамики для иммобилизации радиоактивных отходов требует дальнейшего изучения. Кроме того, в [58, 76] отмечается, что, когда ВАО поэтапно со структурой NZP могут образовывать дополнительную фазу монацита, концентрирующей РЗЭ. В этом

случае, возникает вопрос о целесообразности NZP-керамики для иммобилизации фракций актиноидов. Это керамика могла найти применение для отверждения нефракционированных ВАО.

Перовскит имеет общую формулу  $ABO_3$ . Природные перовскиты включают твердые растворы между  $A^{2+}B^{4+}O_3$ ,  $A^+B^{5+}O_3$  и  $A^{3+}B^+O_3$  [64, 70]. Исследования изотопного состава перовскитов показали, что они являются весьма эффективными в сохранении урана, тория и свинца, и их можно рассматривать как перспективный тип матрицы для актиноидов и их дочерних продуктов распада [74].

Большинство соединений общей формулы  $ABO_3$  имеют структуру перовскита. В этой структуре, катион "A" согласован с двенадцатью атомами кислорода и катион "B" - с шестью. В этом случае между "A", "B" и "O", должно выполняться равенство:

$$R_A + R_O = t \cdot \sqrt{2} \cdot (R_B + R_O) \quad (2)$$

где  $R_A$ ,  $R_B$  и  $R_O$  – ионные радиусы [71]. Перовскит устойчив, если отношение  $t$  колеблется в диапазоне от 0,8 до 0,9. Это сохраняется и в несколько более широком диапазоне значений  $t$ .

Перовскит типа  $A^{2+}B^{4+}O_3$  имеет кубическую или ромбическую симметрию, а  $A^{3+}B^{3+}O_3$  – ромбоэдрическую или ромбическую. Большинство из этих соединений имеют орторомбическую структуру, подобную  $GdFeO_3$ .

Радиационная стойкость легированных кюрием перовскитов изучена в [73]. При дозе  $2,04 \cdot 10^{24}$   $\alpha$ -распадов/ $m^3$  изменение объема составило 0,8%. Когда доза эквивалентна той, которую Синрок получит за 5-10 лет, перовскит останется кристаллом [69].

Было высказано предположение, что перовскит ( $CaTiO_3$ ) является термодинамически стабильным минералом в природе, способный непосредственно или через водный раствор реагировать с силикатными минералами, такими как кварц, полевой шпат, плагиоклаза с образованием сфена. Тем не менее, долгосрочная стабильность геологического возраста убедительно доказана природными образцами этого минерала, согласно

В. Оверсби и А. Рингвуду [46] их возраст достигает полмиллиарда лет.

Максимальная концентрация дополнительных компонентов, соответствующих изоморфной емкости минерала составляют 20-25% для актиноидов, около 15-18% от суммы ниобия и тантала, 10-12% для суммы РЗЭ, около 8% на сумму из элементов семейства *Fe* и *Mg*, около 4,6% для *Al*, 2% *Si*, приблизительно 1% для *K*, *Na*, *Sr* и *Cr*. Например, был синтезирован цирконолит содержащий (масс.%):  $UO_2$  - 27%,  $ThO_2$  - 20%,  $Nb_2O_5$  - 14%,  $TR_2O_3$  - 29%,  $PuO_2$  - 11% [25, 33, 70].

Цирконолит очень устойчив к выщелачиванию, по некоторым данным - ещё более перовскита. Так, при изучении стабильности фаз, составляющий керамические компоненты Синрока, имеет место большая устойчивость к выщелачиванию цирконолита по сравнению с перовскитом. Такой же вывод был сделан Л. Хенчем с коллегами [79], они расположили фазы Синрока-*D* в порядке возрастания степени выщелачивания матричных элементов таким образом: цирконолит <шпинель <перовскит <нефелин. Тем не менее, разность в скорости выщелачивания кальция из перовскита и цирконолита, заметная в кислой среде, является незначительной в нейтральных или слегка щелочных средах [80].

Фазы со структурой пирохлора являются одними из наиболее подходящих для иммобилизации делящихся материалов, так как они могут включать в себя нейтронные поглотители (*Gd*, *Hf*), обеспечивая контроль критичности [81].

Изучение радиационной стойкости пирохлора на примере легированного кюрием образца провели Н. Вольдом и П. Офферман [82]. Было установлено, что при дозе  $\sim 1,6 \cdot 10^6$   $\alpha$ -распадов/ $m^3$  изменения в объёме составляют 4,2%. Аналогичное значение получена для цирконолита - 5%. Кроме того, в данной дозе в обоих случаях наблюдается наличие микротрещин. Расчетное значение изменения объема насыщения (доза  $\sim 10^{25} - 10^{26}$   $\alpha$ -распадов/ $m^3$ ) составляет  $\sim 10,3\%$ .

Тем не менее, устойчивость к выщелачиванию пирохлора согласно некоторым данным ниже, по сравнению с перовскитом. Так, скорость

выщелачивания  $Am^{241}$  из пироклора  $Gd_2Ti_2O_7$   $3,9 \cdot 10^{-8}$  г/см<sup>2</sup>·сут, что почти в 70 раз больше определённой в тех же условиях скорости выщелачивания америция  $GdAlO_3$ , имеющей структуру перовскита.

