

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.04.02 «Ядерные физика и технологии»
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Моделирование процесса синтеза в воздушной плазме оксидных композиций для дисперсионного плутоний-ториевого ядерного топлива

УДК 621.039.543:661.8'02:66.011:533.9

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Загузин Илья Юрьевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	А.Г. Каренгин	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	И.В. Кашук	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Л.И. Дорофеева	к.ф.-м.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Профессиональные компетенции	
P1	Способность самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности, расширять и углублять свое научное мировоззрение.
P2	Готовность к созданию новых методов расчета современных физических установок и устройств, разработке методов регистрации ионизирующих излучений, методов оценки количественных характеристик ядерных материалов.
P3	Способность применять экспериментальные, теоретические и компьютерные методы исследований в профессиональной области.
P4	Способность самостоятельно выполнять экспериментальные или теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современной техники и методов расчета и исследования.
P5	Способность оценивать риск и определять меры безопасности для новых установок и технологий, составлять и анализировать сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать методы уменьшения риска их возникновения.
P6	Способность провести расчет, концептуальную и проектную проработку современных физических установок и приборов.
P7	Способность формулировать технические задания, использовать информационные технологии и пакеты прикладных программ при проектировании и расчете физических установок, использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов.
P8	Способностью к анализу технических и расчетно-теоретических разработок, к учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности и другим нормативным актам.
P9	Способность на практике применять знание основных понятий в Области интеллектуальной собственности, прав авторов, предприятия-работодателя, патента обладателя, основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
P10	Способность проводить поиск по источникам патентной информации, определять патентную чистоту разрабатываемых объектов, подготавливать первичные материалы к патентованию изобретений, официальной регистрации компьютерных программ и баз данных.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (специальность) – 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

_____ Л.И. Дорофеева
 «___» _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
0AM81	Загузин Илья Юрьевич

Тема работы:

Моделирование процесса синтеза в воздушной плазме оксидных композиций для дисперсионного плутоний-ториевого ядерного топлива	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 62-51/с от 02.03.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.2020
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объект исследования: процесс плазмохимического синтеза наноразмерных оксидных композиций для дисперсионного плутоний-ториевого ядерного топлива. Условия проведения расчетов: давление 0,1 МПа, интервал температур 300–4000 К, массовые доли воздушного теплоносителя 0,1–0,9. Используемое оборудование: лабораторный плазменный стенд «Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01», трубка Пито.
---------------------------------	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p>	<p>При разработке магистерской диссертации должны быть рассмотрены следующие вопросы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор основных методов получения наноразмерных порошков. 2. Расчет показателей горючести и составов водно-органических нитратных растворов. 3. Термодинамическое моделирование процесса получения оксидных композиций в воздушной плазме и определение режимов, обеспечивающих их получение. 4. Подготовка плазменного стенда для проведения экспериментальных исследований, получение наноразмерных порошков оксидных композиций. 5. Исследование основных физико-химических свойств полученных порошков.
--	---

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Расчетная часть</p>	<p>Доцент ОЯТЦ Каренгин А.Г.</p>
<p>Экспериментальная часть</p>	<p>Доцент ОЯТЦ Каренгин А.Г.</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Доцент ОСГН Кашук И.В.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Ассистент ОЯТЦ Гоголева Т.С.</p>

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>12.03.2020</p>
--	-------------------

Задание выдал руководитель:

<p>Должность</p>	<p>ФИО</p>	<p>Ученая степень, звание</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>Доцент ОЯТЦ</p>	<p>А.Г. Каренгин</p>	<p>к.ф.-м.н.</p>		

Задание принял к исполнению студент:

<p>Группа</p>	<p>ФИО</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>0AM81</p>	<p>И.Ю. Загузин</p>		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM81	Загузин Илья Юрьевич

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	14.04.02 «Ядерные физика и технологии»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	При проведении исследований используется материально-техническая база НИ ТПУ, в исследовании задействованы 2 человека: руководитель и исполнитель
2. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды составляют 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения НИ</i>	- Потенциальные потребители результатов исследования; - Анализ конкурентных технических решений; - Матрица SWOT-анализ.
2. <i>Формирование плана и графика разработки НИ</i>	Формирование плана и графика разработки: - Составление перечня этапов, работ; - Определение трудоемкости работ; - Разработка графика проведения НИ.
3. <i>Составление бюджета научных исследований</i>	Формирование бюджета затрат на научное исследование: - Материальные затраты; - Затраты на спецоборудование; - Заработная плата (основная и дополнительная); - Страховые отчисления; - Накладные расходы.
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности НИ</i>	Определение показателей: финансовой эффективности, ресурсоэффективности, и интегральной эффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИ
4. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	И.В. Кащук	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Загузин Илья Юрьевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM81	Загузин Илья Юрьевич

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 «Ядерные физика и технологии»

Тема ВКР:

Моделирование процесса синтеза в воздушной плазме оксидных композиций для дисперсионного плутоний-ториевого топлива	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования – водно-органические нитратные растворы (ВОНР) на основе воды, нитратов солей самария, церия, магния и органического компонента (ацетона). Проведено термодинамическое моделирование в программном обеспечении TERRA процесса плазменной переработки ВОНР, обеспечивающего прямой синтез топливных композиций для плутоний-ториевого топлива.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018). – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: – вредные вещества; – отклонение показателей микроклимата; – превышение уровня шума; – повышенный уровень электромагнитного излучения; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – психофизиологические; – поражение электрическим током.
3. Экологическая безопасность:	анализ влияния объекта и процесса исследования на окружающую среду;
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС при эксплуатации проектируемого решения: – возгорание; – воздействие вредных веществ. Наиболее типичная ЧС: возгорание.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Татьяна Сергеевна	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Загузин Илья Юрьевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа: 120 страниц, 27 рисунков, 20 таблиц, 65 источников, 8 приложений.

Ключевые слова: плазма, плазмотрон, водно-органические нитратные растворы, плазмохимический синтез, оксидные композиции, дисперсионное ядерное топливо.

Объектом исследования является процесс плазмохимического синтеза наноразмерных оксидных композиций для дисперсионного плутоний-ториевого ядерного топлива.

Цель работы – исследование процесса плазмохимического синтеза наноразмерных оксидных композиций для дисперсионного плутоний-ториевого ядерного топлива из ВОНР.

В процессе исследований проводились: расчет показателей горючести водно-органических нитратных растворов (ВОНР), содержащих растворы делящихся металлов (плутоний, торий) и металл матрицы (магний), а также органический компонент (ацетон); термодинамическое моделирование процесса плазмохимической переработки растворов ВОНР и установление закономерностей влияния массовой доли плазменного теплоносителя на состав образующихся продуктов в газовой и конденсированных фазах.

В результате исследования: определены оптимальные по составу растворы ВОНР, обеспечивающих их энергоэффективную плазменную переработку.

Область применения: результаты исследований могут быть применены для создания энергоэффективного и экологически безопасного плазмохимического синтеза наноразмерных оксидных композиций для дисперсионного плутоний-ториевого топлива.

Определения

В магистерской диссертации применены следующие термины с соответствующими определениями:

плазма: ионизированный газ, состоящий из свободных электронов, положительно и отрицательно заряженных ионов, нейтральных и возбужденных атомов или молекул.

плазмотрон: устройство, предназначенное для генерирования плазмы.

дисперсионное ядерное топливо: вид ядерного топлива, в котором частицы делящегося материала равномерно распределены по объему неделящегося материала (матрица).

золь: стабильная взвесь коллоидных частиц, равномерно распределенных в жидкости.

низшая теплота сгорания: количество выделившейся теплоты при полном сгорании массовой (для твердых и жидких веществ) или объёмной (для газообразных) единицы вещества.

Обозначения и сокращения

ДЯТ – дисперсионное ядерное топливо.

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент.

ТВС – тепловыделяющая сборка.

ВОНР – водно-органический нитратный раствор.

ОК – оксидная композиция.

ВЧФП – высокочастотный факельный плазмотрон.

ОЯТ – отработавшее ядерное топливо.

ГЦК решетка – гранецентрированная кристаллическая решетка.

ОЦК решетка – объемно-центрированная кристаллическая решетка.

LWR – Light-water reactor (легководный реактор).

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор.

МОХ-топливо – Mixed-Oxide fuel (смешанное оксидное топливо).

IMF – Inert Matrix Fuel (топливо с инертной матрицей).

ПО – программное обеспечение.

Оглавление

Реферат	8
Определения	9
Обозначения и сокращения.....	10
Введение.....	14
1 Обзор литературы	16
1.1 Свойства тория и его соединений	16
1.1.1 Диоксид тория	18
1.1.2 Нитраты тория.....	19
1.2 Свойства плутония и его соединений	20
1.2.1 Диоксид плутония	21
1.3 Топливо для «сжигания» плутония.....	22
1.4 Основные требования к материалам матрицы дисперсионного ядерного топлива	23
1.4.1 Материал инертной матрицы на основе оксида магния	24
1.5 Реактор ВВЭР с топливом PuO_2-ThO_2	25
1.6 Методы получения нанопорошков: достоинства и недостатки	26
1.6.1 Золь-гель метод	26
1.6.2 Плазменный метод.....	29
2 Расчетная часть.....	33
2.1 Расчет показателей горючести водно-органических нитратных растворов .	33
2.2 Термодинамическое моделирование процесса плазмохимической переработки водно-органических нитратных растворов на основе ацетона	33
3 Экспериментальная часть.....	40
3.1 Лабораторный стенд для проведения исследований.....	40
3.2 Определение расхода плазмообразующего газа через разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона	41
3.3 Расчет расхода газа через реактор.....	44
3.4 Расчет основных технологических параметров установки	45
3.5 Плазмохимическая переработка модельных растворов.....	46

3.6 Анализ полученных результатов	47
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	54
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	54
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	54
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	55
4.1.3 SWOT-анализ.....	56
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	57
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	57
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	58
4.2.3. Разработка графика проведения научного исследования	59
4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	60
4.3.1 Расчет материальных затрат НТИ	61
4.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	61
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы.....	62
4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	64
4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	64
4.3.6 Накладные расходы.....	65
4.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	66
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной эффективности исследования	66
5 Социальная ответственность	69
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	69
5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства	69
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	71
5.2 Производственная безопасность.....	72

5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.....	72
5.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	73
5.2.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	77
5.3 Экологическая безопасность.....	80
5.3.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду	80
5.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду	81
5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	82
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	83
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований	84
5.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	85
5.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	85
Выводы	87
Заключение	88
Список публикаций студента.....	89
Список использованных источников	91
Приложение А	97
Приложение Б.....	109
Приложение В.....	110
Приложение Г	111
Приложение Д.....	112
Приложение Е.....	115
Приложение Ж.....	117
Приложение И	118

Введение

В качестве ядерного топлива в активных зонах некоторых видов реакторов используется топливо дисперсионного типа. В таком топливе делящиеся материалы (U^{233} , U^{235} , Pu^{239}) в виде гранулированных оксидных композиций (микросфер) размещаются в матрице из неделящихся материалов (металл, сплав, керамика, графит). В качестве матрицы также могут быть использованы U^{238} и Th^{232} , их сплавы и соединения. Главное преимущество дисперсионного ядерного топлива по сравнению с однородным ядерным топливом – это повышенная радиационная стойкость при длительной эксплуатации твэлов. Высокая радиационная стойкость дисперсионного топлива обеспечивается его структурой, в которой продукты деления локализуются в топливных частицах или около них. Каждая частица ядерного топлива, диспергированная в топливной композиции, представляет собой микротвэл, в котором роль оболочки, сдерживающей объемные изменения сердечника, выполняет матрица. Разобщенность продуктов деления и непрерывность матрицы предотвращают повреждение сердечника твэла [1].

Дисперсионное ядерное топливо при длительном использовании в реакторах отличается высокой радиационной стойкостью. В связи с этим дисперсионное топливо нашло широкое применение в исследовательских и материаловедческих реакторах, а также в ядерных установках специального назначения, для которых характерны повышенные плотности делений, мощности энерговыделения и температуры. В последнее время возник еще один стимул для разработки и применения топлива дисперсионного типа. Это связано с необходимостью снижения накопленных запасов оружейного и энергетического плутония.

Целью данной работы является исследование процесса плазмохимического синтеза наноразмерных оксидных композиций для дисперсионного плутоний-ториевого ядерного топлива из ВОНР.

Поставленная цель требовала решения следующих задач:

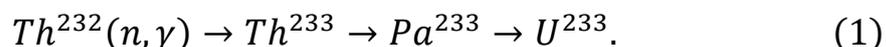
- провести обзор основных методов получения нанопорошков;
- провести расчет показателей горючести и составов ВОНР, содержащих растворы делящихся металлов (плутоний, торий) и металл матрицы (магний), а также органический компонент (ацетон);
- провести термодинамическое моделирование процесса получения оксидных композиций в воздушной плазме и определить режимы, обеспечивающие их получение;
- подготовить плазменный стенд для проведения экспериментальных исследований, получить опытные партии образцов порошков;
- исследовать основные физико-химические свойства полученных порошков.

1 Обзор литературы

1.1 Свойства тория и его соединений

В составе природного тория присутствуют два изотопа. Материнский изотоп Th^{232} – долгоживущий α -источник, период полураспада которого равен $1,39 \cdot 10^{10}$ лет. Дочерний изотоп Th^{228} (α -источник), который находится в равновесии с изотопом Th^{232} , период полураспада составляет 1,91 года. По значениям периодов полураспада данных изотопов, можно сделать вывод, что количество Th^{228} незначительно.

Торий отличается от урана тем, что он является воспроизводящим материалом в технологии уран-ториевого цикла, а не делящимся.



Находясь в ядерном реакторе, Th^{232} поглощает тепловые нейтроны, превращаясь в изотоп Th^{233} , который в свою очередь претерпевает β -распад и превращается в протактиний Pa^{233} . В дальнейшем протактиний также претерпевает β -распад и превращается в U^{233} . U^{233} является искусственным делящимся изотопом, получаемым в уран-ториевом цикле, аналогично изотопу Pu^{239} в уран-плутониевом цикле.

Чистый торий представляет собой серебристый металл, обладающий блеском и ковкостью. Повышенная реакционная способность является отличительной особенностью тория. Взаимодействуя с другими металлами, ему легко удастся образовывать сплавы. Торий создает простые эвтектические системы с ураном и хромом.

Торий обладает умеренными значениями сечений рассеяния и поглощения тепловых нейтронов, 7,56 б и 12,6 соответственно [2]. По своим свойствам торий напоминает плутоний и уран. При 100 °С его теплопроводность составляет 37,6 Вт/(м·°С), а при 200 °С – 38,9 Вт/(м·°С). Значение коэффициента линейного расширения составляет 11 – 12·10⁻⁶ град⁻¹. Значение теплопроводности тория выше, а коэффициент линейного расширения ниже, чем у плутония и урана. Благодаря этому в ториевом топливе

работающего реактора возникают меньшие механические и термические напряжения. Торий имеет ГЦК решетку (параметр решетки – 0,5986 нм, плотность – 11,72 г/см³) при комнатной температуре и ОЦК решетку (параметр решетки – 0,414 нм, плотность – 11,1 г/см³) в случае, когда температура выше 1400±25 °С. Теплоемкость тория при 25 °С составляет 27,47 кДж/(моль·К).

На воздухе серебристая поверхность тория имеет свойство тускнеть, формируется тонкая защитная пленка. При 250 °С торию свойственна заметная скорость окисления, с возрастанием температуры скорость увеличивается. Интерметаллические соединения тория, а также металлический тонкоизмельченный торий обладают свойством пирофорности, то есть способны самовозгораться на воздухе, в результате чего образуется диоксид тория.

Гидриды тория (ThH₂ и Th₄H₁₅ (или ThH_{3,75})) образуются в результате взаимодействия тория с водородом при высоких температурах [2]. ThH₂ формируется при 600-650 °С, когда на компактный металлический торий действует водород под давлением, при это возрастает объем. После уменьшения температуры до значений 250-320 °С происходит водородное насыщение и образуется мелкий порошок Th₄H₁₅. В случае нагревания до более высоких температур, выше 700 °С, ThH₂ диссоциирует. При 700-800 °С в вакууме происходит полное удаление водорода.

Образование нитридов тория Th₂N₃ (желтый) и ThN (коричневый) происходит в результате взаимодействия металлического тория с аммиаком. Также нитриды тория могут образовываться при нагревании тория в азотной атмосфере до значений температур, превышающих 800 °С [2]. В инертной атмосфере до значения температуры 1730 °С Th₂N₃ является устойчивым полуторным нитридом. При температурах 2630±30 °С происходит плавление моонитрида тория ThN. Аммиак образуется путем разложения нитридов тория водой.

Торий взаимодействуя с галогенами способствует образованию солей типа ThX₄. При комнатной температуре взаимодействует с фтором, а при

нагревании – с другими галогенами, например (Cl, Br). Точки плавления и кипения, а также прочность галогенидов тория убывают от фторида к йодиду. Все галогениды растворимы в воде и гигроскопичны (способны к поглощению водяных паров) кроме ThF₄.

При комнатной температуре торий медленно корродирует в воде. Значительная коррозия тория возникает в водяном паре при температуре 170 °С, которая сопровождается частичным разрушением. Температурный рост до 350 °С сопровождается быстрой коррозией, в результате которой образуются диоксид тория ThO₂, а также выделяется водород.

При комнатной температуре в серной, азотной и плавиковой кислотах коррозия тория протекает медленно. Азотная кислота способствует пассивации поверхности тория, плавиковая кислота вносит вклад в формирование на поверхности защитной пленки фторида тория. Небольшое добавление ионов фтора в азотную кислоту вызывает быстрое растворение, лучшим растворителем является соляная кислота. Вопреки интенсивно протекающей реакции растворения тория, наиболее вероятным является тот факт, что часть тория будет оставаться в виде твердого остатка в форме гидратированного оксида тория [2].

1.1.1 Диоксид тория

Среди оксидных соединений, которые образует торий можно выделить монооксид ThO и диоксид ThO₂. Наибольшее распространение имеет диоксид тория ThO₂, он является природным материалом, который обладает кубической модификацией кристаллической структуры. Диоксиду тория несвойственно легкое термическое разложение, температура плавления примерно равна 3000 °С. В нормальных условиях плотность диоксида имеет значение равное 11,39 г/см³. Теплоемкость диоксида тория при 25 °С составляет 61,74 кДж/(моль·К). Средний коэффициент линейного теплового расширения $9,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (20–1000 °С).

У диоксида тория в зависимости от способа получения может быть как кристаллическая, так и аморфная форма. При 350 °С в вакууме в результате прокаливании гидроксида тория образуется диоксид аморфной формы. Диоксид тория кристаллической формы, плотность которого примерно равна 9,7 г/см³, можно получить разложением гидроксида при температуре 1050 °С, а также разложением оксалата или нитрата при температуре 750 °С.

Химическая активность диоксида тория определяется режимом термической обработки. Диоксид, подвергнутый слабой прокалке при температуре не превышающей 600 °С, может с достаточной легкостью растворяться в кислотах. Однако, если прокалка диоксида проводилась при более высоких температурах, то растворить его становится сложнее. При 25 °С растворимость в серной кислоте равна 2 мг/л в однонормальном растворе H₂SO₄, в азотной кислоте – 0,6 мг/л в однонормальном растворе HNO₃, в соляной кислоте – 0,5 мг/л в однонормальном растворе HCl [2]. Даже при высокой температуре традиционная обработка концентрированной H₂SO₄ может оказаться безуспешной. Водный раствор HNO₃, содержащий 0,01-0,05 моль/л плавиковой кислоты HF, часто применяется для растворения ThO₂.

1.1.2 Нитраты тория

Нитрат тория является самой известной его солью. Она образует кристаллогидраты, которые содержат до 12 молекул воды. От способа высушивания нитрата и условий его выделения зависит число молекул воды. Состав равновесной твердой фазы нитрата имеет вид Th(NO₃)₄·5H₂O, который соответствует интервалу концентраций HNO₃ 1-54% [2]. Пентагидрат представляет собой большие прозрачные кристаллы, образовавшиеся путем кристаллизации из азотнокислого раствора. Также есть возможность образования похожих кристаллов, но непрозрачных. Это происходит в случае, когда концентрация HNO₃ в растворе, из которого проводится кристаллизация, менее 1 % (например, вода).

Высказываются предположения [2] о существовании кристаллогидрата $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5,5\text{H}_2\text{O}$. Нагревание кристаллогидрата до температур 125-150 °С приводит к образованию основной соли с химическим составом $\text{ThO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Чистый диоксид тория получается при дальнейшем нагревании до температуры 360 °С.

Нитрат тория $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$ хорошо растворяется в органических растворителях: простые и сложные эфиры, кетон, спирты. Существует возможность проведения тонкой очистки солей тория от редкоземельных элементов из водных растворов методом экстракции, так как редкие земли концентрируются в водной фазе.

Нитрат тория представляет собой бесцветные кристаллы, способные растворяться в воде с образованием кристаллогидрата. Молярная масса нитрата составляет 480,05 г/моль, плотность 2,80 г/см³. Согласно [3] нитрат тория имеет следующие значения растворимости в воде (таблица 1).

Таблица 1 – Растворимость $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$ в воде

t, °С	Растворимость, г/100 г
-1,5	9,9
-4,0	25,0
-6,0	49,2
-9,0	69,5
-15,0	91,2
-25	125,7
-43,5	177,8
-22	179,3
0	185,7
10	187,3
20	190,7

1.2 Свойства плутония и его соединений

Плутоний представляется собой металл с ярким серебристо-белым цветом. Температура плавления равна 639,5 °С, температура кипения – 3235 °С. Нахождение в определенной модификации влияет на многие свойства металла.

Значения плотности плутония изменяются в диапазоне от 19,8 до 16 г/см³.

Аллотропные модификации плутония представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Аллотропные модификации металлического плутония [4]

Модификация	Плотность, г/см ³	Температура фазового перехода, °С	Разновидность кристаллической решетки
α	19,8	122	Примитивная моноклинная
β	17,7	207	объемноцентрированная моноклинная
γ	17,1	315	гранецентрированная орторомбическая
δ	15,9	457	ГЦК
δ'	16,0	470	объемноцентрированная тетрагональная
ε	16,5	639,5	ОЦК

Согласно [2] изотоп Pu^{239} имеет следующие ядерно-физические параметры для тепловой области энергии нейтронов $E=0,0252$ эВ: микросечение деления (σ_f) – 742 ± 3 б, микросечение захвата (σ_c) – 271 ± 3 б, микросечение поглощения ($\sigma_a = \sigma_f + \sigma_c$) – 1013 ± 4 б, среднее число нейтронов на одно деление (ν) – $2,88\pm 0,009$, среднее число нейтронов на одно поглощение ($\nu_{\text{эф}}$) – $2,109\pm 0,007$. Для изотопа Pu^{241} : $\sigma_f=1007\pm 7$ б, $\sigma_c=368\pm 8$ б, $\sigma_a=1375\pm 9$ б, $\nu=2,936\pm 0,012$, $\nu_{\text{эф}}=2,149\pm 0,014$.

1.2.1 Диоксид плутония

Плутоний образует следующие оксиды: PuO , Pu_2O_3 и PuO_2 . Однако, диоксид плутония PuO_2 является наиболее важным оксидом плутония. Диоксид плутония используется в смешанном оксидном (МОХ) топливе для ядерных реакторов. Способ получения PuO_2 оказывает влияние на цвет диоксида, который может быть коричневым или желто-зеленым. Температура плавления диоксида 2400 °С, плотность равна $11,46$ г/см³, тип кристаллической решетки – ГЦК [4].

При температурах выше 1500 °С в высоком вакууме (давление составляет 10^{-6} мм рт.ст.) диоксид плутония разлагается до полуплутонического оксида Pu_2O_3 .

Диоксид плутония, подобно диоксидам тория и урана, не восстанавливается до металла водородом. В горячих кислотах диоксид растворяется с трудом. Диоксид плутония, подверженный прокаливанию при температуре превышающей 500 °С, становится химически более инертным и практически не растворяется в кислотах. При температуре 200 °С 85–100 % ортофосфорная кислота является одним из лучших растворителей.

1.3 Топливо для «сжигания» плутония

Для военных целей в СССР и США было произведено более 250 тонн оружейного плутония, содержащего примерно 93 % Pu^{239} . Часть этого плутония в последнее время была признана избыточной: США и Россия договорились его утилизировать [6]. Кроме того, из ядерных реакторов ежегодно выгружают до 10 тыс. тонн отработанного ядерного топлива. К 2020 году его накопится до 450 тыс. тонн [7]. Из наиболее распространенного водо-водяного реактора LWR мощностью 1 ГВт эл. ежегодно выгружается около 23 тонн актинидов, а за срок службы реактора (~ 40 лет) их накапливается примерно 900 тонн [8]. В отработанном ядерном топливе остается 97% тяжелых металлов (U, Pu), пригодных для повторного использования [5]. Одна тонна облученного ядерного топлива со средним выгоранием 40 ГВт·сут./т содержит около четверти первоначального количества U^{235} , 10 кг плутония и 1,5 кг других трансураниевых элементов, в основном нептуния, америция и кюрия, и значительное количество долгоживущих нуклидов.

Проблема избытка плутония и накопления высокоактивных отходов ядерных реакторов связана также с потенциальными опасностями распространения ядерного оружия и экологической безопасностью.

Предполагалось, что программа развития реакторов на быстрых нейтронах позволит решить проблему лишнего плутония, но в настоящее время

эта программа не выполнена. Многие реакторы на быстрых нейтронах (БН) остановлены, в нашей стране работает только один реактор БН-600.

Другой путь снижения запасов плутония заключается в использовании регенерированного Pu в реакторах LWR в виде смеси оксидов урана и плутония (MOX-топливо). Однако даже при массовом переходе на такое топливо задача сокращения запасов плутония не решается, так как переработка Pu²³⁹ в LWR, в том числе и с частичной загрузкой активной зоны реакторов MOX-топливом, сопровождается накоплением плутония [8, 9].

В связи с этим в ряде стран проводятся исследования по разработке топлива ядерных реакторов на основе плутония в виде дисперсионной композиции с безурановой (инертной) матрицей (Inert Matrix Fuel – IMF) [10]. Значительный интерес к разработке топлива IMF, наряду с уменьшением запасов плутония, вызван и возможностью получения отработанного ядерного топлива, предназначенного для захоронения с незначительным содержанием актинидов и достижением более глубокого выгорания.

Основной интерес при разработке топлива IMF касается дисперсионных композиций керамика-металл (cer-met), керамических твердых растворов (Me, Pu)O₂, композиций керамика-керамика (cer-cer) и композиций металл-металл (met-met).

1.4 Основные требования к материалам матрицы дисперсионного ядерного топлива

Одним из компонентов дисперсионной топливной композиции является неделящийся материал (матрица), который обеспечивает высокую радиационную стойкость такого типа ядерного топлива.

В первую очередь материал матрицы должен иметь наименьшее значение поперечного сечения поглощения тепловых нейтронов [1, 5, 11–13]. Также материал матрицы должен удовлетворять следующим требованиям:

- иметь высокую температуру плавления;

- его теплопроводность должна быть хорошей;
- быть совместимым с топливной композицией и материалом оболочки;
- не подвергаться фазовым превращениям в диапазоне рабочих температур;
- обладать высокими механическими свойствами;
- быть устойчивым в условиях реакторного облучения.

Кроме того, материал матрицы должен сохранять свои свойства в условиях длительного захоронения при открытом топливном цикле и хорошо растворяться в азотной кислоте при замкнутом топливном цикле. При разработке топлива, предназначенного для «сжигания» плутония, чаще всего в качестве материалов матрицы, используются керамические материалы в основном оксидного типа.

1.4.1 Материал инертной матрицы на основе оксида магния

Согласно [14] поперечное сечение поглощения тепловых нейтронов у магния равно $7,0 \cdot 10^{-26}$ см⁻². Это значит, что данный материал не будет поглощать нейтроны в той степени, чтобы помешать требуемой эксплуатации дисперсионного ядерного топлива с матрицей в виде оксида магния.

В таблице 3 приведены физико-механические свойства оксида магния. Данные о поведении материала матрицы в контакте с оболочкой, водой и азотной кислотой показаны в таблице 4.

Температура плавления оксида магния составляет 2827 °С, что является хорошим показателем, так как данный параметр очень близок к температуре плавления диоксида урана [15].

Таблица 3 – Основные физико-механические свойства MgO [14]

Свойства:	
Температура плавления, °С	2827
Давление пара, мм рт. ст	$\sim 10^{-4}$ (1727 °С)
Теплопроводность, Вт/(м·К)	20,0 (500 °С); 5,0 (2000 °С)
Модуль нормальной упругости E, ГПа	295,20-219,68 (298-1573 К)

Продолжение таблицы 3

Модуль сдвига G, ГПа	113,76-35,31 (573-1673 К)
Коэффициент Пуассона	0,36-0,47 (298-1373 К)

Таблица 4 – Совместимость оксида магния [16]

Контактное вещество	Характер взаимодействия
Железо (оболочка твэла)	Совместим при температуре ниже 1100 °С
Вода	Образование гидроксида
HNO ₃	Растворение с невысокой скоростью

Производство оксида магния можно разделить на два способа: «сухой» и «мокрый». К первому относится производства из магнезита, а ко второму производство оксида магния из хлорида магния (бишофита), которые реализованы в промышленном масштабе в Российской Федерации. Сырьевые материалы для «сухого» способа производства магнезии добывают в открытых карьерах или в подземных шахтах. После добычи куски магнезита измельчают и производят первичную обработку, для этого используют оборудование для дробления и фракционирования. Для подготовки магнезита используют тяжелый шлам. Так как в сырье могут быть различные примеси, его промывают. Также, чтобы избавиться от соединений железа, применяют магнитную сепарацию.

1.5 Реактор ВВЭР с топливом PuO₂-ThO₂

В работе [17] в качестве примера рассмотрен реактор ВВЭР-1000 с топливом (Th, Pu)O₂ на основе оружейного плутония. Принималось, что плутоний-ториевые ТВС используются в 1/3 активной зоны. Все основные характеристики обычного ВВЭР сохранялись, за исключением того, что направляющие трубы пэлов системы управления и защиты и дистанционирующие решетки ТВС принимались циркониевыми, а не

стальными. ВВЭР-1000 с такой загрузкой активной зоны ежегодно расходует 355 кг оружейного плутония, в то время как реактор с загрузкой 1/3 зоны смешанным уран-плутониевым топливом – всего 270 кг. После выгрузки топлива выгоранием 40 МВт·сут/кг в ТВС с плутонием остается 1/3 его первоначального количества. В составе плутония в выгружаемых ТВС (Th, Pu)O₂ будет менее 30 % ²³⁹Pu. Таким образом, уже после одного цикла работы в таком реакторе весь загруженный плутоний утрачивает оружейное качество.

Вариант реактора с полной загрузкой (Pu, Th)O₂ потребляет ежегодно 1220 кг оружейного плутония, реактор с частичной загрузкой – 354 кг такого плутония. Ежегодные балансы между выгружаемым и загружаемым Pu составляют –758 и –88 кг, соответственно. С этой точки зрения реактор с полной загрузкой (Pu, Th)O₂-топлива является эффективным выжигателем Pu.

Реактор с частичной загрузкой топливом (Pu, Th)O₂ уменьшает запасы плутония, в то время как реактор с частичной загрузкой (Pu, U)O₂ перерабатывает оружейный Pu в энергетический, не уменьшая их по количеству. Выгруженный Pu из реакторов с Th содержит существенно меньшее количество ²³⁹Pu, по сравнению с отработавшим топливом штатного реактора и реакторов с (Pu, U)O₂-топливом [17].

Оценки характеристик безопасности реактора показывают небольшую разницу, по сравнению с обычным смешанным уран-плутониевым топливом, при той же схеме загрузки. Для компенсации эффектов реактивности годится та же система стержней, которая имеется в исходном реакторе с урановым топливом.

1.6 Методы получения нанопорошков: достоинства и недостатки

1.6.1 Золь-гель метод

Золь-гель процесс представляет собой технологию получения дисперсных частиц с преобразованием коллоидной системы на одной из стадий процесса. Этот метод используется для изготовления оксидов металлов, особенно

оксидов кремния (Si) и титана (Ti). Процесс включает в себя превращение мономеров в коллоидный раствор – золь (стабильная взвесь коллоидных частиц, равномерно распределенных в жидкости). Также золь выполняет роль предшественника для геля. Гель представляет пористую трехмерную непрерывную жидкую фазу, которая окружает и поддерживает непрерывную фазу жидкости. Часто образуется ковалентными связями между золями частиц [18]. Образование геля из коллоидного раствора представлено на рисунке 1.

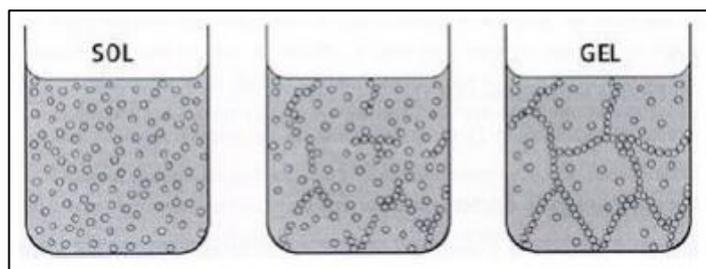


Рисунок 1 – Процесс образования геля из коллоидного раствора

«Золь» (коллоидный раствор), постепенно переходит в гелеобразную двухфазную систему, в которой присутствует жидкая и твердая фазы. Морфология двухфазной системы меняется от дискретных частиц до сплошных полимерных сетей. Объемная доля частиц, в случае коллоида, может принимать настолько низкое значение, что для улучшения гелеобразных свойств приходится удалять значительное количество жидкости. Подобный эффект может быть достигнут разными способами. Самый простой метод состоит в том, чтобы дать частицам дисперсной фазы, находящимся под влиянием центробежных сил или гравитационного поля, осесть в жидкости или газе, а затем слить оставшуюся жидкость. Для ускорения процесса разделения фаз также можно использовать центрифугирование.

Для удаления оставшейся жидкой фазы требуется процесс сушки, который обычно способствует значительной усадке и уплотнению частиц. Скорость удаления растворителя определяет пористость геля.

Для улучшения структурной стабильности и поддержке дальнейшего процесса поликонденсации необходима термическая обработка (или процесс

обжига). За счет этого происходит окончательное спекания, уплотнение и рост зерна.

Одним из преимуществ использования этой технологии по сравнению с более традиционными методами получения наночастиц является то, что уплотнение достигается при гораздо более низкой температуре, чем в других методах [19].

По технологии золь может быть либо нанесен на подложку для формирования пленки, помещен в подходящий контейнер требуемой формы (например, для получения монолитной керамики, стекол, волокон, мембран, мембран, аэрогелей) и использоваться для синтеза порошков (например, микросфер, наносфер).

Возможности дальнейшего развития золь-гель процесса представлены на рисунке 2.

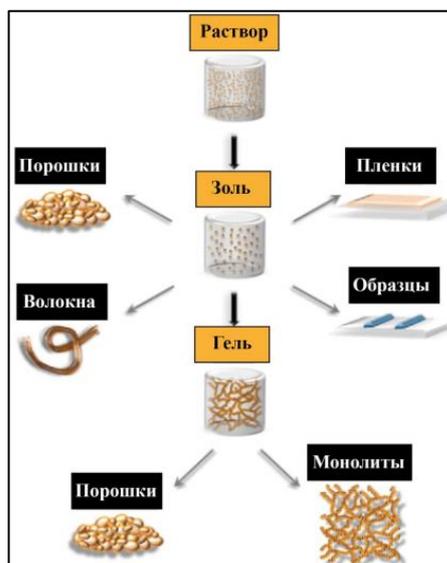


Рисунок 2 – Возможности дальнейшего развития золь-гель процесса

Золь-гель процесс является дешевым и низкотемпературным методом, который позволяет точно контролировать химический состав продукта. Даже небольшие количества легирующих примесей, таких как органические красители и редкоземельные элементы, могут быть введены в золь и в результате равномерно диспергированы в конечном продукте. Он может быть использован при обработке и производстве керамики в качестве материала для

литься по выплавляемым моделям или в качестве средства для производства очень тонких пленок оксидов металлов различного назначения. Материалы, полученные из золь-геля, имеют широкий спектр применения в оптике, электронике, энергетике, космосе, биосенсорах, медицине (например, контролируемое высвобождение лекарственного средства), хроматографии.

Интерес к данному методу можно проследить еще в середине 1800-х годов, когда было обнаружено, что гидролиз тетраэтилортосиликата в кислых условиях приводит к образованию SiO_2 в виде волокон и монолитов.

Схема получения нанопорошков с помощью золь-гель метода, начиная от получения исходных растворов и заканчивая спеканием заготовки, описана на рисунке 3 [20].



Рисунок 3 – Этапы получения нанопорошков золь-гель методом

1.6.2 Плазменный метод

Плазменные процессы могут протекать при атмосферном давлении и использовать электроэнергию, получаемую от источников постоянного, переменного тока или радиочастотного излучения. На рисунке 4 показаны два

различных типа устройств, применяемых для синтеза порошка с использованием электроэнергии переменного или постоянного тока [21].

В обоих случаях плазма горит между двумя коаксиальными электродами. Выдувается из системы мощным газовым потоком. Этот газовый поток выполняет две основные задачи: он является источником газа для плазмы (плазмообразующий газ) и предотвращает перегрев электродов. В случае мощных систем может потребоваться дополнительная система водяного охлаждения.

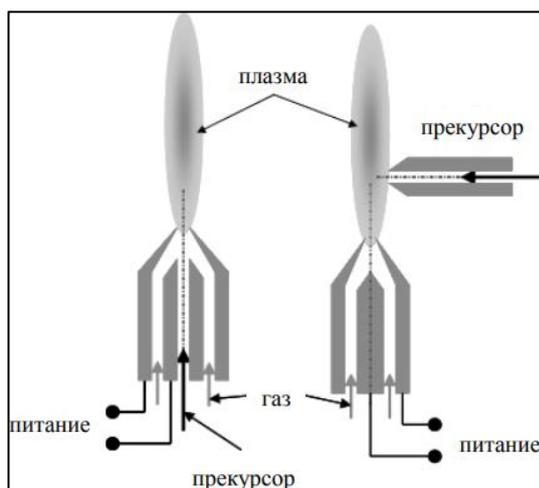


Рисунок 4 – Два типа подачи прекурсора в плазму

Два устройства для синтеза плазмы изображены на рисунке 4, в зависимости от подачи прекурсора. В таких системах могут использоваться твердые прекурсоры (в виде порошка) или жидкие (в виде раствора). В случае осевой подачи прекурсора, он засасывается в систему коаксиальным газовым потоком. Подача прекурсора со стороны, непосредственно в плазменное пламя, в большинстве случаев, применяется только при получении дисперсных порошков. Температура в плазме крайне высокая (выше 4000 К). При этой температуре все металлы и большинство оксидов испаряются или, по крайней мере, расплавляются. Следовательно, поскольку прекурсор в значительной степени испаряется, практически не возникает проблем с размером частиц или капель. В плазме частицы движутся хаотично и в направлении потока газа. Поэтому, как и в любом другом аэрозольном процессе, существует высокая

вероятность столкновения частиц и образования кластеров или агломератов. Вероятность образования агломератов значительно снижается при быстром охлаждении газа сразу после выхода из зоны реакции. Проектировка этой зоны охлаждения имеет решающее значение для качества продукции. Охлаждающий газ вводится в систему радиально или аксиально противоположно направлению движения потока. Резкое охлаждение улучшает качество продукта.

После синтеза следует этап гашения или закалки. Кроме того, крайне важно рециркулировать технологический газ. Примером, где это необходимо, является синтез нитридов, где для азотирования используются смеси чистого азота или азот-аммиак, а в случае синтеза карбида металла в большинстве случаев в качестве газа-носителя используется аргон. Зачастую является недостатком то, что плазмотроны переменного или постоянного тока склонны к предрасположенности производства только сильно агломерированных порошков.