### 1.3.5 Кальцинат

Одним из основных процессов отверждения ВАО является кальцинация. «Кальцинат» представляет собой продукт, полученный из жидких ВАО путем удаления из них летучих компонент, например, воды и нитратов. Процесс происходит при температурах в диапазоне от 400 °С до 900 °С. В результате образуется смесь оксидов продуктов деления, актиноидов и продуктов коррозии, образованных при хранении жидких ВАО в «танках». Полученный кальцинат не является химически устойчивым материалом из-за своей рыхлой структуры (удельная поверхность – 0,1-5 м<sup>2</sup>/г) и химической непрочности некоторых оксидов.

Для улучшения свойств кальцината используют различные технологии. В одной из них создается композит, включающий кальцинат и инертные связующие материалы, такие как карбид кремния или алюминий в составе металлической матрицы.

Другая возможность связана с так называемым «суперкальцинированием». Этот процесс по существу производит керамический компаунд, включающий ВАО и специальные химические компоненты, и происходит при температуре ~ 1200 °С. Суперкальцинат требует размещения в специальной матрице, но не нуждается в добавках, поскольку он обладает достаточной химической устойчивостью. Кальцинат, как правило, является первичным продуктом для технологий промышленного остекловывания ВАО.

## 1.4 Методы синтеза матриц

Основными методами для производства вылеченных форм ВАО могут называться твердофазный синтез (холодное прессование с последующим

спеканием (ХПС) и горячее прессование (НР)), плавление (в печи или индукционное в холодном тигле (ИПХТ)), гидротермальный синтез и самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС).

Плавление представляет собой простой, удобный и хорошо признанный метод, который в настоящее время используют для получения относительно легкоплавкой формы - стекла. Нагревание может быть осуществлено через стены печи, а также электрический ток, проходящий через расплав. Схема с использованием электрического тока непосредственно в расплаве используется на ФГУП «ПО «Маяк», в печи ЭП-500 для алюмофосфатного стекла. Недостатком метода в целом является высокая агрессивность расплавов (в частности фосфатов) по отношению к множеству конструкционных материалов.

Весьма перспективным методом признан ИПХТ. В дополнение к стеклу он производит огнеупорную минеральноподобную форму отходов. Способ заключается в следующем: исходную смесь оксидов (или карбонатов), образующих матрицу элементов и отходы в необходимых соотношениях помещают в тигель, наполненный "стартовым" материалом (металлический титан в виде или графитовое кольцо, который после нагрева извлекают). Расплавленный материал заливают в форму. Преимуществами этого способа являются относительно простая технология, которая не требует очень тонкого измельчения шихты для ее полной гомогенизации и высоких давлений. Также, плавление может быть проведено в гарниссажном слое, который предотвращает контакт расплава со стенами тигля. Полученный методом ИПХТ Синрок-С по своему минеральному составу близок к горячему прессованию, однако, существенно отличается большим размером кристаллов и относительно высокой пористостью. Отмечена склонность молибдена к образованию относительно растворимых молибдатов, в которых локализуется значительная часть *Sr*, *Ba* и *Cs* [18], что делает необходимым поддерживать строгие восстановительные условия, или предварительно выделять щелочные элементы из ВАО [71].

В твердофазном синтезе основными этапами являются изготовление порошков необходимого состава, формирование заготовки и уплотнение при

высокой температуре [32]. Для достижения высокой степени уплотнения применяют холодное и горячее прессование с последующим спеканием.

Горячее прессование обеспечивает получение материала, имеющего очень хорошие механические свойства (низкая пористость, высокая плотность, высокая механическая прочность). В литературе описаны способы получения керамики методом одноосного горячего прессования в графитовых формах [57]; горячего изостатического прессования, одноосного горячего прессования в гофрированных ящиках (сильфоны) [83]. Применение нашёл последний метод. В соответствии с ним смесь компонентов, смешанная с раствором ВАО, моделирования (имитатор), кальцинируется при 750 °С в восстановительной атмосфере (смеси  $Ar - 4\% H$ ) в течение 2 часов. Смесь загружается в стальной сильфон. После нагрева до 1200 °С и откачки применяется одноосная нагрузка в интервале 14-21 МПа, вызывая равномерное складывание контейнера для хранения. После горячего прессования готовые цилиндры Синрока отправляются на хранение. Этот метод используется для производства керамики для иммобилизации ВАО на опытном заводе ANSTO в Австралии [35].

Общим недостатком обоих способов, серьезно ограничивающим их полезность для целей иммобилизации ВАО, является необходимость работы с мелкодисперсными ВАО.

Гидротермальный синтез позволяет проводить реакцию между малореакционными веществами при умеренных температурах (от 200 до 800 °С). Основной трудностью, которая делает метод неподходящим для производства, является необходимость использования высокого давления (от сотен до тысяч атмосфер) [63].

При СВС-процессе происходит самопроизвольное распространение зоны твердофазной реакции в спрессованных образцах исходных компонентов. Смесью компонентов является тщательно подобранной пропорцией окислителей и восстановителей. В качестве окислителя обычно используют оксиды металлов с переменной валентностью в высших степенях окисления ( $Fe_2O_3$  или  $Fe_3O_4$ ,  $MoO_3$  и др.). Восстановителем служит алюминий, металлический титан и т.п.