Низкотемпературные плазменные процессы всегда связаны с системами с пониженным давлением. В данном контексте низкотемпературные системы определяются как системы, в которых используются температуры ниже 1000 К. В этих системах питание подается либо от радиочастотных, либо от высокочастотных источников питания. Физика использования радиочастот или микроволн в некоторой степени отличается. Чтобы понять влияние частоты, необходимо изучить передачу энергии заряженным частицам в колебательном электрическом поле. Поскольку масса электронов в несколько тысяч раз меньше массы ионов, электронам передается в несколько тысяч раз больше энергии по сравнению с энергией, передаваемой ионам. Кроме того, радиочастотная система работает с частотами вплоть до мегагерцового диапазона; микроволновые системы находятся в диапазоне гигагерц. Следовательно, в микроволновой системе энергия, передаваемая заряженным частицам, на шесть порядков меньше, чем в радиочастотной системе. Это благоприятствует низкотемпературным системам. В обоих случаях плазма не находится в тепловом равновесии; «температура» электронов значительно

выше, чем у ионов или нейтральных частиц. Таким образом, «температура реакции» представляет собой среднее значение, определенное на выходе из плазменной зоны [22].

Ситуация в плазме иная: в ней присутствуют свободные электроны, ионы, диссоциированный газ и молекулы-предшественники в дополнение к нейтральным видам газа. Поэтому столкновения между заряженными и незаряженными частицами ограничивают длину свободного пробега заряженных частиц, ускоренных в электрическом поле. Это влияет на передачу энергии частицам.

В радиочастотных системах из-за короткой длины свободного пробега электронов энергия электронов находится в диапазоне нескольких эВ, тогда как энергия электронов в микроволновой плазме находится в диапазоне кэВ. Электроны с энергией всего несколько эВ могут присоединяться к поверхности частиц; это отличается в случае электронов, богатых энергией, поскольку они ионизируют частицы. Поэтому в радиочастотных системах участвуют отрицательно заряженные частицы, тогда как электрический заряд частиц в микроволновых системах положительный. В обоих случаях в хорошем приближении электрический заряд частиц линейно возрастает с увеличением диаметра частиц [21]. Увеличение заряда частиц с увеличивающимся диаметром имеет серьезные последствия для процессов коагуляции и агломерации частиц. Частицы с одинаковыми электрическими зарядами отталкиваются друг от друга. Поскольку заряд частиц увеличивается с увеличением диаметра частиц, частицы с большими диаметрами отталкивают друг друга больше, чем частицы с меньшими диаметрами. Это ограничивает образование более крупных частиц и образование агломератов. Иными словами, в хорошо спроектированной низкотемпературной плазменной системе для синтеза наночастиц, получают частицы с узким спектром распределения размеров частиц.

2 Расчетная часть

2.1 Расчет показателей горючести водно-органических нитратных растворов

Жидкие композиции, значения низших теплотворных способностей которых составляет не менее 8,4 МДж/кг, являются горючими [23].

Для определения низшей теплотворной способности ВОНР использовалось уравнение [24]:

$$Q_H^p = \frac{(100-W-A) \cdot Q_H^c}{100} - \frac{2,5 \cdot W}{100}, \quad (2)$$

где Q_H^c – низшая теплотворная способность горючего компонента в составе ВОНР, МДж/кг; А и W – содержание негорючих веществ и воды, %; 2,5 – коэффициент учета скрытой теплоты испарения воды при °С, МДж/кг [24].

В таблице 5 приведены значения низшей теплотворной способности Q_H^c выбранных горючих компонентов в составе ВОНР.

Таблица 5 – Показатели горючести горючих органических веществ

Параметр	Вещество
	Ацетон
Q_H^c , МДж/кг	31,54
$T_{\text{вспышки}}$, К	254
$T_{\text{самовоспл.}}$, К	738

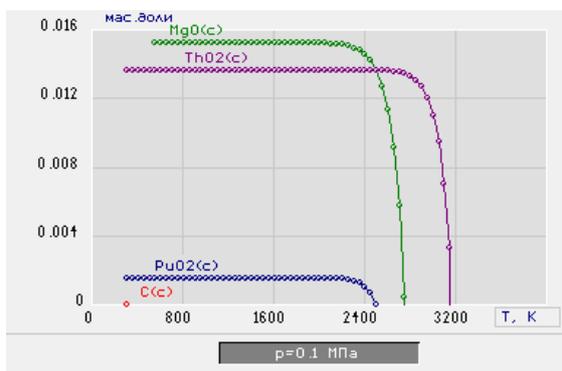
Результаты проведенных расчетов низшей теплотворной способности ВОНР, включающих органический компонент (ацетон), представлены в таблице Б1 (Приложение Б).

2.2 Термодинамическое моделирование процесса плазмохимической переработки водно-органических нитратных растворов на основе ацетона

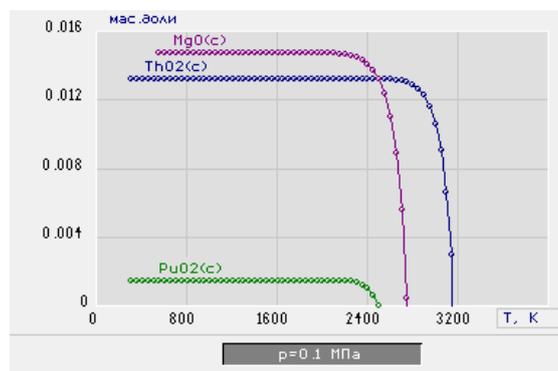
Термодинамическое моделирование проводится с целью определения равновесного состава продукта, полученного в результате плазмохимической переработки ВОНР. Для расчета термодинамических свойств и составов фаз

систем с фазовыми и химическими превращениями применяется ПО «TERRA» [25]. Расчеты были проведены при температурах (300–4000 К), давлении ($0,1 \cdot 10^6$ Па), изменении значений исходной массовой доли плазменного теплоносителя (воздуха) в интервале (0,1–0,9) [26, 27, 28].

Равновесные составы, полученные в результате термодинамического моделирования процесса плазмохимической переработки ВОНР на основе ацетона, представлены на рисунках 5–14.

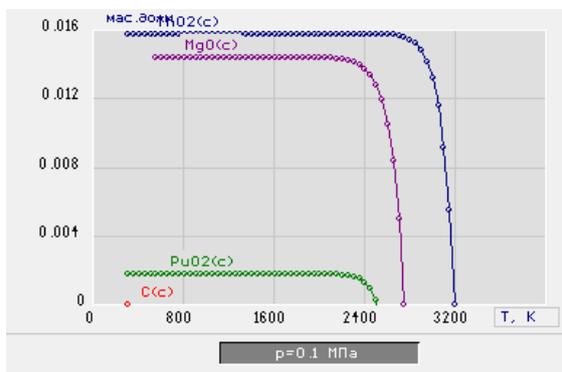


а)

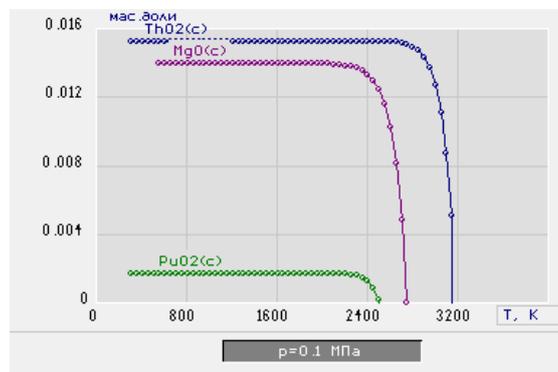


б)

Рисунок 5 – Равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-1 в конденсированной фазе: массовые доли плазменного теплоносителя 69 % (а) и 70 % (б)

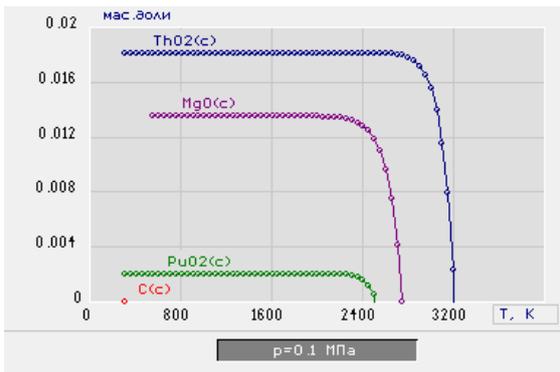


а)

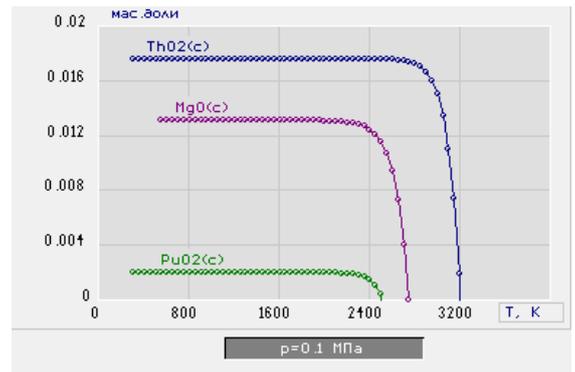


б)

Рисунок 6 – Равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-2 в конденсированной фазе: массовые доли плазменного теплоносителя 69 % (а) и 70 % (б)

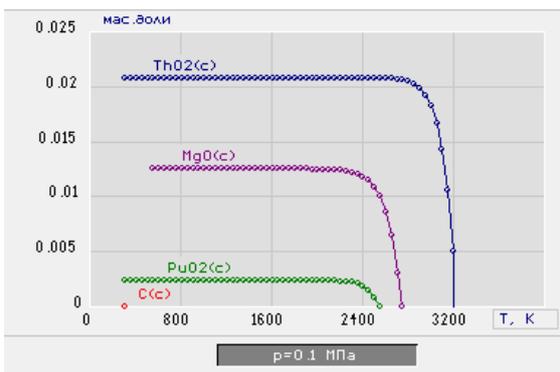


а)

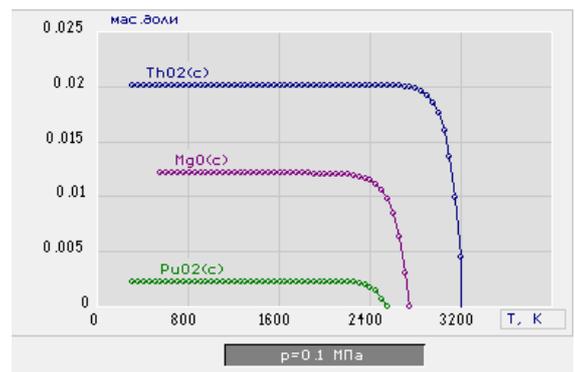


б)

Рисунок 7 – Равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-3 в конденсированной фазе: массовые доли плазменного теплоносителя 69 % (а) и 70 % (б)

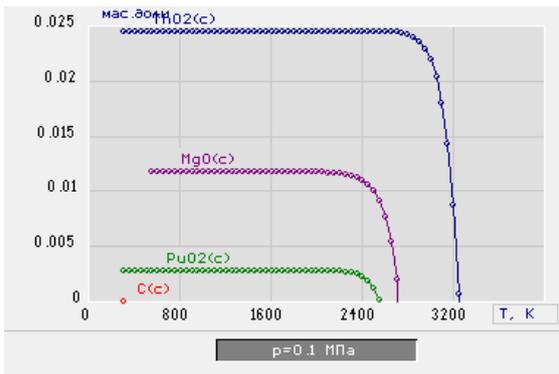


а)

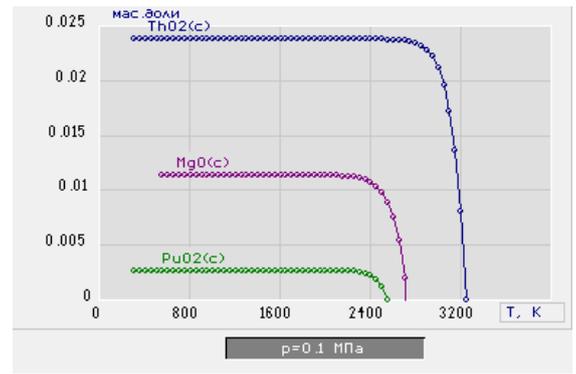


б)

Рисунок 8 – Равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-4 в конденсированной фазе: массовые доли плазменного теплоносителя 69 % (а) и 70 % (б)

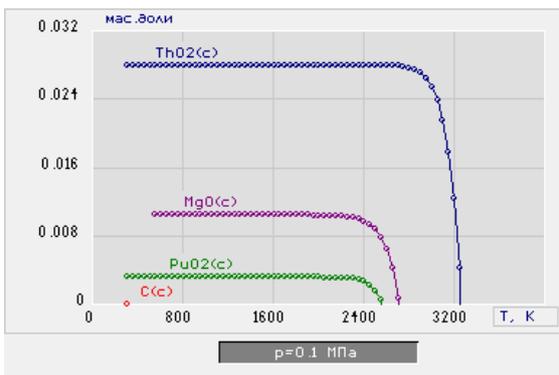


а)

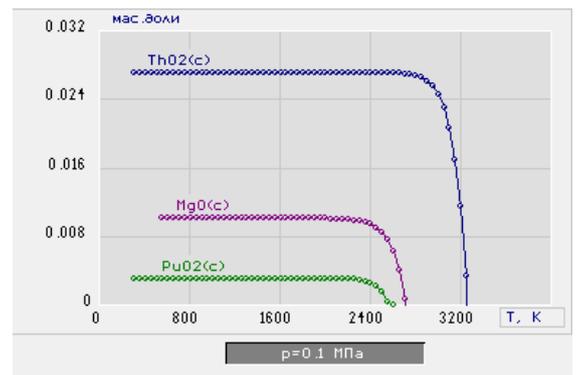


б)

Рисунок 9 – Равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-5 в конденсированной фазе: массовые доли плазменного теплоносителя 68 % (а) и 69 % (б)

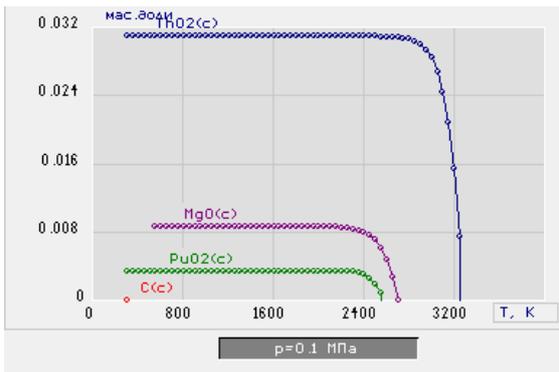


а)

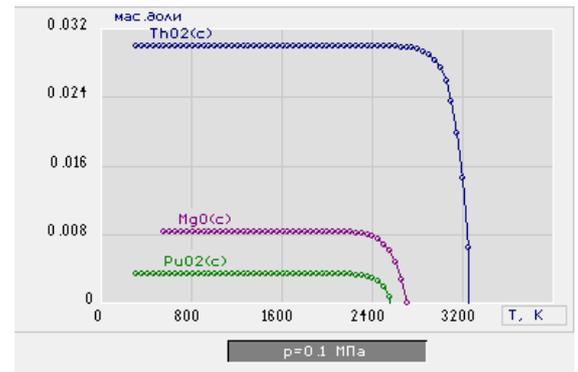


б)

Рисунок 10 – Равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-6 в конденсированной фазе: массовые доли плазменного теплоносителя 68 % (а) и 69 % (б)

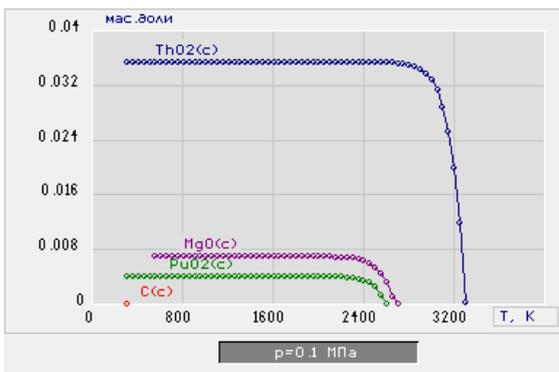


а)

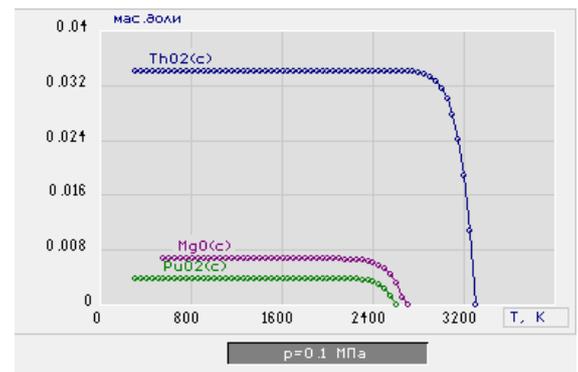


б)

Рисунок 11 – Равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-7 в конденсированной фазе: массовые доли плазменного теплоносителя 69 % (а) и 70 % (б)

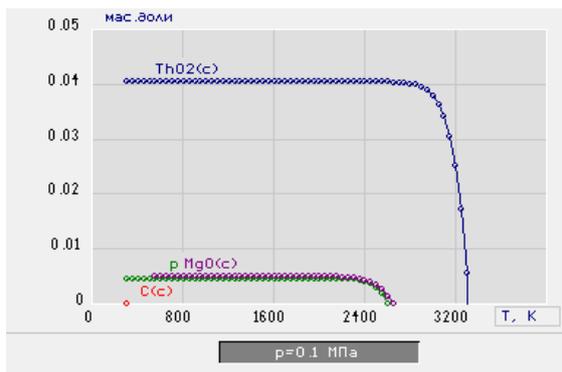


а)

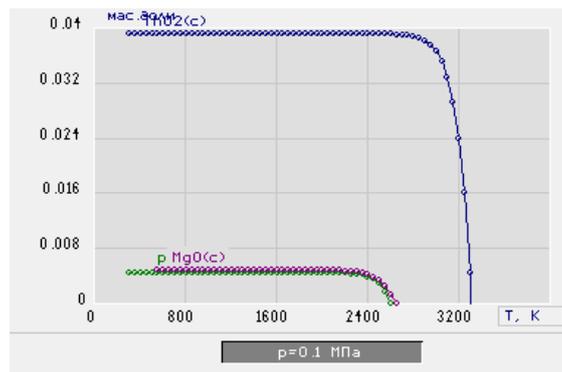


б)

Рисунок 12 – Равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-8 в конденсированной фазе: массовые доли плазменного теплоносителя 69 % (а) и 70 % (б)

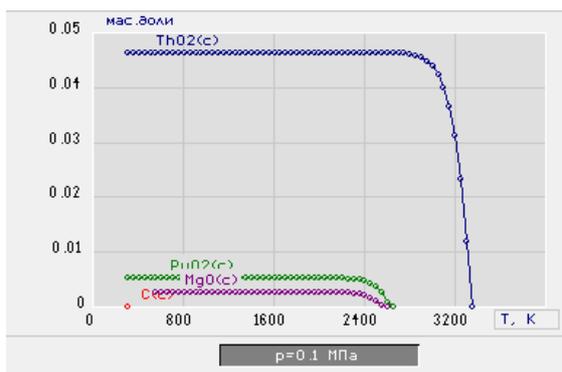


а)

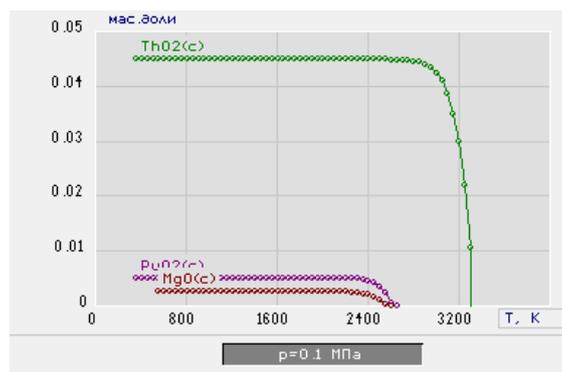


б)

Рисунок 13 – Равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-9 в конденсированной фазе: массовые доли плазменного теплоносителя 69 % (а) и 70 % (б)



а)



б)

Рисунок 14 – Равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-10 в конденсированной фазе: массовые доли плазменного теплоносителя 69 % (а) и 70 % (б)

Анализ равновесных составов продуктов плазменной переработки ВОНР с содержанием ацетона (рис. 5-14) следует, что при массовой доле воздуха 69 % (рисунки 5–8, рисунки 11-14) и при массовой доле воздуха 68 % (рисунки 9, 10) основными продуктами в конденсированных фазах являются оксиды $\text{ThO}_2(\text{с})$, $\text{PuO}_2(\text{с})$ и $\text{MgO}(\text{с})$, которые образуют требуемые оксидные композиции ОК-1÷ОК-10. При этом также образуется углерод $\text{C}(\text{с})$, содержание которого резко

возрастает при снижении массовой доли воздуха менее 68 %. Повышение массовой доли воздуха с 68 % до 69 % (рисунки 10, 11), с 69 % до 70 % (рисунки 6–9, рисунки 12–15) и более не приводит к образованию углерода С(с) и не изменяет состав целевых продуктов. Дальнейшее повышение массовой доли воздуха свыше 70 % приведет лишь к уменьшению содержания целевых продуктов и снижению производительности данного процесса.

Далее были проведены расчеты энергозатрат на процесс плазмохимического синтеза в воздушной плазме 1 кг целевых продуктов в виде оксидных композиций ОК-1÷ОК-10. Результаты расчетов энергозатрат на процесс плазменной переработки растворов ВОНР на основе ацетона приведены в таблице В1 (приложение В) и на рисунке 15.

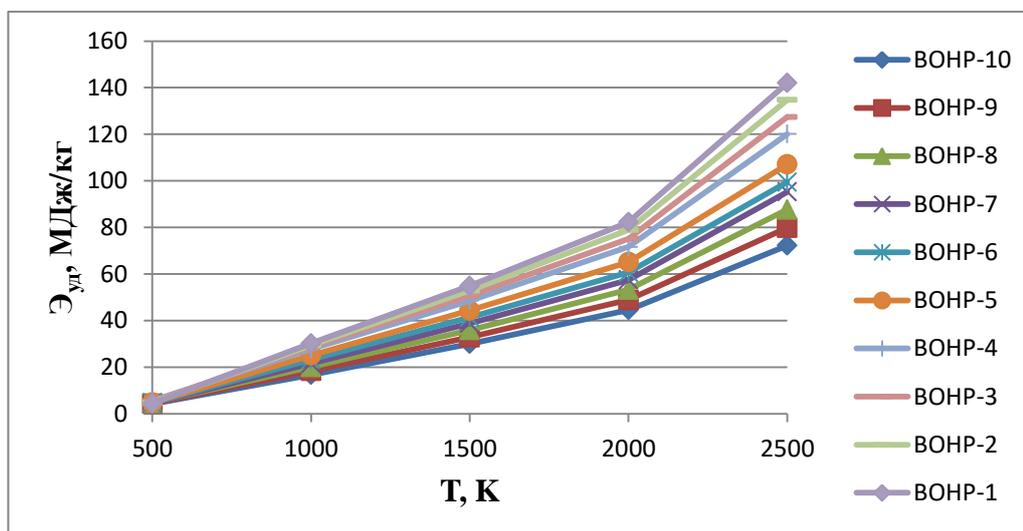


Рисунок 15 – Удельные энергозатраты на процесс плазмохимического синтеза оксидных композиций из растворов ВОНР на основе ацетона

Из анализа полученных данных определены условия, обеспечивающие при плазменной переработке растворов ВОНР на основе ацетона, максимальный выход целевых продуктов при минимальных энергозатратах. Такой результат достигается при ≈ 1500 К при плазмохимическом синтезе композиции ОК-10 «95 % (9,5 % $\text{PuO}_2 + 85,5$ % ThO_2)-5 % MgO ».

3 Экспериментальная часть

3.1 Лабораторный стенд для проведения исследований

Экспериментальные исследования процесса синтеза топливных ОК в воздушно-плазменном потоке проводились при использовании лабораторного стенда «Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01», представленном на рисунке Г1 (Приложение Г1) [29, 30].

В состав плазменного стенда входит высокочастотный генератор с рабочей частотой 13,56 МГц и колебательной мощностью до 60 кВт [31]. Генерируемая энергия передается от него на охлаждаемый водой медный электрод ВЧФ-плазмотрона, через разрядную камеру которого продувается плазмообразующий газ – воздух. Среднемассовая температура воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном, не превышает 4000 К. Кварцевая трубка (длина – 0,86; диаметр – 0,05 м) выполняет функцию разрядной камеры плазмотрона [32].

Через реактор и ВЧФ-плазмотрон осуществляется прокачка воздуха при помощи высоконапорного вытяжного вентилятора. Закрутка поступающего в разрядную камеру потока воздуха осуществляется импеллером, который расположен в узле ввода, расположенном на входе в плазмотрон. Постоянная входная площадь импеллера ($S_{\text{иг}}$) составляет 0,0025 м². Импеллер реактора снабжен шибером, с помощью которого регулируется входная площадь импеллера ($S_{\text{им}}$) в диапазоне от 0 до 1650 см².

Работающий реактор является источником загрязняющих веществ, например монооксиды углерода и азота, диоксиды азота и серы и углеводороды. Для контроля их содержания в отходящих газах используются газоанализатор и пробоотборник. Значения скоростей воздушного потока в ВЧФ-плазмотроне и газоходе (диаметр – 0,25 м, площадь ($S_{\text{гхд}}$) – 0,05 м²) измеряются трубкой Пито.

Измерение температуры горения диспергированных ВОНР в реакторе осуществляется бесконтактным способом по линии поглощения образующегося CO_2 при помощи высокоточного цифрового пирометра IPE-140/45

3.2 Определение расхода плазмообразующего газа через разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона

Расход воздуха через воздуховод определяется с помощью трубки Пито (рисунок 16).

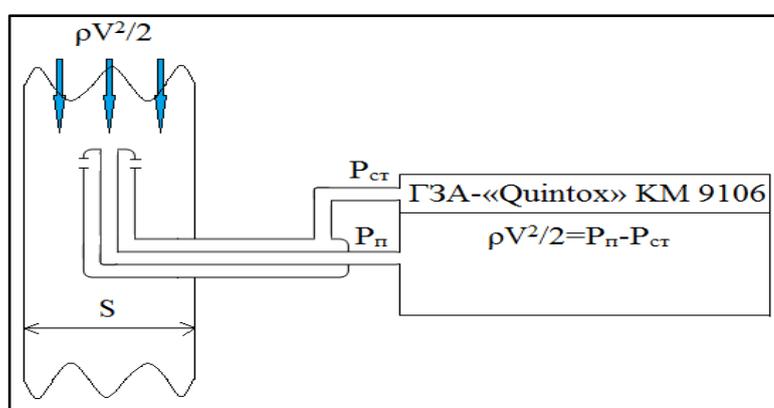


Рисунок 16 – Схема определения расхода воздуха в воздуховоде с помощью трубки Пито

Трубка Пито измеряет напор, создаваемый набегающим потоком воздуха по следующей формуле [33]:

$$f = \frac{\rho V^2}{2} = P_{п} - P_{ст}, \quad (3)$$

где $P_{п}$ – полное давление, Па;

$P_{ст}$ – статическое давление, Па;

ρ – плотность воздуха при температуре T , кг/м^3 ;

$f = \frac{\rho V^2}{2}$ – напор, создаваемый набегающим потоком воздуха.

Из формулы 3 определяется скорость набегающего потока:

$$V = \left[\frac{2(P_{п} - P_{ст})}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Далее рассчитывается объёмный (или массовый) расход воздуха через воздуховод по формуле:

$$Q = S \cdot V, \quad (5)$$

где S – площадь поперечного сечения воздуховода.

Графики зависимости напора, создаваемым набегающим потоком воздуха, от величины входной площади шибера реактора приведены на рисунках 17, 18.

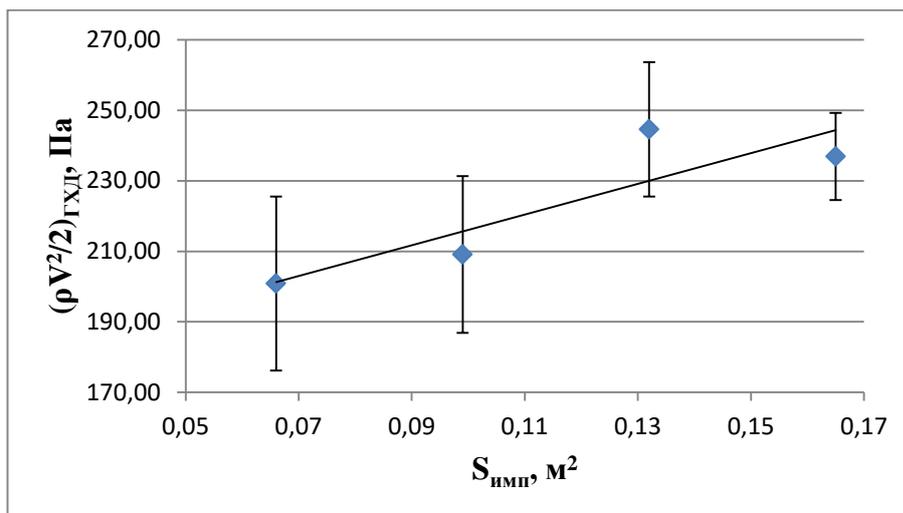


Рисунок 17 – Влияние входной площади импеллера реактора на напор, создаваемый набегающим потоком воздушного теплоносителя в газоходе

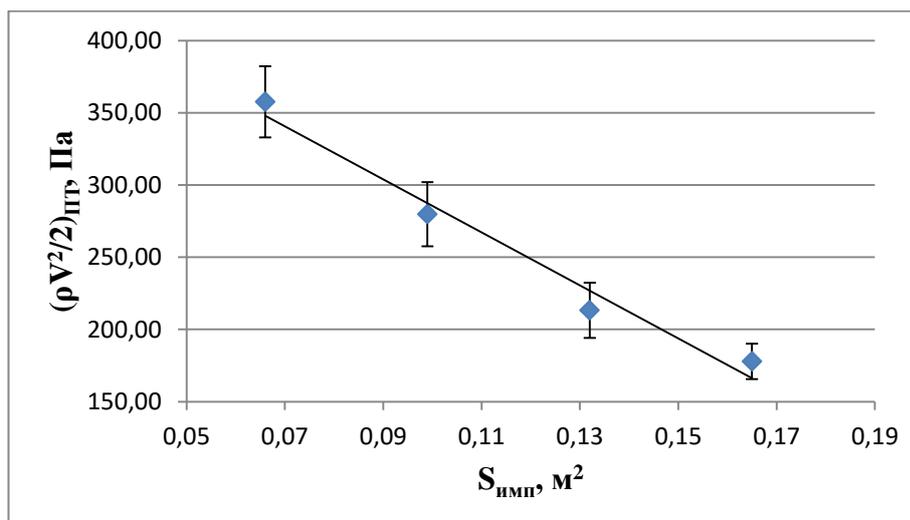


Рисунок 18 – Влияние входной площади импеллера реактора на напор, создаваемый набегающим потоком воздушного теплоносителя в разрядной камере ВЧФ-плазмотрона

В таблицах Д1 и Д2 (Приложение Д) приведены результаты измерений расходов воздуха через газоход и ВЧФ-плазмотрон. По результатам полученных данных были построены графики расхода плазмообразующего газа (воздуха) через ВЧФ-плазмотрон ($Q_{пт}$), а также воздушного теплоносителя через газоход ($Q_{гхд}$) в зависимости от величины входной площади импеллера реактора. Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздуха через ВЧФ-плазмотрон и газоход представлено на рисунках 19 и 20.

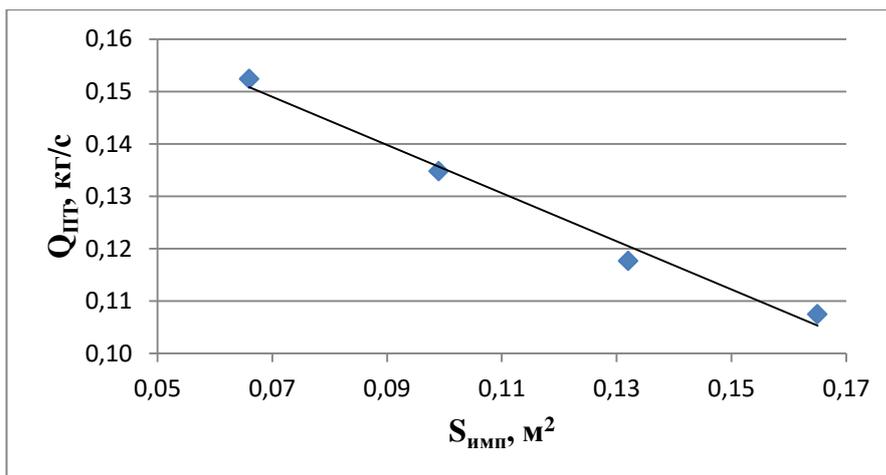


Рисунок 19 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон

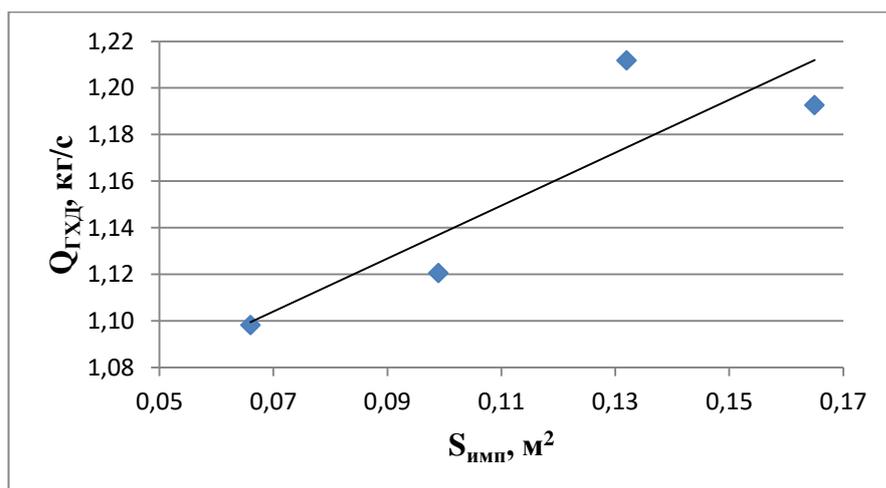


Рисунок 20 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздушного теплоносителя через газоход

3.3 Расчет расхода газа через реактор

Для расчета расхода воздуха через реактор использовалось следующее выражение:

$$Q_R = Q_{ГХД} - Q_{ПТР}, \quad (6)$$

где Q_R – расход воздушного теплоносителя через реактор, кг/с;

$Q_{ГХД}$ – расход воздушного теплоносителя через газоход, кг/с;

$Q_{ПТР}$ – расход плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон, кг/с.

В таблице Д3 (Приложение Д) приведены результаты расчета расхода воздуха через реактор.

В результате расчетов получена зависимость расходов воздушного теплоносителя через реактор плазменного стенда в зависимости от входной площади импеллера реактора. С помощью полученных данных был построен график зависимости расхода газа через реактор от площади шибера, который представлен на рисунке 21.

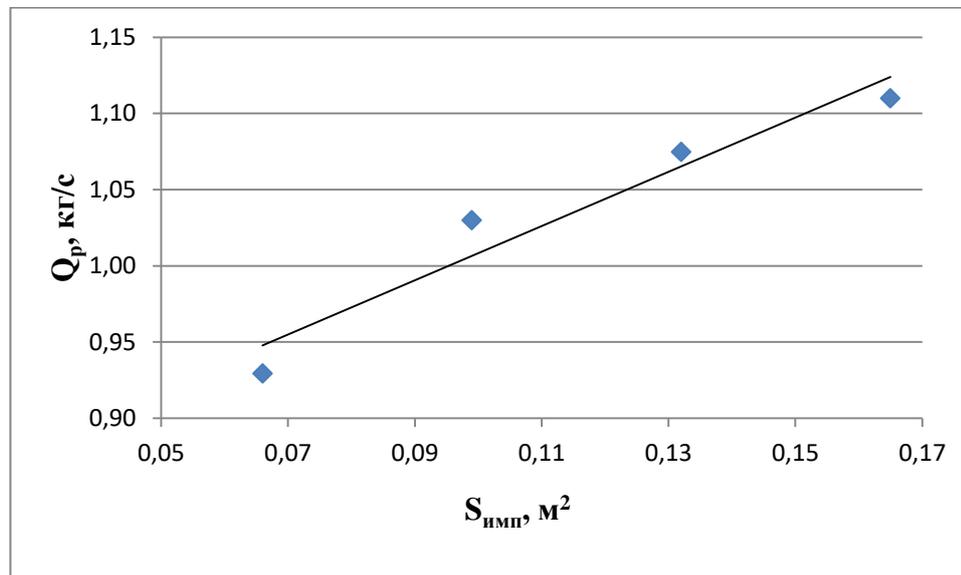


Рисунок 21 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздушного теплоносителя через газоход

Полученная зависимость позволяет за счет изменения шибера входной площади импеллера реактора осуществлять плавную регулировку расхода воздушного теплоносителя через реактор и плазмотрон.

3.4 Расчет основных технологических параметров установки

Результаты расчета основных технологических параметров установки приведены в таблице Е1 (Приложение Е).

При расчете технологических параметров работы установки использовались следующие соотношения.

Мощность, потребляемая ВЧГ от промышленной сети:

$$P_0 = I_a U_a, \text{ кВт}, \quad (7)$$

где I_a – ток анода, А;

U_a – напряжение на аноде генераторной лампы, кВ.

Мощность, выделяемая на различных узлах установки (анод генераторной лампы (а), сеточная индуктивность (с), электрод (э), корпус (к)):

$$P_i = m_i C \Delta t_i \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (8)$$

где m_i – массовый расход охлаждающей воды, кг/с;

C – теплоемкость воды, ккал/кг·°С,

Δt_i – изменение температуры охлаждающей воды, °С.

Мощность ВЧФ-разряда рассчитывалась по формуле:

$$P_p = P_0 - (P_a + P_c + P_\varepsilon), \text{ кВт}. \quad (9)$$

Мощность плазменной струи есть разность между мощностью ВЧФ-разряда и мощностью, выделяющейся на корпусе плазмотрона:

$$P_{ст} = P_p - P_k, \text{ кВт}. \quad (10)$$

Энтальпия плазменной струи:

$$H = H_0 + \frac{P_{разр}}{Q_{пг}}, \text{ кДж/кг}, \quad (11)$$

где H_0 – энтальпия газовой смеси при температуре 300 К;

$Q_{пг}$ – массовый расход плазмообразующего газа, кг/с.

Коэффициент полезного действия ВЧФ-плазмотрона:

$$\eta = \left(\frac{P_{ст}}{P_p} \right) \cdot 100, \% \quad (12)$$

Установочный коэффициент полезного действия плазменного стенда:

$$\eta = \left(\frac{P_{ст}}{P_0} \right) \cdot 100, \% \quad (13)$$

Температуру плазменной струи определяем с помощью графической зависимости энтальпии воздуха от его температуры, представленной на рисунке Е1 (приложение Е).

3.5 Плазмохимическая переработка модельных растворов

Для исследования возможности проведения процесса синтеза порошков высокой степени дисперсности в воздушной высокочастотной плазме в форме гомогенных по составу плутоний-ториевых оксидных композиций было проведено экспериментальное изучение процесса на модельных азотнокислых растворах с использованием имитаторов. Для подготовки растворов ВОНР использовались соли нитрата самария ($\text{Sm}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) вместо нитрата плутония, нитрата церия ($\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) вместо нитрата тория, а также соль нитрата магния ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для образования матрицы в виде оксида магния в составе ОК. Использование самария объясняется тем, что он находится в одной группе периодической таблицы с плутонием, а в растворах формирует сложные ионы, сходные по свойствам с делящимся элементом.

В качестве горючего органического компонента использовался ацетон. Это объясняется тремя факторами: высокой теплотворной способностью, высокой взаимной растворимостью, а также доступностью.