Скорость распространения зоны реакции зависит от состава и может изменяться от долей миллиметра до десятков миллиметров в секунду; температура реакционной зоны составляет  $(1-3) \cdot 10^3$  К.

Метод относительно прост и удобен, однако предъявляет особые требования к составу смеси исходных компонентов. Недостатком является трудность получения по структуре однородного материала.

Из предложенных способов получения матриц в настоящее время наиболее широко используется только два – плавление и твердофазный синтез. В последнем случае необходимо учитывать характерную особенность химических реакций в смесях твердых веществ - их стабильность и локализирующий процесс в точках контакта между исходными реагентами [83]. Как известно, в кинетике реакций смесей в твердом состоянии, константа скорости этого процесса ограничена в основном по скорости компонентов диффузионного слоя, и полученный продукт, как правило, обратно пропорционален квадрату взаимодействия размера частиц полупродукта [84].

Таким образом, для получения оксидной керамики высокого качества необходимо измельчение и смешивание исходных оксидов.

Весьма перспективны немеханические технологии измельчения (плазмохимическое, криохимическое, золь-гель, различные методы соосаждения и конденсации паров, что позволяет достигать дисперсии  $\sim 0,1-0,01$  мкм [49].

Из механических методов, широко используется в промышленности помол в шаровых мельницах в среде мелющих тел, предоставляя широкий спектр высококачественного воздействия на обрабатываемый материал – удар, раздавливание, истирание. Тем не менее, характерен предел энергонапряженности (скорость обработки) для шаровых мельниц. Фракционный состав материалов, измельченных в шаровых мельницах, ограничивается, обычно, дисперсностью  $\sim 1$  мкм [49].

Это ограничение снимается с помощью планетарного устройства, в которых измельчение происходит под влиянием двух инерционных сил и силы Кориолиса. В таких устройствах реализуется локальное давление 2-3 ГПа и

температура 600-800 К. Действие больших инерционных сил на мелющие тела и материалы, подлежащие измельчению, приводит в сотни раз к более быстрому измельчению, и снижению средней дисперсности при шлифовании некоторых хрупких материалов до  $\sim 0,02$  мкм [49], вызывает активацию материала и инициирует механохимические реакции в смесях твердых тел [54].

Известно, что при механической активации в оксидных системах обычно происходит к увеличению числа дефектов материала и переход его в аморфное состояние. Это увеличивает количество точечных контактов, также происходит генерация дефектов их миграция в объеме твердых тел. Это приводит к понижению энергии активации и содействует распространению диффузионно-контролируемых процессов, в том числе реакций в твердой фазе [85].

Предварительная механическая активация оксидов исходной смеси может уменьшить температуру синтеза. Положительное влияние механической активации наблюдалось в процессе спекания корундовой керамики, синтез и спекание кордиерита, цирконолита, алюмината лантана, манганитов РЗЭ (*La, Pr, Nd, Sm*). В последнем случае, твердофазные реакции проходили в измельчителе полностью в течение 180 минут, т.е. проходил механохимический синтез.

Тем не менее, как правило, после активации смесей оксидов имеют место быть рентгеноаморфные формы соединения и в таком случае необходима термообработка для получения кристаллического продукта, но уже при температуре обработки на 300-400 °С ниже, чем обычный тепловой синтез [65]. При прочих равных условиях механохимической обработки исходных порошков можно увеличить выход целевого фазы и улучшить свойства получаемого продукта [62].

## **1.5 Выбор матричного материала**

Анализ имеющихся данных в свете текущих требований показал, что в качестве материала, пригодного для надежной длительной изоляции актинидов может рассматриваться только минералоподобная матрица.

Наиболее значительными недостатками стеклообразных форм иммобилизации радиоактивных отходов являются, во-первых, отсутствие химической стойкости. Данные о взаимодействии с водными растворами не позволяют рассматривать эти матрицы как надежный барьер для миграции радионуклидов в биосфере с точки зрения окончательного удаления отходов. Таким образом, скорость выщелачивания актинидов, как правило, больше, чем  $10^{-7}$  г/см<sup>2</sup>·сут и резко возрастает с увеличением температуры. Во-вторых, возможность расстекловывания является способностью образовывать кристаллические или аморфные фазы, что приводит к снижению прочности материала в целом. Связанные с этим процессом значительные увеличения удельной площади поверхности неизбежно приведет к более быстрому выщелачиванию. Другим недостатком является несовместимость стекломатрицы с некоторыми компонентами отходов, что приводит к разделению (фазовое разделение при кристаллизации) фазы. Среди компонентов плохо растворимы силикатные и боросиликатные стекла, включающие, например,  $PuO_2$ . Эти недостатки свойственны и композиционным материалам, содержащим фазу стекла (стеклокерамика).

Другим недостатком композиционных матриц можно считать различия в свойствах материалов, которые могли бы привести к разрушению при радиационном и тепловом стрессе.

Иммобилизация индивидуальных актиноидных фракций полифазных материалов, разработанная для нефракционированных отходов и которая может включать в себя весь спектр компонентов ВАО (например, СИНРОК) вряд ли оправдана, поскольку эта фракция способна включать только одну или две фазы, в то время как остальные являются балластом.

Таким образом, для иммобилизации актиноидных фракций правильно использовать отдельные кристаллические фазы, имеющие значительно лучшую химическую стойкость и геологическую стабильность, чем стекло, с одной стороны, и в состоянии обеспечить более высокую степень загрузки отходов, чем многофазные другие материалы, с другой. Важную роль в выборе матрицы

играет максимально высокий уровень включенных в матрицу отходов.

В таблице 1.1 приведены значения максимальных теоретических загрузок ионами лантаноидов потенциальных фаз актиноидов (на основании формульного состава).

Таблица 1.1 – Максимально возможная загрузка кристаллических фаз лантаноидами (*Gd*)

Структурный тип	Формула	Загрузка, масс.%
Муратаит	$Na_2Gd_2Zr_2Ti_7O_{22}$	25%
NZP	$CaGdZr(PO_4)_3$	30%
Цирконолит	$GdAlTi_2O_7$	40%
Гранат	$Gd_3Al_5O_{12}$	59%
Пирохлор	$Gd_2Ti_2O_7$	60%
Монацит	$GdPO_4$	62%
Перовскит	$GdAlO_3$	68%

Максимальная нагрузка редкоземельными элементами может быть осуществлена в случае использования перовскитной матрицы. Несколько меньше нагрузка возможна для матрицы со структурой монацита, пирохлора и граната. Однако, скорость выщелачивания актиноидов из пирохлоровой матрицы значительно выше, чем перовскита. Матрицам на основе монацита присущи ограничения, отмеченные ранее – трудности, возникшие в синтезе и неопределенность с долгосрочной стабильностью монолитных объектов монацита в естественных условиях. Матрица на основе цирконолита, NZP и муратаита могут включать в свой состав гораздо меньшее количество РЗЭ.

Таким образом, совокупность характеристик (химические, геологические, радиационная стойкость, максимальная загрузка отходов) указывает, что среди всех рассмотренных потенциальных матриц для иммобилизации актиноидной фракции ВАО матрица со структурой перовскита наиболее предпочтительна.

## 2 Экспериментальное получение перовскитоподобной керамики

Синтез материалов методом СВС в данной работе включал в себя следующие этапы:

- смешивание порошков исходных реагентов согласно стехиометрическому расчету по соответствующим уравнениям реакций;
- смешивание в кубическом смесителе;
- прессование исходной смеси реагентов в цилиндрические таблетки различного диаметра и высоты при вариации значений плотностей материала получаемых образцов путем изменения давления прессования;
- осуществление процесса СВС в лабораторной установке и получение образцов функциональных материалов;
- обработка полученных образцов.

Для приготовления смеси использовались промышленно изготовленные порошки:

- оксид неодима марки х. ч., ТУ 48-4-186-72;
- никель марки ПНК–ОТ1;
- алюминий марки ПА–4.

Смешивание порошков исходных реагентов производилось в кубическом смесителе марки AR 403 All-Purpose Equipment (Германия), представляющей собой полый вращающийся куб с тремя стержнями из нержавеющей стали, предназначенными для усиления смешивания компонентов смеси.

Прессование исходной шихты производилось с помощью гидравлического лабораторного пресса ПГЛ-12 (максимальное давление 50 МПа на поверхность площадью 30 см<sup>2</sup>), разработанном специально для оснащения производственных аналитических и исследовательских лабораторий.

После перемешивания в кубическом смесителе полученная шихта прессовалась в цилиндрические образцы диаметром 30 мм и высотой 12-15 мм при различном давлении – 15, 20, 25, 30 МПа, с целью получения образцов разной плотности.

Металлические пресс-формы изготовлены из инструментальной стали. Длительность прессования составляла 15 мин.

Синтез осуществлялся на экспериментальном стенде пирометрических исследований закономерностей процесса СВС, включающем в себя СВС-реактор, представленный на рисунке 1.

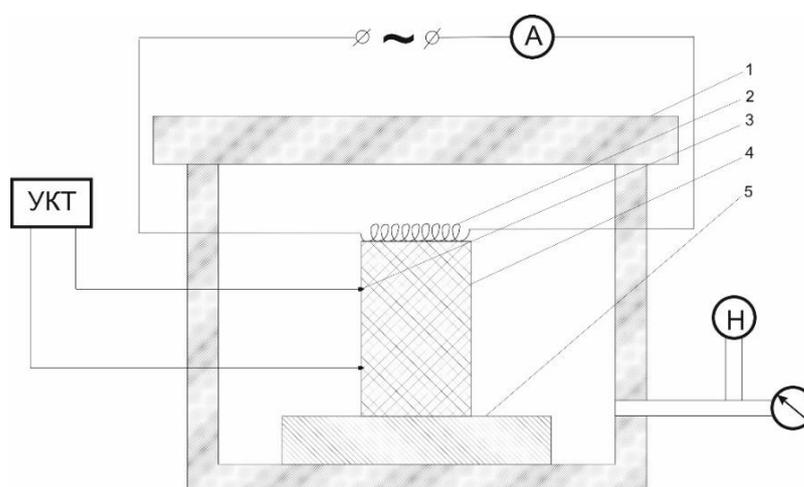


Рисунок 2.1 – Экспериментальная установка для получения СВС–материалов:  
1 – крышка реактора; 2 – вольфрамовая нить; 3 – термопара;  
4 – синтезируемый образец; 5 – несгораемая подставка;  
УКТ – универсальный контроллер температуры; Н – вакуумный насос

Информация о полученных фазах была получена после проведения процедуры рентгенофазового анализа на рентгеновском дифрактометре XRD-7000S. Данная модель дифрактометра позволяет проводить рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ любых поликристаллических материалов, неорганических порошков, сплавов, минерального сырья, анализ керамики, огнеупоров, фармацевтических препаратов.