Вначале готовился с использованием дистиллированной воды (1 л) водный нитратный раствор (ВНР) из нитратных солей металлов и смешивался с органическим компонентом (3 л) с получением раствора ВОНР. Предварительно подготовленные растворы ВОНР подавались с постоянным расходом (300 л/ч) на диспергатор 1 (рисунок Г1) и далее в диспергированном

виде поступали в реактор, где в процессе переработки в воздушно-плазменном потоке осуществлялся плазмохимический синтез простых и сложных ОК при температуре $T_p \geq 1000^\circ\text{C}$. Контроль температуры T_p осуществлялся высокоточным цифровым инфракрасным пирометром 14 (IRE 140/45) по линии поглощения диоксида углерода. После реактора пыле-парогазовая смесь поступала на центробежно-барботажные аппараты узла «мокрой» очистки отходящих газов 8, где происходило ее резкое охлаждение (закалка) оборотной технологической водой (ОТВ) с получением водных суспензий из полученных ОК. Очищенные отходящие газы забирались высоконапорным вытяжным вентилятором и выбрасывались в атмосферу. Полученные водные суспензии ОК помещали в емкости из нержавеющей стали, отбирали пробы для определения гранулометрического состава суспензий методом лазерной дифракции (ЛД). Затем водные суспензии ОК отстаивали, полученные осадки отделяли, фильтровали и прокаливали в течение 20 минут при температуре 120-150 °С. В таблице Ж1 (Приложение Ж) приведены составы и режимы переработки растворов ВОНР, физико-химические и технологические свойства полученных простых и сложных оксидных композиций, моделирующих в воздушно-плазменном потоке плазмохимического синтез ОК для плутоний-ториевого дисперсионного ядерного топлива.

3.6 Анализ полученных результатов

Исследования морфологических, структурных, кристаллических и технологических свойств порошков ОК проводили на базе аналитического оборудования Центра коллективного пользования НОИЦ НМНТ ИШНПТ ТПУ (3140 – Научно-образовательный инновационный центр «Наноматериалы и нанотехнологии», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»).

Для определения гранулометрического состава частиц ОК в полученных водных суспензиях использовали метод лазерной дифракции (метод ЛД), реализованный на приборе SALD-7101 (Shimadzu, Япония). Для сопоставления с режимами и другими свойствами порошков использовали количественный результат в виде медианного значения полученного распределения, равного широко применяемому в производстве техническому параметру «D₅₀». Поскольку использованный метод позволяет определить размер частиц в суспензии (взвеси), независимо от их структурного строения, включая жёсткие агломераты, этот результат использовали для определения степени агломерации исследуемых порошков ОК.

Величину удельной поверхности исследуемых порошков ОК оценивали методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ-анализ) на приборе Сорби-М (ЗАО «МЕТА», Россия). Полученные данные пересчитывали в размер частиц, исходя из предположения об их сферической геометрии.

Рентгенофазовый анализ (РФА) исследуемых порошков ОК проводили на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu, Япония) с применением стандартной базы данных кристаллических структур неорганических материалов PDF-4, в свободно распространяемом программном обеспечении PowderCell по алгоритму Ритвельда для полнопрофильного анализа рентгеновских дифрактограмм. Определяли фазовый состав порошков ОК, параметры кристаллической структуры обнаруженных фаз, а также средние размеры областей когерентного рассеяния (ОКР, кристаллитов). Отношение последних к размеру частиц ОК по данным БЭТ-анализа характеризует морфологию и развитость поверхности частиц и может быть выражено количественно коэффициентом гигроскопичности K : форма частиц, для которых этот коэффициент меньше или приближается к единице, близка к равноосной; коэффициент больше единицы характеризует частицы с развитой поверхностью и/или с внутренними порами; коэффициент меньше единицы характеризует плотные агломераты, состоящие из нескольких кристаллитов. Степень агломерированности таких частиц количественно характеризует

коэффициент агломерации Q , величина которого определяется как отношение размера частиц ОК (метод ЛД) к размеру ОКР (количество кристаллитов на линейном поперечном размере частицы ОК).

На рисунке 22 представлена характерная гистограмма распределения по размерам частиц водной суспензии ОК-2 (метод ЛД), полученной при переработке раствора ВОНР-2.

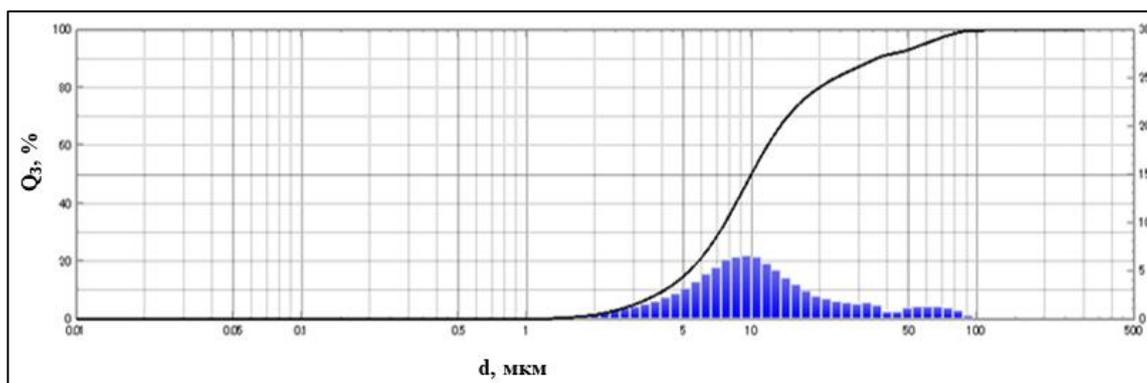


Рисунок 22 – Характерная гистограмма распределения по размерам частиц (агломератов) порошка ОК-2

Частицы водной суспензии ОК-2 характеризуются достаточно широким распределением по размерам, близким к мономодальному. Характерные величины медианных значений распределения частиц лежат в диапазоне от 2 до 90 мкм. Среднее значение размера частиц D_{50} составляет 9,9 мкм.

Анализ рентгенограмм образца порошка ОК-2 после РФА показывает, что основным продуктом пробы порошка являются целевые оксиды церия (Ce_2O_3), самария (Sm_2O_3) и магния (MgO).

Характерное СЭМ-изображение синтезированного порошка ОК-2 представлено на рисунке 23.

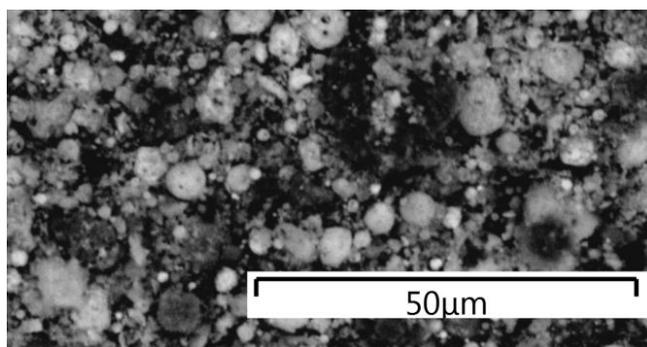


Рисунок 23 – Характерное СЭМ-изображение морфологической структуры частиц порошка ОК-2

Анализ СЭМ-изображения подтверждает достаточно широкий диапазон размеров частиц, наличие различных фаз, мелких плотных частиц. Микроскопия показывает, что форма частиц, в основном, округлая.

Величина удельной поверхности (метод БЭТ) составила $11,1 \text{ м}^2/\text{г}$. Полученное значение удельной поверхности пересчитывалось в размер кристаллитов, исходя из предположения об их сферической геометрии. Таким образом, размер кристаллитов, определенный по БЭТ, составляет 86 нм.

Свойства прессуемости, найденные по результатам прессования порошка ОК-2, имеют характерные для большинства оксидных материалов значения: порошок принадлежит к 4 группе сложности прессования.

Таким образом, производство из этого порошка керамических таблеток возможно при использовании серийно выпускаемого оборудования и пресс-форм из углеродистой инструментальной стали.

Прессование порошка ОК-2 проводилось в стальной цилиндрической пресс-форме диаметром 10 мм под давлением 400 МПа с последующим спеканием полученных прессовок при температуре $1300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Характерная микрофотография спеченной керамики из порошка ОК-2 приведена на рисунке 24.

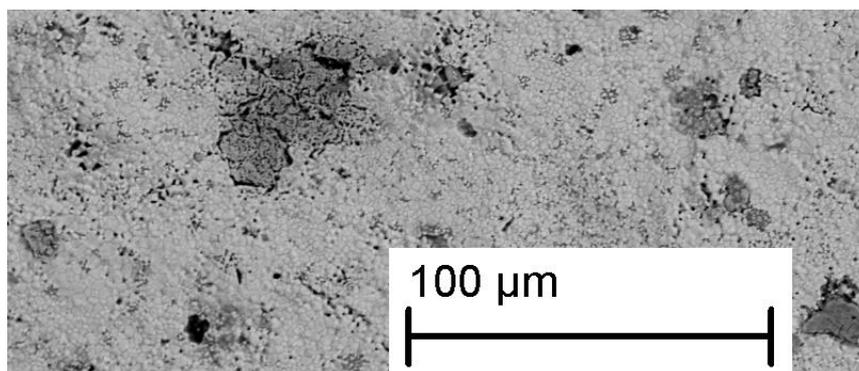


Рисунок 24 – Характерная микрофотография спеченной керамики из порошка ОК-2

На рисунках 25-27 показано влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц ОК в водных суспензиях (метод ЛД), удельной поверхности и размера кристаллитов в составе полученных порошков ОК (БЭТ-анализ).

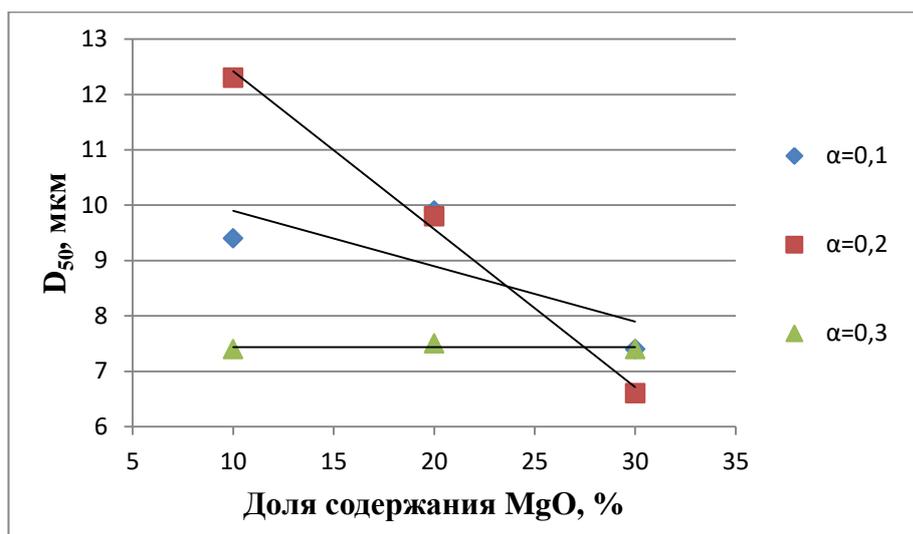


Рисунок 25 – Влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц в полученных водных суспензиях ОК (метод ЛД) при α=0,1; 0,2 и 0,3

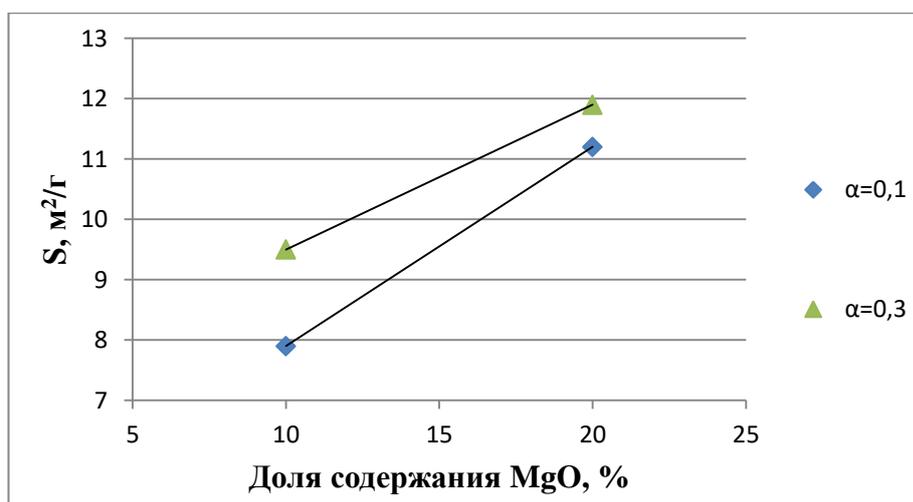


Рисунок 26 – Влияние содержания матрицы (MgO) на удельную поверхность и размер кристаллитов в составе порошков ОК (БЭТ-анализ) при $\alpha=0,1$ и $\alpha=0,3$

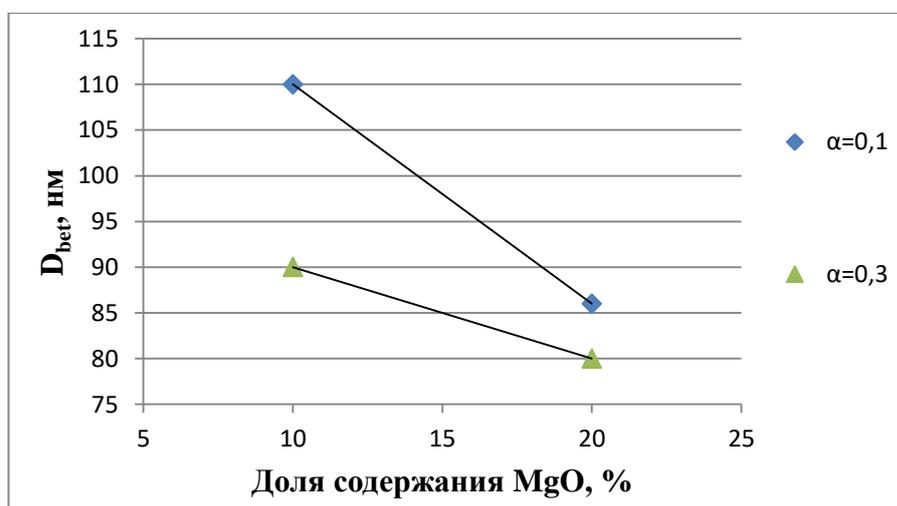


Рисунок 27 – Влияние содержания матрицы (MgO) на размер кристаллитов в составе полученных порошков ОК (БЭТ-анализ) при $\alpha=0,1$ и $\alpha=0,3$

Из анализа результатов, представленных на рисунках 24-27 и таблице Ж1, (приложение Ж) следует:

- увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК «Sm₂O₃–Ce₂O₃–MgO» (при $\alpha=0,1$), приводит при постоянном расходе воды на закалку ОК (2,8 кг/с) и частоте диспергатора (50 Гц) к снижению размера ОК после УМО с 9,4 мкм до 7,4 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность

ОК увеличивается с $7,9 \text{ м}^2/\text{г}$ до $11,2 \text{ м}^2/\text{г}$, а размер кристаллитов в частицах ОК снижается с 110 нм до 86 нм (БЭТ-анализ).

- увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10% до 30% в составе ОК (при $\alpha=0,2$), приводит при частоте диспергатора 50 Гц к снижению размера ОК после УМО с $12,3 \text{ мкм}$ до $6,6 \text{ мкм}$ (метод ЛД).

- увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10% до 30% в составе ОК (при $\alpha=0,3$), также приводит при частоте диспергатора 50 Гц к образованию ОК после УМО от $7,4$ до $7,5 \text{ мкм}$ (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК увеличивается с $9,5 \text{ м}^2/\text{г}$ до $11,9 \text{ м}^2/\text{г}$, а размер кристаллитов в частицах ОК уменьшается с 90 нм до 80 нм (БЭТ-анализ).

Из сравнительного анализа данных по физико-химическим свойствам (рисунки 36-38, таблица Ж1) полученных наноразмерных порошков ОК-1,2,3 (при $\alpha=0,1$) и ОК-7,8,9 (при $\alpha=0,3$) можно предположить, что и порошки ОК-4,5,6 (при $\alpha=0,2$) полученные при воздушно-плазменной переработке растворов ВОНР-4,5,6 также будут наноразмерными.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлены закономерности влияния состава растворов ВОНР, частоты диспергатора, расхода ОТВ (закалки) на процесс плазменной переработки диспергированных растворов ВОНР и определены режимы, обеспечивающие в воздушно-плазменном потоке плазмохимический синтез наноразмерных сложных ОК с высокими физико-химическими и технологическими свойствами, удовлетворяющими требованиям к дисперсионному плутоний-ториевому ядерному топливу.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В данной научно-исследовательской работе рассмотрена возможность плазмохимического синтеза наноразмерных сложных оксидных композиций. Низкотемпературная плазма находит применение в различных областях науки и техники – в частности такая плазма используется для получения дисперсных порошков (в том числе нанопорошков), для переработки различных видов отходов: радиоактивных отходов, отходов производства органических растворителей, отходов водоочистки и т.д. Также при помощи низкотемпературной плазмы осуществляется нанесение на изделия тугоплавких, ударопрочных и других покрытий. Низкотемпературная плазма используется так же для ионизации проб в масс-спектрометрических исследованиях. Все эти процессы являются высокотехнологичными и требуют точного контроля технологических параметров плазменной струи (температура, концентрация ионов и электронов и др.). Поэтому методы диагностики используются на каждом предприятии, которые работают в выше описанных областях.

Можно привести несколько примеров заинтересованных в этой разработке предприятий:

- АО «Сибирский химический комбинат»;
- ПАО «Новосибирский завод химконцентратов»;
- ПАО «Машиностроительный завод».

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание

конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- определение бюджета исследования;
- определение финансовой эффективности, ресурсоэффективности, и интегральной эффективности.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты (таблица 6).

Для сравнения выбраны два метода получения дисперсных порошков: плазмохимический (исследуемый нами) и золь-гель метод. Золь-гель процесс — технология материалов, в том числе наноматериалов, включающая получение золя с последующим переводом его в гель, то есть в коллоидную систему, состоящую из жидкой дисперсионной среды, заключенной в пространственную сетку, образованную соединившимися частицами дисперсной фазы.

Таблица 6 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{к1}	К _ф	К _{к1}
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Производительность	0,2	5	4	1	0,8
2. Удобство в эксплуатации	0,05	5	3	0,25	0,15
3. Надежность	0,1	5	5	0,5	0,5
4. Уровень шума	0,05	3	5	0,15	0,25
5. Безопасность	0,1	5	5	0,5	0,5
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Энергосбережение	0,4	4	4	1,6	1,6
2. Потребность в ресурсах	0,1	5	3	0,5	0,3
Итого	1	32	29	4,5	4,1

Из представленной таблицы можно сделать вывод, что оба процесса одинаково эффективны, но все же золь-гель метод немного уступает плазмохимическому. Основной акцент делается на разнице производительности этих двух процессов. Поэтому с точки зрения производительности исследуемый нами метод получения нанопорошков более эффективный. Также неоспоримым преимуществом выбранного нами процесса является его удобство в эксплуатации, требующее намного меньше средств и времени.

4.1.3 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 [34]. Матрица SWOT представлена в таблице И1 (Приложение И).

По результатам выполнения SWOT-анализа можно сделать вывод, что сильные стороны проекта, такие как низкая себестоимость плазмоподавляющих добавок, экономичное использование электроэнергии, компактность, простота монтажа и эксплуатации установки, благотворно влияют на возможности по усовершенствованию плазменной установки и появлению дополнительного спроса на наноразмерные оксидные композиции для плутоний-ториевого ядерного цикла.

Сильные стороны проекта нивелируют угрозы. Низкая себестоимость плазмоподавляющих добавок, экономичное использование электроэнергии, компактность, простота монтажа и эксплуатации установки способствуют уменьшению вероятности возникновения таких угроз как отсутствие финансирования и спроса на плазменную технологию получения нанопорошков.

Неизученность метода, сложности в его развитии, а также низкая актуальность исследований усложняют реализацию возможностей проекта, что приводит к трудностям усовершенствования установки и малой вероятности появления дополнительного спроса на продукцию.