После проведения процедуры анализа были получены данные о составе исследуемых образцов.

### **3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Целью данного раздела является проектирование и создание конкурентоспособных разработок и технологий, отвечающих предъявляемым требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

В данной диссертационной работе проведена серия экспериментов по перовскитоподобной керамики для иммобилизации радиоактивных отходов. Информация о полученных образцах была получена после проведения процедуры рентгенофазового анализа на рентгеновском дифрактометре XRD-7000S.

#### **3.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Результатом исследования является определение пригодности перовскитной матрицы для надежного и долговременного безопасного хранения радиоактивных отходов актиноидной фракции.

Целевым рынком данного исследования будут являться государственные корпорации по атомной энергетике, атомная и смежные отрасли научной

промышленности, предприятия по хранению и переработке радиоактивных отходов.

Сегментировать рынок услуг по разработке оптимальной методики создания керамических матриц для хранения РАО можно по степени потребности использования данной методики. Результаты сегментирования представлены в рисунке 3.1.

		Получение перовскитоподобной керамики		
		Атомная промышленность	Научная отрасль	Хранение и переработка РАО
Потребность	Сильная			
	Слабая			

Рисунок 3.1 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию оптимальной методики измерения

### 3.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Как упоминалось выше, в данной работе определена пригодность использования керамической матрицы для иммобилизации радиоактивных отходов. Таким образом, для анализа конкурентных технических решений стоит рассмотреть методы отвержения радиоактивных отходов, наиболее часто применяемые на практике:

- иммобилизация в стеклянной матрице;
- иммобилизация в матрице СИПРОК
- иммобилизация с использованием цементированых отходов.

Оценочная карта анализа представлена в таблице 2.1.1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее

сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Таблица 3.1.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{\phi}$	$B_{k1}$	$B_{k2}$	$K_{\phi}$	$K_{k1}$	$K_{k2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
2. Удобство в эксплуатации	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
3. Энергоэкономичность	0,04	5	3	3	0,2	0,12	0,12
4. Надежность	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
5. Уровень шума	0,01	5	5	5	0,05	0,05	0,05
6. Безопасность	0,06	5	5	5	0,3	0,3	0,3
7. Потребность в материальных ресурсах	0,04	4	4	4	0,16	0,16	0,16
8. Функциональная мощность	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
9. Помехоустойчивость	0,07	5	3	3	0,35	0,21	0,21
10. Простота эксплуатации	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность метода	0,03	5	4	4	0,15	0,12	0,12
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15

Продолжение таблицы 3.1.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,2	5	4	4	1	0,8	0,8
4. Послепродажное обслуживание	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
Итого	1				4,96	3,86	3,66

На основании представленного выше анализа можно сделать вывод, что разработанная в данной диссертационной работе методика является оптимальной для использования в практических целях. Конкурентные методы определения изотопного состава достаточно уязвимы, в силу отсутствия конкретного алгоритма действий, способного уменьшить погрешность измерительного процесса.

### 3.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта,

например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

В таблице 3.1.2 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 3.1.2 – Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта	Сильные стороны проекта				
	C1	C2	C3	C4	C5
B1	+	+	+	+	+
B2	+	+	+	+	+
B3	+	+	–	+	+
B4	+	+	+	+	+
B5	+	+	+	+	+

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 3.1.3.

Таблица 3.1.3 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1. Актуальность выбранной темы.</p> <p>С2. Применение современного оборудования.</p> <p>С3. Бюджетное финансирование</p> <p>С4. Наличие достоверных результатов измерений.</p> <p>С5. Возможность оптимизации процесса подготовки образцов.</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1. Ограниченное количество иммобилизованных фракций.</p> <p>Сл2. Ограниченное количество измерений.</p> <p>Сл3. Невозможность измерений механической прочности.</p> <p>Сл4. Длительный срок поставки материалов, необходимых для создания матрицы.</p> <p>Сл5. Длительный срок измерения фазового состава.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование для исследований инфраструктуры НИ ТПУ.</p> <p>В2. Разработка рекомендаций по методу синтеза матриц.</p> <p>В3. Возможность создания новых условий для проведения эксперимента.</p> <p>В4. Поддержка развития атомной энергетики со стороны государства.</p> <p>В5. Дополнительный спрос на результаты исследования.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»:</p> <p>1. Полное обеспечение условий проведения экспериментов.</p> <p>2. Появление дополнительного спроса и финансирования, обеспеченных актуальностью тематики.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»:</p> <p>1. Срок поставки и наличие материалов, необходимых для проведения экспериментов, хоть и играют роль, но в сущности незначительную.</p> <p>2. Также незначителен и срок измерений образцов, т.к. это сложная операция с повышенной точностью.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Возможность отсутствия реагентов.</p> <p>У2. Вероятность разработки подобных методик анализа изотопного состава другими организациями.</p> <p>У3. Задержка финансирования экспериментов.</p> <p>У4. Низкий спрос на результаты исследования или его отсутствие.</p> <p>У5. Разработка новейших методик создания матриц.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»:</p> <p>1. Актуальность темы и широта распространения исследований на данную тематику заставляет заказчиков заранее обеспечить непрерывные поставки порошков для дальнейших исследований.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»:</p> <p>1. Ограниченное количество измерений, отсутствие измерений на механическую прочность, сбой в поставках составляющих порошков – всё это представляет собой наиболее уязвимые места разработки. Однако, рассмотренные возможности проекта могут снизить влияние перечисленных выше недостатков.</p>