Слабые стороны проекта усиливают угрозы. Незнание метода и низкая актуальность могут отрицательно сказаться на реализации плазменного метода получения нанопорошков в научно-исследовательской деятельности и привести к отсутствию спроса и финансирования.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Таблица 7 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Изучение литературы по теме	1	Подбор и изучение материалов по теме	Исполнитель

Продолжение таблицы 7

Изучение литературы по теме	2	Выбор направления исследований	Руководитель, исполнитель
	3	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, исполнитель
Моделирование процесса и экспериментальные исследования	4	Моделирование технологического процесса на ПК	Руководитель, исполнитель
	5	Проведение экспериментальных исследований	Руководитель, исполнитель
	6	Анализ и обработка полученных результатов	Руководитель, исполнитель
Обобщение и оценка результатов	7	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, исполнитель
	8	Оформление пояснительной записки	Исполнитель
	9	Подготовка к защите	Исполнитель

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (14)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (15)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

4.2.3. Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Временные показатели проведения научного исследования и календарный план-график проведения научного исследования представлен в таблицах И2, И3 (Приложение И).

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (16)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (17)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48.$$

4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

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

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;

- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

4.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi} , \quad (18)$$

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

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 8 – Материальные затраты

Наименование	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Z _м), руб.
Нитрат церия Ce(NO ₃) ₃	1 кг	15000	15000
Нитрат самария Sm(NO ₃) ₃	1 кг	8400	8400
Ацетон	10 л	82	820
Нитрат магния Mg(NO ₃) ₃	1 кг	500	500
Итого			24720

4.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данном разделе включены затраты, связанные с покупкой оборудования, которое необходимо для работы. Стоимость данного

оборудования определяется по прайс-листу или обговаривается в процессе заключения договора.

Таблица 9 – Стоимость оборудования

Наименование	Примечание	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Z_M), руб.
Генератор высокочастотный	ВЧГ 8-60/13	1	474000	474000
Ноутбук	ASUS X550CC	1	25990	25990
Принтер	Kyocera FS-1020MFP	1	17200	17200
Итого				517190

Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НТИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений:

$$A = \frac{\text{Стоимость} \cdot N_{\text{дней испытания}}}{\text{Срок службы} \cdot 365} = \frac{517190 \cdot 20}{3 \cdot 365} = 9446,4 \text{ руб.}$$

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату [35]:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (19)$$

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

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (20)$$

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (21)$$

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 10 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	104	104
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	24
- невыходы по болезни	—	—
Действительный годовой фонд рабочего времени	199	223

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p, \quad (22)$$

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{\text{тс}}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 11 – Расчёт основной заработной платы

	$Z_{тс}$, руб.	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}$, руб.	$Z_{дн}$, руб.	$T_{р}$, раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	33664	0,3	0,2	1,3	65644,8	3430,7	28,8	98804,2
Исполнитель	13396,59	0,3	0,2	1,3	26123,4	1312,03	79,4	104175,2
Итого $Z_{осн}$								202979,4

4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (23)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы.

Таблица 12 – Расчёт дополнительной заработной платы

	$Z_{осн}$, руб.	$k_{доп}$	$Z_{доп}$, руб.
Руководитель	98804,2	0,14	13832,6
Исполнитель	104175,2	0,14	14584,5
Итого $Z_{доп}$			28417,1

4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (24)$$

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

Таблица 13 – Отчисления во внебюджетные фонды

	$Z_{осн}$, руб.	$Z_{доп}$, руб.	$k_{внеб}$	$Z_{внеб}$, руб.
Руководитель	98804,2	13832,6	0,3	33791,04
Исполнитель	104175,2	14584,5	0,3	35627,91
Итого $Z_{внеб}$				69418,95

4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Экспериментальные исследования проводились 20 дней по одному часу, мощность установки 35 кВт/час. Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = Ц_{эл} \cdot P \cdot F_{об}, \quad (25)$$

где $Ц_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию;

P – мощность оборудования, кВт;

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

Тариф на промышленную электроэнергию для «Национального исследовательского Томского политехнического университета» составляет 5,8 руб. за 1 кВт·ч.

$$C_{эл} = 5,8 \cdot 35 \cdot 20 = 4060 \text{ руб.}$$

Затраты на водоснабжение:

$$C_{в} = Ц_{в} \cdot Q \cdot F_{об}, \quad (26)$$

где $Ц_{в}$ – тариф на промышленное водоснабжение (24,66 руб за 1 м³);

Q – расход воды, м³;

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

$$C_{в} = 24,66 \cdot 1,8 \cdot 20 = 887 \text{ руб.}$$

Затраты на приобретение лицензионного программного обеспечения TERRA составили $C_{ПО} = 2038$ рублей.

Величина затрат на административные работы:

$$C_{АР} = (4060 + 887 + 2038) \cdot 0,16 = 1117,6 \text{ руб.}$$

Накладные расходы:

$$Z_{накл} = C_{эл} + C_{в} + C_{АР} + C_{ПО} + (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot 10 \%, \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
Z_{\text{накл}} &= 4060 + 887 + 1117,6 + 2038 \\
&+ (24720 + 9446,4 + 202979,4 + 28417,1 + 69418,95) \cdot 0,1 \\
&= 41600,79 \text{ руб.}
\end{aligned}$$

4.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта.

Таблица 14 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НИИ	24720	Пункт 1.3.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	9446,4	Пункт 1.3.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	202979,4	Пункт 1.3.3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	28417,1	Пункт 1.3.4
5. Отчисления во внебюджетные фонды	69418,95	Пункт 1.3.5
6. Накладные расходы	41600,79	Пункт 1.3.6
7. Бюджет затрат НИИ	376582,64	Сумма ст. 1- 6

4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной эффективности исследования

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как [35]:

$$I_{\text{финр}}^{\text{ипс.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (28)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{ипс.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

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

Таблица 15 – Значения интегральных финансовых показателей разработки

	Исп.1	Исп.2
$I_{\text{финр}}^{\text{ипс.}i}$	1	0,6

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (29)$$

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.

Таблица 16 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования / Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
1. Производительность	0,2	5	4
2. Энергосбережение	0,5	5	3
3. Надежность	0,2	5	4
4. Материалоемкость	0,1	5	3
ИТОГО	1		

$$I_{p-\text{исп1}} = 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,5 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 = 5,$$

$$I_{p-исп2} = 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,5 + 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,1 = 3,4.$$

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что научно-техническое исследование будет ресурсоэффективно при первом варианте исполнения проекта, т.е. при высокой производительности и энергоэффективности проекта.

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исп\ i}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр.1}}, I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр.2}} \text{ и т. д.} \quad (30)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (таблица 17) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{ср}$):

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп2}}. \quad (31)$$

Таблица 17 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,6
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	5	3,4
3	Интегральный показатель эффективности	5	5,7
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,87

5 Социальная ответственность

Целью выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР) является моделирование процесса синтеза в воздушной плазме наноразмерных оксидных композиций для плутоний-ториевого дисперсионного ядерного топлива.

В экспериментальной части ВКР было проведено термодинамическое моделирование процесса плазменной переработки водно-органических нитратных растворов (ВОНР), обеспечивающие прямой синтез в воздушной плазме топливных композиций для плутоний-ториевого дисперсионного топлива. По его результатам были определены оптимальные условия для практической реализации процесса: массовые доли раствора и плазмообразующего газа, рабочая температура, давление и удельные энергозатраты.

Выполнение ВКР проводилось в отделении ядерно-топливного цикла (ОЯТЦ) Инженерной школы ядерных технологий (ИЯТШ) Томского политехнического университета. Для выполнения экспериментальной части ВКР в качестве рабочего места использовался компьютерный стол с ЭВМ, соответствующее периферийное оборудование (монитор, клавиатура, мышь) и программное обеспечение (Microsoft Word, Microsoft Excel, TERRA). Потенциальными пользователями результатов исследования являются АО «Сибирский химический комбинат» и ПАО «Машиностроительный завод».

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

Основные положения по охране труда изложены в Трудовом кодексе Российской Федерации [36]. В этом документе указано, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация

профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются одной из главных забот государства.

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации каждый работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;
- гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

В трудовом кодексе Российской Федерации говорится, что нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, работодатель обязан вести учет времени, отработанного каждым работником.

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рабочее место при работе с ПК должно составлять не менее чем 6 м² [37]. Выполнение экспериментальной части ВКР проводилось в аудитории 001Б учебного корпуса № 10 ТПУ. Общая площадь аудитории 140,4 м², по 23,4 м² на одного оператора ЭВМ, что соответствует гигиеническим требованиям при работе с ЭВМ.

Пространство для ног должно соответствовать следующим параметрам: высота пространства для ног не менее 600 мм, расстояние сиденья до нижнего края рабочей поверхности не менее 150 мм, а высота сиденья 420 мм [38].

Так же предусмотрены следующие требования к организации рабочего места пользователя ПЭВМ: конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ. Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию [37].

5.2 Производственная безопасность

5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования

Объектом исследования являются водно-органические нитратные растворы (ВОНР) на основе воды, нитратов солей самария, церия, магния и органического компонента – ацетона, и представляют собой вредные химические вещества [38].

Химические вещества находятся в определенном физическом состоянии и обладают такими свойствами, которые при взаимодействии с организмом человека приводят к повреждению целостности тканей организма или нарушению его нормального функционирования. Степень опасности химических веществ связана с путями их попадания в организм человека, которые подразделяют на следующие группы проникновения: через органы дыхания (ингаляционный путь); через желудочно-кишечный тракт (пероральный путь); через кожные покровы и слизистые оболочки (кожный путь); через открытые раны при проникающих ранениях [38].

Согласно [39] ацетон, нитраты солей самария, церия и магния способны вызвать раздражение кожных покровов и глаз.

Опасность и вредность воздействия газовых компонентов, загрязняющих воздух примесей, на организм работающего зависят от их концентрации и токсичности, то есть химических свойств данных газов [38]. Ацетон – летучая жидкость. При продолжительном вдыхании паров ацетон накапливается в организме, вызывая сонливость и головокружение. Отравление ацетоном возможно при вдыхании паров в концентрации, превышающей ПДК, которая составляет 200 мг/м^3 [40].

5.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Работа по выполнению экспериментальной части ВКР проводилась при помощи персонального компьютера. При его использовании могут возникнуть различные вредные и опасные факторы, которые приведены в таблице 18. Обеспечение комфортных условий труда в значительной степени оказывает влияние на производительность труда и снижение профессиональных заболеваний [41].

Таблица 18 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Нормативные документы
1.Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным
2.Превышение уровня шума	машинам и организации работы». СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к
3.Повышенный уровень электромагнитного излучения	естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны	жилых, общественных зданий и на территории застройки. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
5.Поражение электрическим током	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение.

При проведении работ, связанных с теоретическим исследованием, важную роль также играет планировка рабочего места. Она должна соответствовать правилам охраны труда и удовлетворять требованиям удобства выполнения работы, экономии энергии и времени инженера.

Основным документом, определяющим условия труда при работе с ПЭВМ, является СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». В правилах указаны основные требования к помещениям, микроклимату, шуму и вибрации, освещению помещений и рабочих мест, организации и оборудованию рабочих мест.

Согласно [42] значимым физическим фактором является микроклимат рабочей зоны (температура, влажность и скорость движения воздуха). Температура, относительная влажность и скорость движения воздуха влияют на теплообмен и необходимо учитывать их комплексное воздействие. Нарушение теплообмена вызывает тепловую гипертермию, или перегрев.

Оптимальные нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха производственных помещений для работ, производимых сидя и не требующих систематического физического напряжения (категория Ia), приведены в таблице 19, в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и [42].
Таблица 19 – Нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха

Период года	Категория тяжести работ	Температура, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, не более м/с
Холодный	Ia	22÷24	40÷60	0,1
Теплый	Ia	23÷25	40÷60	0,1

Источниками света могут быть как естественные, так и искусственные объекты. Естественным источником в помещении служит солнце, искусственными являются электрические лампочки. При длительной работе в условиях недостаточной освещенности и при нарушении других параметров

световой среды зрительное восприятие снижается, развивается близорукость, болезнь глаз, появляются головные боли.

По нормативу [37] освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

Акустический шум является одним из раздражителей организма человека при длительном воздействии. При шумовом воздействии учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, возникают головные боли, ослабляется внимание и замедляются психические реакции, что в конечном итоге приводит к снижению работоспособности человека.

Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. Для категории тяжести работ Ia уровень шума на рабочем месте трудящегося не должен превышать 50 Дб [43].

При выполнении ВКР основными источниками электромагнитного излучения (ЭМИ) являются системный блок ПЭВМ и экран видеомонитора. Как и шум, электромагнитное поле (ЭМП) своим воздействием может быть причиной учащенного пульса, дыхания, повышения артериального давления, возникновения головных болей, ослабления внимания и замедления реакции, что снижает общую работоспособность человека. В соответствии с [37] напряженность ЭМП на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц–2 кГц: 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц–400 кГц: 2,5В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц–2 кГц: 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц–400 кГц: 25нТл

На оператора ЭВМ также воздействуют психофизиологические опасные и вредные производственные факторы. Они делятся на: физические перегрузки

(статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки). При работе с ПЭВМ физические перегрузки вызваны рабочей позой и повторением стереотипных рабочих движений, а нервно-психические – напряженностью трудового процесса [38].

Опасным фактором при работе с ПЭВМ и периферийным оборудованием является поражение электрическим током. Исходя из анализа состояния помещения, рабочее место инженера, занимающегося теоретическими исследованиями, по степени опасности поражения электрическим током можно отнести к классу помещений без повышенной опасности.

Поражение электрическим током может произойти в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ПЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ПЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки [44].

Проходя через организм, электрический ток вызывает термическое, электролитическое и биологическое действие. Термическое действие выражается в ожогах отдельных участков тела, нагреве кровеносных сосудов и нервных волокон. Электролитическое действие разлагает кровь и другие органические жидкости, вызывая значительные нарушения их физико-химических составов. Биологическое действие проявляется в раздражении и возбуждении живых тканей организма, что может сопровождаться непроизвольным судорожным сокращением мышц, в том числе мышц сердца и легких.

Знание допустимых для человека значений тока и напряжения позволяет правильно оценить опасность поражения и определить требования к защитным мерам от поражения электрическим током.

ГОСТ 12.1.038-82 устанавливает предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека (таблица 20). Под напряжением прикосновения понимается напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек. Нормы предназначены для проектирования способов и средств защиты от поражения электрическим током людей при их взаимодействии с электроустановками. Они соответствуют прохождению тока через тело человека по пути рука-рука или рука-ноги [45].

Таблица 20 – Предельно допустимые значения напряжения соприкосновения и силы тока

Род и частота тока	Наибольшие допустимые значение	
	U_{np} , В	I_h , мА
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Переменный, 400 Гц	3	0,4
Постоянный	8	1,0

Стандарт предусматривает нормы для электроустановок при нормальном (неаварийном) режиме их работы, а также при аварийных режимах производственных и бытовых электроустановок.

Для лиц, выполняющих работу в условиях высокой температуры и влажности (относительная влажность больше 75%), эти нормы должны быть уменьшены в три раза.

5.2.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

Все работы с ВОНР должны проводиться с использованием приточно-вытяжной вентиляции вдали от огня и источников искрообразования. В производственных условиях должна быть соблюдена герметизация оборудования, аппаратов, процессов слива и налива для исключения загрязнения воздуха рабочей зоны парами ацетона. При отборе проб,

проведении анализа и обращении в процессе производственных операций применяются индивидуальные средства защиты по нормам выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств защиты, утвержденным в установленном порядке [40].

Помещения для эксплуатации ПЭВМ должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь одного рабочего места пользователя ПЭВМ с видеодисплейным терминалом (ВДТ) на базе электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) должна составлять не менее 6 м², а для ВДТ на базе плоского дискретного экрана (жидкокристаллический, плазменный) 4,5 м² [37].

Рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы ВДТ были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева. Также как средство защиты для минимизации воздействия фактора следует установка местного освещения из-за недостаточной освещенности, оконные проемы должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа: жалюзи, занавесей, внешних козырьков.

Если помещение не соответствует вышеописанным нормам, то это влечет за собой ухудшение здоровья рабочих и как следствие ухудшение рабочего процесса.

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию [46]. Общеобменная вентиляция используется для обеспечения в помещениях соответствующего микроклимата. Периодически должен вестись контроль влажности воздуха. В летнее время при высокой уличной температуре должны использоваться системы кондиционирования.

Радиаторы должны устанавливаться в нишах, прикрытых деревянными или металлическими решетками. При этом температура на поверхности нагревательных приборов не должна превышать 95 °С, чтобы исключить пригорание пыли [47].

В исследовательских аудиториях имеют место шумы различного рода, которые генерируются как внутренними, так и внешними источниками шумов.

В рассматриваемом случае внутренними источниками шумов являются рабочее оборудование, а именно персональный компьютер, принтер, вентиляционная система, а также компьютерная техника других инженеров, находящихся в аудитории. При возможном превышении ПДУ шума [48] мероприятия по защите от шума должны предусматривать звукопоглощающие конструкции (звукопоглощающие облицовки, штучные поглотители), акустические экраны, глушители шума в системах вентиляции и кондиционирования воздуха. Для уменьшения шума, проникающего снаружи помещения, следует установить уплотнения по периметру притворов дверей и окон [49].

При превышении ПДУ ЭМИ [37] возможны следующие меры защиты: увеличение расстояния между источником ЭМИ и рабочей зоной, установка отражающих или поглощающих экранов, конструктивное совершенствование оборудования с целью снижения используемых уровней ЭМИ, общей потребляемой и излучаемой мощности оборудования.

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха. Для уменьшения физических нагрузок организма во время работы рекомендуется использовать специальную мебель с возможностью регулировки под конкретные антропометрические данные, например, эргономичное кресло [50].

Степень опасного воздействия на человека электрического тока зависит от рода и величины напряжения и тока, частоты электрического тока, пути прохождения тока через тело человека, продолжительности воздействия на организм человека, условий внешней среды.

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путём использования изоляции в корпусах оборудования;

- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;
- использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения;
- использование устройств бесперебойного питания [51].

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж проводится всему неэлектротехническому персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь неэлектротехнический персонал должен быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год.

Внеплановый инструктаж проводится руководителем подразделения при введении в эксплуатацию нового технического электрооборудования.

5.3 Экологическая безопасность

5.3.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду

В данном подразделе рассматривается характер воздействия ВОНР на окружающую среду.

При практической реализации процесса плазменной переработки ВОНР объект исследования может оказывать негативное влияние на окружающую среду за счет выделения в атмосферу: оксида углерода, диоксидов азота, серы и углерода. Выделяемые газообразные вещества с содержанием углерода относятся к 4 классу опасности – малоопасные вещества, диоксиды серы и азота относятся к 3 классу опасности – умеренно опасные [52]. Для защиты атмосферы от выбросов на предприятиях используются циклоны, скрубберы,

различные виды насадок и фильтров [53]. Влияние на гидросферу и литосферу в виде сброса жидких и твердых отходов отсутствует.

5.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

Процесс исследования проводился в аудитории с использованием ПЭВМ. В данном случае влияние на окружающую среду происходило на этапе производства и потребления электроэнергии, а также при производстве и утилизации вычислительной техники.

Энергетика влияет на все сферы окружающей среды. Электростанции загрязняют атмосферу (потребление кислорода, выбросы парниковых газов, влаги и твердых частиц), гидросферу (потребление воды, создание искусственных водохранилищ, сбросы загрязненных и нагретых вод, жидких отходов) и литосферу (потребление ископаемых топлив, изменение ландшафта, выбросы токсичных веществ) [54]. Снижение загрязнения возможно за счёт совершенствования оборудования производящего электроэнергию, применения более экономичных и результативных технологий, использования новых методов получения электроэнергии и внедрения современных методов и способов очистки и обезвреживания отходов производства. Кроме того, данная проблема должна решаться и за счёт эффективного и экономного использования электроэнергии потребителями. Это использование более экономичного оборудования, а также эффективного режима загрузки этого оборудования, соблюдение производственной дисциплины в рамках правильного использования электроэнергии. В современных компьютерах повсеместно используются режимы с пониженным потреблением электроэнергии при длительном простое [55].