Таким образом, выполнив SWOT-анализ можно сделать вывод, что на данный момент преимущества разработанной методики измерений значительно преобладают над её недостатками. Все имеющиеся несовершенства можно легко устранить, воспользовавшись перечисленными выше возможностями.

### 3.2 Планирование управления научно-техническим проектом

#### 3.2.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта.



Рисунок 3.2.1 – Иерархическая структура работ

#### 3.2.2 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 3.2.2.

Таблица 3.2.2 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка технического задания на НИР	1.02.2016	Приказ по ФТИ
2	Составление и утверждение технического задания	3.02.2016	Задание на выполнение исследования
3	Выбор направления исследований	5.02.2016	
4	Подбор и изучение материалов по теме	10.02.2016	Отчёт
5	Календарное планирование работ	12.02.2016	План работ
6	Изучение особенностей подготовки образцов	13.02.2016	Отчёт
7	Освоение методики синтеза матриц	14.02.2016	Отчёт
8	Проведение экспериментов	15.02.2016-30.03.2016	Отчёт
9	Выполнение расчётов и анализ полученных данных	28.03.2016	Отчёт
10	Обобщение и оценка результатов	30.03.2016	Отчёт
11	Составление пояснительной записки	14.02.2016-25.04.2016	Пояснительная записка
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	26.04.2016	
13	Подготовка к защите	27.04.2016-25.05.2016	

### 3.2.3 План проекта

В рамках планирования исследовательского проекта построен календарный план-график с помощью диаграммы Ганта. В данном случае работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения работ.

Линейный график представлен в таблице 2.2.3.

Таблица 3.2.3 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка технического задания	2	1.02.2016	3.02.2016	Руководитель
2	Составление и утверждение технического задания	2	3.02.2016	5.02.2016	Руководитель
3	Выбор направления исследований	5	5.02.2016	10.02.2016	Руководитель, студент
4	Подбор и изучение материалов по теме	2	10.02.2016	12.02.2016	Студент
5	Календарное планирование работ	1	12.02.2016	13.02.2016	Руководитель, студент
6	Изучение особенностей подготовки образцов	1	13.02.2016	14.02.2016	Студент
7	Освоение методики синтеза матриц.	1	14.02.2016	14.02.2016	Студент
8	Проведение экспериментов	45	15.02.2016	30.03.2016	Студент
9	Выполнение расчётов и анализ полученных данных	2	28.03.2016	30.03.2016	Студент
10	Обобщение и оценка результатов	1	30.03.2016	30.03.2016	Руководитель, студент
11	Составление пояснительной записки	72	14.02.2016	25.04.2016	Студент
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	1	26.04.2016	27.04.2016	Руководитель, студент
13	Подготовка к защите	29	27.04.2016	25.05.2016	Студент

В таблице 3.2.4 представлен календарный план-график проведения научного исследования.

Таблица 3.2.4 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал.дн	Продолжительность выполнения работ													
				Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь	
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Разработка технического задания	Руководитель	2	■													
2	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2	■													
3	Выбор направления исследований	Руководитель, студент	5	■	■												
4	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	2		■												
5	Изучение особенностей подготовки образцов	Студент	1		■												
6	Освоение методики синтеза матриц	Студент	1		■												
7	Проведение экспериментов	Студент	45		■	■	■	■	■								
8	Выполнение расчётов и анализ полученных данных	Студент	2						■								
9	Обобщение и оценка результатов	Руководитель, студент	1						■								
10	Составление пояснительной записки	Студент	72		■	■	■	■	■	■	■						
11	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, студент	1									■					
12	Подготовка к защите	Студент	29										■	■	■		

■ Руководитель      ■ Студент

### 3.3 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

#### 3.3.1 Расчёт материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхи},$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхи}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15-25 % от стоимости материалов.

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию и приобретение канцелярских товаров. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 2.3.1.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 2,05 \cdot 3,6 \cdot 26 + 2,05 \cdot 0,5 \cdot 400 = 601,$$

где  $C_{эл}$  – тариф на промышленную электроэнергию (2,05 руб. за 1 кВт·ч);

$P$  – мощность оборудования, кВт;

$F_{об}$  – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 601, рубль.

Таблица 3.3.1 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Электричество	–	293,6 кВт·ч	2,05	601
Бумага	SvetoCopy	200	0,38	76
Печать на листе А4	–	200	1,5	300
Ручка	Bic	1	50	50
Доступ в интернет	–	4 месяца	350	1400
Всего за материалы				2058,8
Транспортно-заготовительные расходы				0
Итого по статье $C_m$				2058,9

### 3.3.2 Расчёт затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных работ)

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по конкретной теме.

В данной исследовательской работе к спецоборудованию, необходимому для проведения экспериментальных работ, относится кубический смеситель марки AR 403 All-Purpose Equipment (Германия) – 10 лет.

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$C_{аморт} = C_{об} / T,$$

где  $C_{об}$  – стоимость оборудования (руб);

$T$  – срок службы (дней).

$$C_{аморт} = (3000000 / 3650) = 821,9 \text{ руб/дн.}$$

Оборудование использовалось в течение 12 дней, таким образом, затраты на оборудование:

$$C_{аморт(общ)} = 821,9 \cdot 12 = 9863 \text{ руб.}$$

### 3.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб},$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_{раб}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{дн} = (Z_m \cdot M) / F_d,$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

– при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 2.3.3).

Таблица 3.3.3 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней: выходные дни;	52	104
праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени: отпуск;	48	24
невыходы по болезни	7	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	244	223

Студент во время прохождения преддипломной практики получает стипендию, равную 5670 руб/месяц. Среднедневная стипендия (оплата) составляет:

$$З_{\text{дн}} = (5670 \cdot 11,2) / 223 = 284,7 \text{ руб/день.}$$

Основной заработок студента за время преддипломной практики составляет:

$$З_{\text{осн}} = 284,7 \cdot 45 = 12814 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

– оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.

– стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

– иные выплаты: районный коэффициент.

Руководителем данной научно-исследовательской работы является сотрудник с должностью старшего преподавателя. Оклад старшего преподавателя составляет 16752 рубля.

Надбавки к заработной плате составляют 10000 рублей (надбавки учёного совета), также районный коэффициент по Томску равен 1,3.

Основная заработная плата научного руководителя:

$$Z_{\text{осн}} = 16752 \cdot 1,3 + 10000 = 31777,6 \text{ руб / месяц.}$$

Среднедневная заработная плата научного руководителя:

$$Z_{\text{дн}} = (31777,6 \cdot 10,4) / 244 = 1354,45 \text{ руб / день.}$$

### 3.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}},$$

где  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы;

$Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.

Примем коэффициент дополнительной заработной платы равным 0,15 для научного руководителя и 0,1 для студента. Результаты расчёта основной и дополнительной заработной платы исполнителей научного исследования представлены в таблице 3.3.4.

Таблица 3.3.4 – Заработная плата исполнителей исследовательской работы

Заработная плата, руб.	Руководитель	Студент
Основная зарплата	31777,6	11457
Дополнительная зарплата	4766,64	1145,7
Зарплата исполнителя	36544,24	12602,7
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	49146,94	

### 3.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 27,1 % от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением исследовательской работы.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

$$C_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot (31777,6 + 4766,64) = 9903,48 \text{ руб.}$$

### 3.3.6 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

Накладные расходы в ТПУ составляют 25-35 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы. Примем  $k_{\text{накл}} = 30 \%$ .

Накладные расходы составляют:

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot (31777,6 + 4766,64) = 10963,3 \text{ руб.}$$

### 3.3.7 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 2.3.7.

Таблица 3.3.7 – Расчёт бюджета затрат исследовательского проекта

Наименование статьи	Сумма, руб
1. Материальные затраты исследования	2058,9
2. Затраты на специальное оборудование	9863
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	43234,6
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	49146,9
5. Отчисления во внебюджетные фонды	9903,5
6. Накладные расходы	10963,3
Бюджет затрат исследования	125169,7

### 3.4 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта представляет собой временное структурное образование, создаваемое для достижения поставленных целей и задач проекта и включающее в себя всех участников процесса выполнения работ на каждом этапе.

Данной исследовательской работе соответствует функциональная структура организации. То есть организация рабочего процесса выстроена иерархически: у каждого участника проекта есть непосредственный руководитель, сотрудники разделены по областям специализации, каждой группой руководит компетентный специалист (функциональный руководитель).

Организационная структура научного проекта представлена на рисунке 3.4.