Вредное воздействие на окружающую среду оказывает производство комплектующих современных компьютеров и периферийной техники. Кабели, подключаемые к электронным устройствам, изготавливаются из поливинилхлорида (ПВХ), который практически невозможно правильно

утилизировать. В результате старый материал оказывается обычно на свалке с отходами. Свалки и химические захоронения загрязняют источники воды. Единственный способ правильно утилизировать ПВХ заключается в том, чтобы отправить его в центр опасных отходов [56]. Редкоземельные металлы используются при создании дисплеев мониторов (иттрий, тербий, европий), мощных магнитов для жестких дисков и динамиков (неодим), аккумуляторов (лантан). Однако добыча редкоземельных ископаемых провоцирует выброс в атмосферу следующих загрязняющих веществ: диоксид серы, оксид углерода, диоксид азота, неорганическая пыль, твёрдые фториды, фтористый водород [57]. Гидросфера при производстве редкоземельных металлов загрязняется стоками, в которых присутствуют металлы и их соединения, а также материалы в форме суспензии. Другие вещества, попадающие в воду в значительных количествах – это хлориды, фториды и сульфаты. Уменьшение уровня загрязняющих веществ достигается при помощи водоочистных и электродиализных установок, благодаря которым возможно повторное использование жидких отходов производства. Для предотвращения выбросов в атмосферу используются центробежные системы и мокрые скрубберы [58].

5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Рациональное использование компьютерной техники позволяет достигнуть максимума эффективности ее применения, а также снизить воздействие на окружающую среду. Ремонтно-профилактическое обслуживание техники предусматривает следующие работы:

- очистку от пыли внутренних объемов блоков питания ПЭВМ, устройств независимого питания с последующим их тестированием, экранов видеомониторов, регулировку, настройку и смазку вентиляторов.
- проведение диагностики и локализация неисправностей устройств;

- полное тестирование оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) и выявление неисправных модулей;
- ремонт блоков питания с заменой неисправных элементов и последующей регулировкой;
- ремонт принтеров и сканеров, видеомониторов, накопителей [59].

При отсутствии возможности ремонта и повторного использования техника подлежит утилизации. Утилизация компьютерного оборудования осуществляется по специально разработанной схеме, которая должна соблюдаться в организациях:

- Создание комиссии, задача которой заключается в принятии решений по списанию морально устаревшей или не рабочей техники.
- Разработка приказа о списании устройств. Для проведения экспертизы привлекается квалифицированное стороннее лицо или организация.
- Составление акта утилизации, основанного на результатах технического анализа, который подтверждает негодность оборудования для дальнейшего применения.
- Формирование приказа на утилизацию.
- Утилизация оргтехники, осуществляемая специализированной фирмой.

После оформления всех необходимых документов, компьютерная техника вывозится со склада на перерабатывающую фабрику. Все полученные в ходе переработки материалы вторично используются в различных производственных процессах [60].

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В данном разделе проводится анализ наиболее вероятных чрезвычайных ситуаций (ЧС), источником которых может послужить объект исследования и непосредственно сам процесс исследования.

ЧС представляет собой обстановку на определенной территории, сложившуюся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей [61].

Предупреждение ЧС – это комплекс мероприятий, проводимых заблаговременно и направленных на максимально возможное уменьшение риска возникновения чрезвычайных ситуаций, а также на сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей среде и материальных потерь в случае их возникновения [62].

Ликвидация ЧС – это аварийно-спасательные и другие неотложные работы, проводимые при возникновении чрезвычайных ситуаций и направленные на спасение жизни и сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей среде и материальных потерь, а также на локализацию зон чрезвычайных ситуаций, прекращение действия характерных для них опасных факторов [62].

Безопасность в чрезвычайных ситуациях (БЧС) – состояние защищенности населения, объектов экономики и окружающей среды от опасностей в чрезвычайных ситуациях [61].

5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

Объектом исследования являются ВОНР, в составе которых присутствует легковоспламеняющийся ацетон. При работе с ВОНР наиболее вероятными ЧС являются возгорание и, как следствие, воздействие вредных веществ, таких как монооксид углерода и диоксид углерода [39]. Воздействие данных газов вызывает удушье и способно приводить к летальному исходу. ПДК монооксида углерода составляет 20 мг/м^3 , а диоксида углерода – 300 мг/м^3 [63]. Работы

должны проводиться с использованием приточно-вытяжной вентиляции вдали от огня и источников искрообразования. Средства защиты органов дыхания в аварийных ситуациях – противогаз марки А или БКФ [40].

5.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Исследования проводились с использованием персонального компьютера, при эксплуатации которого возможно возгорание. В современных компьютерах очень высокая плотность размещения элементов электронных систем, в непосредственной близости друг от друга располагаются соединительные провода и коммуникационные кабели. При протекании по ним электрического тока выделяется значительное количество теплоты, что может привести к повышению температуры отдельных узлов до 80-100 °С. При этом возможны оплавление изоляции соединительных проводов, их оголение и, как следствие, короткое замыкание, сопровождаемое искрением, которое ведет к недопустимым перегрузкам элементов электронных схем. Перегреваясь, они сгорают с разбрызгиванием искр [64].

5.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Исходя из [65] пожарная профилактика обеспечивается: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно-техническими мероприятиями. К мерам предотвращения пожара относятся: применение средств защитного отключения возможных источников загорания (защитного зануления); применение искробезопасного оборудования; выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной (устройства вентиляции и

кондиционирования воздуха, знаки безопасности) и индивидуальной защиты (одежда специальная защитная, средства защиты органов дыхания) от факторов пожара (пламя и искры, повышенная температура окружающей среды, повышенная концентрация токсичных продуктов горения, дым, пониженная концентрация кислорода); системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или углекислотных огнетушителей.

При обнаружении возгорания необходимо сообщить об этом руководителю, позвонить в пожарную охрану по телефону 01, 101 или 112, приступить к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь.

Выводы

1. С учетом результатов проведенного обзора литературы и анализа методов отдельного и совместного получения оксидных композиций рекомендован плазмохимический синтез оксидных композиций для дисперсионного ядерного топлива из диспергированных водно-органических нитратных растворов металлов, включающих делящиеся металлы, металл матрицы и органический компонент.

2. По результатам проведенных теплотехнических расчетов установлены закономерности влияния органического компонента (ацетон) на показатели горючести водно-органических нитратных растворов и определены составы растворов ВОНР, обеспечивающие энергоэффективный синтез оксидных композиций «PuO₂-ThO₂-MgO» заданного состава.

3. В результате проведенного термодинамического моделирования процесса плазменной переработки растворов ВОНР в широком диапазоне температур (300÷4000) К установлены закономерности влияния массовой доли воздушного теплоносителя на состав образующихся продуктов, проведена оценка энергозатрат на процесс и определены условия, обеспечивающие в воздушной плазме плазмохимический синтез оксидных композиций «PuO₂-ThO₂-MgO» заданного состава.

4. Проведены экспериментальные исследования процесса синтеза оксидных композиций «PuO₂-ThO₂-MgO» в воздушно-плазменном потоке из диспергированных растворов ВОНР, включающих самарий (вместо плутония) и церий (вместо тория) и исследованы физико-химические и технологические свойства полученных образцов порошков. Установлены закономерности влияния массовой доли матрицы (оксид магния) на размер образующихся кристаллитов в составе оксидных композиций «Sm₂O₃-Ce₂O₃-MgO». Показано, что плазменная переработка диспергированных растворов ВОНР в воздушно-плазменном потоке позволяет осуществлять плазмохимический синтез наноразмерных порошков оксидных композиций с высокими физико-химическими и технологическими свойствами.

Заключение

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза из диспергированных водно-органических нитратных растворов наноразмерных оксидных композиций для дисперсионного плутоний-ториевого ядерного топлива.

Список публикаций студента

1. Myshkin V. F. , Khan V. A. , Tychi M. - , Kapran A. .. , Borisov V. A. , Gamov D. L. , Zaguzin I. Y. Registration of a laser beam scattered from an aerosol located in the probe beam aperture // AIP Conference Proceedings. - 2019 - Vol. 2101, Article number 020022. - p. 1-6

2. Басс В. -. , Загузин И. Ю. , Новоселов И. Ю. Плазмохимический синтез и исследование модельных композиций «Sm–Ce–Mg–O» // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 30 Сентября-4 Октября 2019. - Томск: ТПУ, 2019 - С. 111

3. Загузин И. Ю. , Пшеничников А. С. , Котельникова А. А. Плазмохимический синтез оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов неодима и магния // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 30 Сентября-4 Октября 2019. - Томск: ТПУ, 2019 - С. 127-128

4. Загузин И. Ю. , Пшеничников А. С. , Сопыряев В. В. Плазмохимический синтез оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов церия и иттрия // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 30 Сентября-4 Октября 2019. - Томск: ТПУ, 2019 - С. 125-126

5. Myshkin V. F. , Makarevich S. V. , Grigorjev A. S. , Zaguzin I. Y. , Gamov D. L. Research of the $^{35}\text{Cl}/^{37}\text{Cl}$ isotope concentration distribution over the volume of NaCl crystals grown from an aqueous solution in a magnetic field // AIP Conference Proceedings. - 2018 - Vol. 1938, Article number 020005. - p. 1-5

6. Загузин И. Ю. , Лютиков О. Н. Структура пленок, напыляемых в магнитном поле путем магнетронного распыления // Изотопы: технологии,

материалы и применение : материалы V Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 19-23 ноября 2018 г. — Томск : Графика, 2018. — [С. 42].

7. Макаревич С. В. , Григорьев А. С. , Гамов Д. Л. , Роздольский В. Г. , Загузин И. Ю. Исследование распределения концентрации изотопов $^{35}\text{Cl}/^{37}\text{Cl}$ по объему кристаллов NaCl , выращенных из водного раствора в магнитном поле // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов IV Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 30 Октября-3 Ноября 2017. - Томск: Графика, 2017 - С. 23

8. Макаревич С. В. , Григорьев А. С. , Загузин И. Ю. , Юрьев П. А. Исследование кристаллизации NaCl из водного раствора, находящегося в магнитном поле // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов IV Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 30 Октября-3 Ноября 2017. - Томск: Графика, 2017 - С. 51

9. Хорохорин Д. М. , Загузин И. Ю. , Юрьев П. А. , Леонтьева Д. А. Особенности формирования изотопных кластеров в твердом теле и их влияние свойства материалов // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов IV Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 30 Октября-3 Ноября 2017. - Томск: Графика, 2017 - С. 52

Список использованных источников

1. Скоров Д.М., Бычков Ю.Ф., Дашковский А.М. Реакторное материаловедение. – М.: Атомиздат, 1979. – 344 с.
2. Бойко В.И., Власов В.А., Жерин И.И., Маслов А.А., Шаманин И.В. // Торий в ядерном топливном цикле. – М. : Издательский дом «Руда и Металлы», 2006. – 360 с.
3. Никольский Б.П. и др. Химическое равновесие и кинетика. Свойства растворов. Электродные процессы» / Справочник химика. Т 3, 1965.
4. Химия тория, урана, плутония: учебное пособие / Жерин И.И., Амелина Г.Н. – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – 147с.
5. Горский В.В. Ядерное топливо с инертной матрицей (IMF) // Атомная техника за рубежом. – 2000. – № 10. – С. 3.
6. Hania P.R., and Klaasen F.C. Thorium Oxide fuel // Comprehensive. Nucl. Mater. – 2012. – V. 3. – P. 87.
7. Butter G. Nuclear fuel // Nucl. Engineering. – 1999. – V. 40. – No 4. – P. 103.
8. Альбицкая Е.С. Развитие ядерно-энергетических систем // Атомная техника за рубежом. – 2013. – № 11. – С.13.
9. Degueldre C., Paratte J.M. Concepts for an inert matrix fuel, an overview // J. Nucl. Mater. – 1999. – V. 274. – No 1–2. – P. 1.
10. Черников А.С. и др. Ядерное топливо для высокотемпературных ядерно-энергетических систем. Доклад на 14-й International Conference on Emerging Nuclear-Energy Systems. Ericeira, Portugal, 2009.
11. Самойлов А.Г., Каштанов А.И., Волкова В.С. Дисперсионные твэлы: В 2-х т. Т. 1. Материалы и технология. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
12. Энциклопедия современной техники. Конструкционные материалы. Т. 2. Гл. ред. А.Г. Туманов. – М.: Советская энциклопедия, 1964.
13. Цыканов В.А. Тепловыделяющие элементы для исследовательских реакторов. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2000. – 249 с.

14. Алексеев С.В., Зайцев В. А., Толстоухов С. С. Дисперсионное ядерное топливо. — М. : Техносфера, 2015. — 248 с.
15. Магний. Эндензон М.А. Изд – во «Металлургия», 1969, 352 с.
16. Kleykamp H. Selection of materials as diluents for burning of plutonium fuels in nuclear reactors // J. Nucl. Mater. – 1999. – V. 275. – No 1–2. – P. 1.
17. Бойко В.И., Шидловский В.В., Мещеряков В.Н., Шаманин И.В., Кошелев Ф.П., Демянюк Д.Г. Перспективные ядерные топливные циклы и реакторы нового поколения: учебное пособие. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 518 с.
18. Lu, C.H. and Jagannathan, J., (2002) “Cerium-ion-doped yttrium aluminum garnet nanophosphors prepared through sol-gel pyrolysis for luminescent lighting,” Applied Physics Letters, vol.80(19) , p. 3608.
19. Алымов, М. И. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. / М. И. Алымов, В. А. Зеленский. – М. : МИФИ, 2005. – 52 с.
20. H. Fect, in Nanomaterials: synthesis, properties and applications, A.S. Edelstein, R.C. Cammaratra (Eds.), Taylor & Francis, Washington, 1996.
21. Пархоменко В.Д., Сорока П.И., Краснокутский Ю.И., Верещак В.Г. Плазмохимические методы получения порошкообразных веществ и их свойства // Всесоюзный журнал химического общества им. Д.И. Менделеева. – 1991. – Т. 36. – № 2. – С. 168.
22. T. Pfeiffer, J. Feng, A. Schmidt-Ott, Adv. Powder Tech. 25 (2014) 01.
23. Монахов В. Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. М.: Химия, 1979.
24. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: справочная книга. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
25. Трусов Б.Г. Программный комплекс TERRA для расчета плазмохимических процессов // Материалы 3 Междунар. симп. по теоретической и прикладной плазмохимии. – Плес, 2002. – С. 217.

26. Новоселов И. Ю. , Каренгин А. Г. , Шаманин И. В. , Алюков Е. С. Плазмохимический синтез нанодисперсных порошков оксидов иттрия и циркония из диспергированных водно-солеорганических композиций // Ползуновский вестник. - 2017 - Т. 1 - №. 3. - С. 142-148.
27. Моделирование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций «PuO₂-ThO₂-MgO» Тихонов А.Е., Бабаев Р.Г.
28. Зубов В. В. Моделирование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов для перспективных видов ядерного топлива / В. В. Зубов, А. Г. Каренгин // IX Школа-конференция молодых атомщиков Сибири : сборник тезисов докладов, 17-19 октября 2018 г., г. Томск. — Томск : Дельтаплан, 2018. — [С. 122]
29. Пиунова К. Г. Применение ВЧФ-плазмотронов для плазменной обработки радиационно-загрязненных водно-солевых отходов / К. Г. Пиунова, А. А. Каренгин, А. Г. Каренгин ; науч. рук. А. Г. Каренгин // Изотопы: технологии, материалы и применение : материалы II Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г.Томск, 19-23 октября 2015 г. — Томск : Изд-во ТПУ, 2015. — [С. 42].
30. Ли Е. С. Исследование и оптимизация режимов работы ВЧФ-плазмотрона в составе плазменного модуля / Е. С. Ли, Е. Э. Шлотгауэр, О. Д. Подгорная ; науч. рук. А. Г. Каренгин // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XI Международной конференция студентов и молодых ученых, г. Томск, 22-25 апреля 2014 г. — Томск : Изд-во ТПУ, 2014. — [С. 128-130].
31. Андреев Д. В. Плазменный модуль на базе ВЧФ-плазмотрона для плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций / Д. В. Андреев, В. В. Зубов, А. А. Каренгин ; науч. рук. А. Г. Каренгин // Изотопы: технологии, материалы и применение : материалы V Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 19-23 ноября 2018 г. — Томск : Графика, 2018. — [С. 71]

32. Novoselov I. Yu., Karengin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.
33. Ли Е. С. Исследование и оптимизация режимов работы плазменного модуля на базе ВЧФ-плазматрона / Е. С. Ли, Е. Э. Шлотгауэр, О. Д. Подгорная ; науч. рук. А. Г. Каренгин // Современные техника и технологии : сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14-18 апреля 2014 г. : в 3 т. — Томск : Изд-во ТПУ, 2014. — Т. 3. — [С. 17-18].
34. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2013 г.
35. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шапаваова. – Томск: НИ ТПУ, 2014. – 73 с.
36. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197;
37. СанПиН 2.2.2/2.4.1.1340-03. «Гигиеническими требованиями к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 15.06.2003 г.;
38. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.М.: Стандартиформ, 2016;
39. ГОСТ 30333-2007. Паспорт безопасности химической продукции. Общие требования;
40. ГОСТ 2768-84. Ацетон технический. Технические условия (с Изменениями N 1, 2)
41. ГОСТ 12.0.003-74. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация – М.: ИПК Издательство стандартов, 1992. – 4 с.;

42. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиеническими требованиями к микроклимату производственных помещений»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 13.06.2003 г.;
43. ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартиформ, 2008. – 11с.;
44. ГОСТ Р 12.1.009-2009. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения;
45. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
46. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях;
47. СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.– М.: Минрегион России, 2016;
48. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки;
49. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003;
50. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT);
51. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
52. ГН 2.2.5.3532–18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны;
53. Ляпков А.А., Ионова Е.И. Техника защиты окружающей среды. Издание 2-е, переработанное. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008. – 317 с;
54. Валеев И.М. Современные проблемы электроэнергетики: краткий курс лекций / КГЭУ. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2008;

55. Ушаков В.Я. История и современные проблемы электроэнергетики и высоковольтной электрофизики: учебное пособие. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 219 с;
56. Волков Н.В., Зуева В.Н. Влияние компьютерной техники на окружающую среду // Научный потенциал вуза - производству и образованию. – 2017. – № 1(2);
57. ИТС 24-2017 Производство редких и редкоземельных металлов;
58. Матвеев А.Н., Самусенок В.П., Юрьев А.Л. Оценка воздействия на окружающую среду: учебное пособие. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2007. - 179 с;
59. Постановление Минтруда РФ от 23.07.1998 N 28 "Об утверждении Межотраслевых типовых норм времени на работы по сервисному обслуживанию персональных электронно-вычислительных машин и организационной техники и сопровождению программных средств";
60. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 N 89-ФЗ;
61. ГОСТ Р 22.0.02-2016. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения;
62. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (с изменениями и дополнениями);
63. ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны;
64. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление (с Изменением №1)
65. ГОСТ 12.1.004-91, ССБТ «Пожарная безопасность. Общие требования». – М.: МВД России, 1992. – 25 с.

Приложение А

(справочное)

Modelling the air plasma synthesis of oxide compositions for dispersive plutonium-thorium nuclear fuel

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Загузин Илья Юрьевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Каренгин Александр Григорьевич	к.ф.-м.н.		

Консультант-лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Смирнова Ульяна Александровна	—		

Introduction

Nuclear fuel of uranium dioxide enriched in isotope uranium-235 has several significant drawbacks: low thermal conductivity, high brittleness, a tendency to crack, short use cycle, limited resource of uranium-235 isotope, etc. [1-2]. This caused a slowdown in the development of nuclear energetics and led in recent years to abandon it in a number of countries.

Application of plutonium-239 and thorium-232 isotopes does not require expensive isotope enrichment and makes it possible to create ultra-small (up to 10 MW) and small (up to 100 MW) power plants in remote and inaccessible regions. These power plants can be used in mines and quarries. Therefore, a promising line is the creation of dispersive nuclear fuel in the form of fuel oxide compositions that include fissile metal oxides (plutonium, thorium) distributed in a matrix with high thermal conductivity and low neutron absorption.

Dispersive nuclear fuel is characterized by the absence of direct contacts between fuel particles due to their uniform distribution in the matrix and has the following advantages [2-9]: high thermal conductivity and mechanical properties, high burnup of fissile materials, radiation resistance and strength, localization of fission products in the fuel, etc. Due to its advantages, dispersive nuclear fuel can be used in a nuclear reactor for a long time.