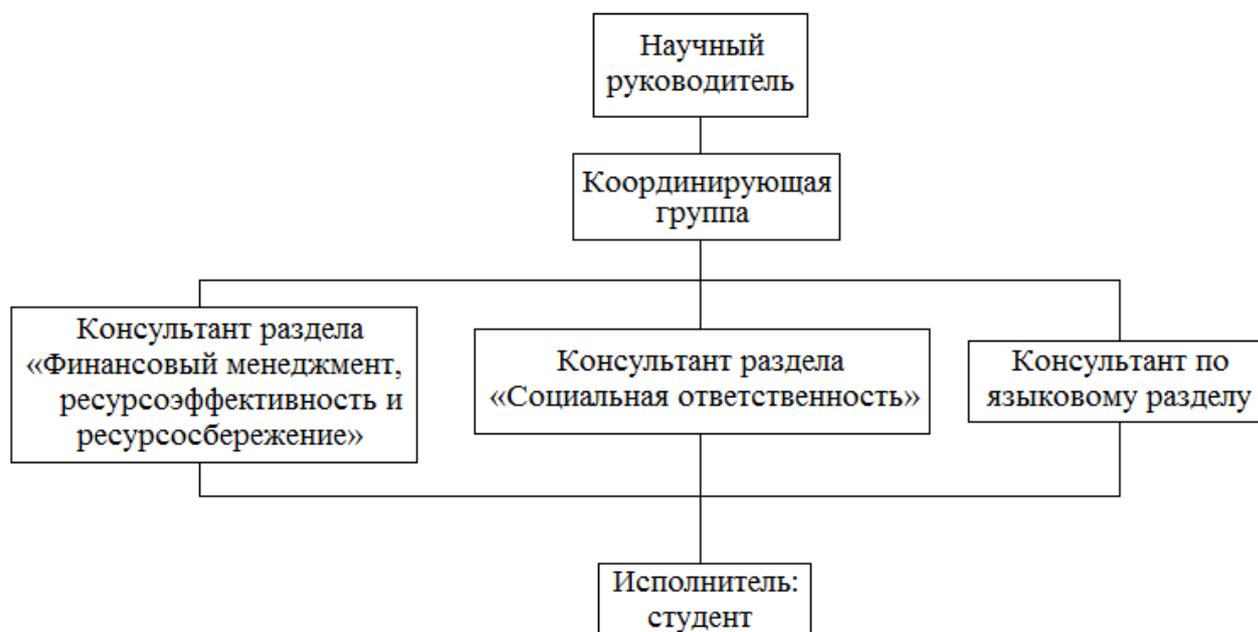


Рисунок 3.4 – Организационная структура научного проекта

### 3.5 Матрица ответственности

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 2.5.

Таблица 3.5 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соответственность»	Консультант по языковому разделу	Студент
Разработка технического задания	О				
Составление и утверждение технического задания	О				
Выбор направления исследований	О				И
Подбор и изучение материалов по теме	С				И
Календарное планирование работ	О				И

Продолжение таблицы 2.5 – Матрица ответственности

Изучение особенностей подготовки образцов	С				И
Освоение методики синтеза матриц	С				И
Проведение экспериментов	О				И
Выполнение расчётов и анализ полученных данных	О				И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			И
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	И
Обобщение и оценка результатов	С				И
Составление пояснительной записки	С				И
Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	С				И
Подготовка к защите	О				И

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

- ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход;
- исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта. Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение);
- согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

### **3.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования**

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования (см. табл. 2.6). Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}$$

где  $I_{финр}^{исп.i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Так как разработка имеет одно исполнение, то

$$I_{\text{фир}}^p = \frac{\Phi_p}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{125169,7}{125169,7} = 1;$$

Для аналогов соответственно:

$$I_{\text{финал}}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{145500,2}{125169,7} = 1,16; \quad I_{\text{финал}}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{161260,3}{125169,7} = 1,29$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i ,$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности представлен ниже.

Таблица 3.6 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1		Аналог 2	
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	3		3	
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)			0,2	5	3	3
3. Помехоустойчивость			0,05	5	3	2
4. Энергосбережение			0,2	5	2	2
5. Надёжность			0,15	5	4	3
6. Материалоёмкость			0,15	5	4	4
ИТОГО			1	5	3,1	2,9

$$I_{\text{тп}} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 = 5;$$

$$\text{Аналог 1} = 3 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 = 3,1;$$

$$\text{Аналог 2} = 3 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 = 2,9.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{\text{финр}}^p$ ) и аналога ( $I_{\text{финаi}}^{ai}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{финр}}^p}; \quad I_{\text{финаi}}^{ai} = \frac{I_m^{ai}}{I_{\text{финаi}}^{ai}};$$

В результате:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{финр}}^p} = \frac{5}{1} = 5; \quad I_{\text{фина1}}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_{\text{фина1}}^{a1}} = \frac{3,1}{1,05} = 2,95; \quad I_{\text{фина2}}^{a2} = \frac{I_m^{a2}}{I_{\text{фина2}}^{a2}} = \frac{2,9}{1,16} = 2,5.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финаi}^{ai}}.$$

Результат вычисления сравнительной эффективности проекта и сравнительная эффективность анализа представлены в таблице 2.6.1.

Таблица 3.6.1 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1,16	1,29	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,1	2,9	5
3	Интегральный показатель эффективности	2,95	2,5	5
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,69	2	1

Таким образом, основываясь на определении ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования, проведя необходимый сравнительный анализ, можно сделать вывод о превосходстве выполненной разработки над аналогами.

## Список публикаций студента

1. Долматов О.Ю., Закусилов В.В., Иноземцев С.В., Кузнецов М.С., Семенов А.О. Разработка матричного материала для иммобилизации радиоактивных отходов на основе модифицированного перовскита в режиме технологического горения // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 5 (часть 2) – С. 237-241.

2. Иноземцев С.В., Семенов А.О. Влияние давления прессования на получение модифицированного перовскита на основе алюминия, предназначенного для иммобилизации радиоактивных отходов в режиме технологического горения // *Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции*, Томск, 3-6 Июня 2015. Томск: ТПУ, 2015 - 193 с.