Methods for producing dispersed powders for nuclear fuel

Sol-gel process

The sol-gel process is a technology for producing dispersed particles with the conversion of colloidal system at one of the stages of the process. This method is used for the fabrication of metal oxides, especially silicon (Si) and titanium (Ti) oxides. The process involves the conversion of monomers into a colloidal solution (sol), which is a precursor for the gel. Sol is a stable suspension of colloidal particles in a liquid. The gel is a porous three-dimensional continuous network that surrounds

and supports a continuous liquid phase. As a rule, the gel is formed by covalent bonds between sols of particles. The process of gel formation is shown in figure 1.

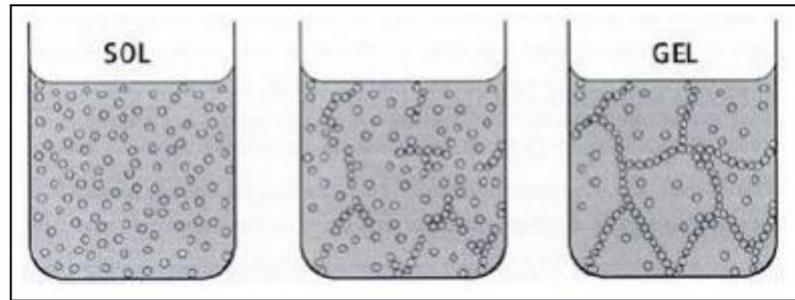


Figure 1. The process of gel formation from a colloidal solution

Stages of obtaining nanopowders using the sol-gel method:

- obtaining solutions of source materials;
- obtaining sol (hydrolysis of salts or acloxides, deposition);
- conversion of sol into gel (drying process, the use of miscible and immiscible organic liquids);
 - workpiece formation;
 - chemical drying, controlled drying;
 - sintering of the workpiece [10].

The sol gradually transforms into a gel-like two-phase system containing both a liquid phase and a solid phase. The morphology of the system varies from discrete particles to continuous polymer networks. The volume fraction of colloid particles may be so low, therefore it is necessary to remove a significant amount of liquid to improve the gel-like properties. There are several ways to achieve these properties. However, the simplest method is to allow the particles of the dispersed phase to settle in the liquid or gas phases under the influence of a gravitational field or centrifugal forces. The remaining liquid must be drained off. It is possible to accelerate the phase separation process using centrifugation.

The drying process is necessary to remove the remaining liquid phase. This process significantly contributes to shrinkage and densification of particles. The rate of liquid removal is ultimately determined by the gel porosity.

Further heat treatment (roasting) is required in order to promote polycondensation, to improve mechanical properties and structural stability. Final sintering, densification and grain growth are obtained through heat treatment.

The sol-gel process is a cheap and low-temperature method that allows you to control the chemical composition of the product. Even small amounts of dope additives, such as rare-earths elements and organic dyes, can be added into the sol and, as a result, equally dispersed throughout the final product. Materials obtained by sol-gel are used in optics, electronics, electrical energy industry, space, medicine (for instance, controlled release pharmacologic agent), chromatography.

Plasma-chemical synthesis

Plasma-chemical synthesis is based on thermal decomposition, denitration of aqueous solutions of metal salts and subsequent conversion to oxide powders in a plasma flow. The essence of the plasma-chemical method lies in the fact that the dispersed solution flow is mixed with the plasma flow [11]. The scheme for processing solutions in a plasma-chemical reactor (figure 2) includes the following stages:

- mixing solution drops with a high-temperature gas (plasma) to the evaporation temperature;
- solvent evaporation;
- heating, thermal decomposition of dissolved substances with the formation of the target product;
- quenching of reaction products.

Such staging is conditional, as part of the processes proceeds independently of each other. Sprayed solution by a spray nozzle is fed into the mixing zone 1 of the reactor (figure 2), where it is mixed with plasma jets. As a result of intercomponent heat exchange in zone 2, the solution drops are heated to the boiling point by the plasma and the solvent is removed from the solution. In zone 3, the dehydrated salt is heated to the temperature of the onset of thermal decomposition, then the salt

decomposes to oxides. The temperature of the generated particles is close to the temperature of the gas flow. A two-phase flow containing the target products in the form of solid particles distributed in the gas phase is removed from the reactor. If it is necessary, the flow is quenched in zone 4. Further, the system is fed to separation and purification.

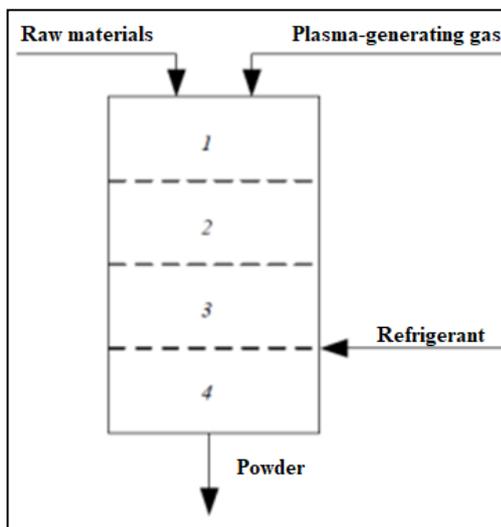


Figure 2. The scheme of the solution processing in a plasma-chemical reactor

The process of plasma-chemical synthesis of dispersed oxides is a multistage and includes:

- spraying a liquid precursor with the formation of polydisperse drops in the reactor volume;
- movement of drops in a gaseous heat-exchange flow;
- heating and evaporation of drops, which is accompanied by diffusion and crystallization of a metal salt in the drop volume;
- thermolysis of the salt with the formation of a microporous structure of the metal oxide;
- sintering this structure with the formation of a solid particle of a specific morphology [12].

The advantages of plasma-chemical synthesis of metal-oxide compounds from optimal water-organic nitrate solutions include [9]: low specific energy consumption, one-step process, high speed process, homogeneous distribution of phases with a

given stoichiometric composition, the ability to actively influence on the size and morphology of particles.

The main properties of plutonium oxides

Plutonium forms three oxides, such as PuO, Pu₂O₃ and PuO₂.

Plutonium monoxide PuO is a black crystal with a metallic sheen and face-centered cubic lattice. The density of plutonium monoxide equals 13,9 g/cm³. This compound is rapidly oxidized in air, exhibits pyrophoricity and it is readily soluble in HCl.

Plutonium monoxide is obtained by reducing plutonium dioxide with barium at 1250 °C. An oxide film is also formed by heating plutonium metal to 300 °C in vacuum (~10⁻⁴ mm Hg).

Pu₂O₃ has two crystalline modification: α-Pu₂O₃ (hexagonal lattice) and β-Pu₂O₃ (cubic lattice). The densities of the modifications are 11,47 and 10,2 g/cm³ for α and β respectively. The melting point of the substance is 2085 °C.

There are two techniques for producing Pu₂O₃:

- calcination of PuO₂ on tantalum or iridium fiber at 1800 °C (thermal dissociation of PuO₂);
- reduction of PuO₂ with metallic plutonium at 1500 °C followed by vacuum distillation of excess metallic plutonium.

Pu₂O₃ is pyrophoric in air at 1900 °C. It takes several days for coarse-crystalline Pu₂O₃ to oxidize in air to plutonium dioxide PuO₂.

Plutonium dioxide PuO₂ is the most important plutonium oxide. Plutonium dioxide is used in mixed oxide (MOX) fuel for nuclear reactors. Depending on the production method, it may have a yellow-green or brown color.

PuO₂ has face-centered cubic lattice. The density of plutonium dioxide equals 11,46 g/cm³. The melting point is 2400 °C.

Dioxide is the most stable plutonium oxide. It can be obtained by calcining virtually any plutonium salt, regardless of plutonium oxidation rate in the starting compounds (peroxide, nitrate, oxalate, etc).

Besides, PuO_2 is formed by burning plutonium or calcining its lower oxides, hydride, nitride, and carbides.

Attempts to obtain higher plutonium oxides by heating PuO_2 at 400 °C and an oxygen pressure of 70 atm. or by calcining in a stream of ozone at 800 °C did not succeed.

PuO_2 decomposes to Pu_2O_3 in high vacuum (10^{-6} mm Hg) at temperatures above 1500 °C.

As well as ThO_2 and UO_2 , plutonium dioxide is not reduced by hydrogen to metal, and it is also difficult to dissolve in hot acids. Calcined PuO_2 (at temperatures above 500 °C) is chemically more inert and almost insoluble in acids. One of the best solvents is 85–100% H_3PO_4 at 200 °C [13].

The main properties of thorium dioxide

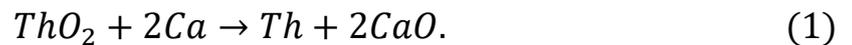
Thorium dioxide is one of the most important compounds in thorium technology. Thorium dioxide is a white powder with a density of 9,7 g/cm³. The melting point is 3050 °C. The boiling point is approximately 4000 °C.

Thorium dioxide can be obtained by calcining thermally unstable thorium compounds (hydroxide $\text{Th}(\text{OH})_4$, peroxide Th_2O_7 , nitrate $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$, etc), as well as by burning metal thorium in air (~1000 °C).

Depending on the temperature of the preparation, thorium dioxide may be crystalline or amorphous. Amorphous one is obtained by calcining a hydroxide or peroxide at 350–400 °C, however, crystalline one can be obtained at higher temperatures. The chemical activity of the compound depends on the calcination temperature. If thorium dioxide is obtained at temperatures below 550–600 °C, it is readily soluble in acids. If it is calcined at higher temperatures, ThO_2 dissolves much more difficult. The reason for this effect is a more perfect crystal lattice.

Active thorium oxide can be obtained by pyrohydrolysis (in superheated water steam) of chloride and nitrate at 700 °C, sulfate at 800 °C, tetrafluoride at 1000 °C. The decomposition of oxalate at 600 °C produces the most chemically active thorium oxide.

Thorium dioxide finds practical application mainly in the manufacture of high-quality ceramics, due to the fact that it does not deteriorate upon contact with aggressive molten metals (including with uranium and plutonium). It is also used for metallothermic production of metal thorium:



Thorium dioxide is isomorphic with UO₂, PuO₂. As compositions with them, it is indispensable in the manufacture of MOX fuel for the reproduction of uranium-233 [13].

Methods for producing magnesium oxide for a dispersive fuel matrix

Table 1 shows the thermal neutron absorption cross sections. For magnesium, this value is $7,0 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^{-2}$. This means that this material will not absorb neutrons to the extent that prevents the required operation of dispersive nuclear fuel with a matrix in the form of magnesium oxide.

Table 1. The thermal neutron absorption cross sections

Element	Neutron absorption cross section, 10^{-24} cm^{-2}
Carbon	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Nitrogen	1,9
Oxygen	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Magnesium	$7,0 \cdot 10^{-2}$
Aluminum	0,24
Zirconium	0,18
Silicon	0,16
Beryllium	$10 \cdot 10^{-2}$

The melting point of magnesium oxide is 2852 °C, which is a good indicator, as this parameter is very close to the melting point of uranium dioxide [14].

There are "dry" and "wet" methods for the production of magnesium oxide. The first method includes production from magnesite, the second one involves the production of magnesium oxide from magnesium chloride (bischofite). Both methods are implemented on an industrial scale in the Russian Federation. Raw materials for the "dry" production method are mined in open pits or in underground mines. After mining the magnesite pieces are crushed and primary processed using equipment for grinding and fractionation. Heavy slurry of cuttings is used to prepare magnesite. The raw material may have various impurities, so it is washed. Magnetic separation is used in order to get rid of iron compounds.

Some well-known industrial methods for producing magnesium oxide are based on deposition of sparingly soluble hydroxide using alkaline reagents and subsequent roasting to a state of magnesium oxide. The main and most affordable reagent is calcium hydroxide. The main difficulty of magnesium hydroxide deposition and its separation from the solution is obtaining a precipitate in colloidal dispersive form. Another problem is the difficulty of obtaining a pure product that does not contain impurities of iron, manganese, non-ferrous metals, boron and other compounds.

There is also another way to obtain pure magnesium oxide. It consists in the precipitation of magnesium hydroxide from seawater using sodium hydroxide as a precipitant. The disadvantage of this method is the high cost of the reagent, which is added to the precursor solution in excess [14].

Conclusion

In this paper, a literature review of the methods for producing dispersed powders for nuclear fuel was carried out. The sol-gel process and plasma-chemical synthesis were considered. Both technologies are effective, but the plasma-chemical one is the most promising due to its advantages. The main properties of dispersive nuclear fuel materials such as magnesium oxide, thorium and plutonium dioxides are considered.

References

1. Weber C E 1959 Progress in Nuclear Energy, Ser. V (N.Y.: Met. And Fuels Meraux Hill);
2. Skorov D M, Bychkov Yu F and Dashkovskiy A M 1979 Reactor material science (Moscow: Atomizdat) p 344;
3. Samoylov A G, Kashtanov A I and Volkov V S 1965 Dispersive fuel elements of nuclear reactors (Moscow: Atomizdat) p 343;
4. Alekseev S V, Zaitsev V A and Tolstukhov S S 2015 Dispersion Nuclear Fuel (Moscow: Technosphere) p 248;
5. Gorsky V V 2000 Nuclear fuel with inert matrix (IMF). Atomic Technique Abroad [in Russian – Atomnaya tekhnika za rubezhom] 10 3;
6. Degeueldre C and Paratte J M 1999 Concepts for an Inert Matrix Fuel, an Overview. J. Nucl. Mater. 274 1;
7. Strategic Planning for Research Reactors 2001 (IAEA – TECDOC-1212, IAEA, Vienna);
8. Current Status of Neutron Capture Therapy 2001 (IAEA – TECDOC-1223, IAEA, Vienna);
9. Plasmachemical synthesis and evaluation of the thermal conductivity of metal-oxide compounds for prospective nuclear fuel [Electronic resource] / I. V. Shamanin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series . — 2019 . — Vol. 1145 : Prospects of Fundamental Sciences Development (PFSD-2018) . — [012057, 18 p.] . — Title screen. — [References: 18 tit.];
10. H. Fect, in Nanomaterials: synthesis, properties and applications, A.S. Edelstein, R.C. Cammaratra (Eds.), Taylor & Francis, Washington, 1996;
11. Tumanov Yu N 2003 Plasma and high-frequency processes of obtaining and processing materials in the nuclear fuel cycle: the present and the future (Moscow: Fizmatlit) p 760;

12. Karengin A A, Karengin A G and Vlasov V A 2015 Kinetic model of evaporation of droplets dispersed in aqueous-organic compositions in an air-plasma flow. *Rus. Phys. J.* 58, 730;
13. Zherin I.I., Amelina G.N. *Chemistry of thorium, uranium, plutonium.* Tomsk: TPU, 2010.—147 p.
14. Magnesium. Endensson M.A. Publishing house "Metallurgy", 1969, 352 p.

Приложение Б

Таблица Б1 – Результаты расчетов низшей теплотворной способности ВОНР на основе ацетона, необходимые для получения ОК «PuO₂–ThO₂–MgO»

Состав ОК	№	Состав раствора ВОНР					Q _н ^p , МДж/кг
		PuO ₂ (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O, % масс	Th(NO ₃) ₄ ·6H ₂ O, % масс	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O, % масс	H ₂ O, % масс	C ₃ H ₆ O, % масс	
ОК-1 «50 % (5 % PuO ₂ +45 % ThO ₂)-50 % MgO»	ВОНР-1	0,908	9,801	31,292	28	30	8,762
ОК-2 «55 % (5,5 % PuO ₂ +49,5 % ThO ₂)-45 % MgO»	ВОНР-2	1,050	11,337	29,614	28	30	8,762
ОК-3 «60 % (6 % PuO ₂ +54 % ThO ₂)-40 % MgO»	ВОНР-3	1,207	13,039	27,754	28	30	8,762
ОК-4 «65 % (6,5 % PuO ₂ +58,5 % ThO ₂)-35 % MgO»	ВОНР-4	1,383	14,937	25,680	28	30	8,762
ОК-5 «70 % (7 % PuO ₂ +63 % ThO ₂)-30 % MgO»	ВОНР-5	1,580	17,067	23,353	28	30	8,762
ОК-6 «75 % (7,5 % PuO ₂ +67,5 % ThO ₂)-25 % MgO»	ВОНР-6	1,803	19,473	20,724	28	30	8,762
ОК-7 «80 % (8 % PuO ₂ +72 % ThO ₂)-20 % MgO»	ВОНР-7	2,057	22,213	17,730	28	30	8,762
ОК-8 «85 % (8,5 % PuO ₂ +76,5 % ThO ₂)-15 % MgO»	ВОНР-8	2,348	25,362	14,290	28	30	8,762
ОК-9 «90 % (9 % PuO ₂ +81 % ThO ₂)-10 % MgO»	ВОНР-9	2,687	29,019	10,294	28	30	8,762
ОК-10 «95 % (9,5 % PuO ₂ +85,5 % ThO ₂)-5 % MgO»	ВОНР-10	3,085	33,317	5,598	28	30	8,762

Приложение В

Таблица В1 – Результаты расчетов энергозатрат на получение из ВОНР на основе ацетона ОК «PuO₂–ThO₂–MgO»

Т, К	ОК-1 «50 % (5 % PuO ₂ +45 % ThO ₂)-50 % MgO»			ОК-2 «55 % (5,5 % PuO ₂ +49,5 % ThO ₂)-45 % MgO»			ОК-3 «60 % (6 % PuO ₂ +54 % ThO ₂)-40 % MgO»			ОК-4 «65 % (6,5 % PuO ₂ +58,5 % ThO ₂)-35 % MgO»		
	I _т , кДж/кг	Z _{ок} , масс. доли	Э _{уд} , МДж/кг	I _т , кДж/кг	Z _{ок} , масс. доли	Э _{уд} , МДж/кг	I _т , кДж/кг	Z _{ок} , масс. доли	Э _{уд} , МДж/кг	I _т , кДж/кг	Z _{ок} , масс. доли	Э _{уд} , МДж/кг
300	0	0,04706	0	0	0,04773	0	0	0,04847	0	0	0,0493	0
500	210	0,04706	4,46	230	0,04773	4,82	260	0,04847	5,36	280	0,0493	5,68
1000	920	0,03041	30,25	940	0,03197	29,4	970	0,0337	28,78	990	0,03563	27,79
1500	1670	0,03041	54,92	1690	0,03197	52,86	1710	0,0337	50,74	1730	0,03563	48,55
2000	2500	0,03039	82,26	2520	0,03195	78,87	2530	0,03368	75,12	2550	0,03561	71,61
2500	3870	0,02725	142,02	3880	0,02879	134,77	3890	0,03053	127,42	3900	0,03247	120,11
3000	6794,4	0,01103	615,99	6783,1	0,01317	515,04	6770,6	0,01555	435,41	6756,6	0,0182	371,24
	ОК-5 «70 % (7 % PuO ₂ +63 % ThO ₂)-30 % MgO»			ОК-6 «75 % (7,5 % PuO ₂ +67,5 % ThO ₂)-25 % MgO»			ОК-7 «80 % (8 % PuO ₂ +72 % ThO ₂)-20 % MgO»			ОК-8 «85 % (8,5 % PuO ₂ +76,5 % ThO ₂)-15 % MgO»		
300	0	0,05184	0	0	0,05292	0	0	0,05245	0	0	0,05382	0
500	250	0,05184	4,82	250	0,05292	4,72	240	0,05245	4,58	250	0,05382	4,65
1000	980	0,03901	25,12	970	0,04153	23,36	930	0,04302	21,62	930	0,04621	20,13
1500	1730	0,03901	44,35	1720	0,04153	41,42	1670	0,04302	38,82	1660	0,04621	35,92
2000	2540	0,03899	65,14	2520	0,04151	60,71	2470	0,04299	57,46	2460	0,04619	53,26
2500	3830	0,03577	107,07	3810	0,0383	99,48	3800	0,03989	95,26	3780	0,0431	87,7
3000	6685,9	0,02193	304,87	6627,8	0,0254	260,94	6553,2	0,02836	231,07	6490,1	0,03276	198,11
	ОК-9 «90 % (9 % PuO ₂ +81 % ThO ₂)-10 % MgO»			ОК-10 «95 % (9,5 % PuO ₂ +85,5 % ThO ₂)-5 % MgO»								
300	0	0,0554	0	0	0,05727	0						
500	240	0,0554	4,33	240	0,05727	4,19						
1000	920	0,04993	18,43	910	0,05429	16,76						
1500	1640	0,04993	32,85	1630	0,05429	30,02						
2000	2440	0,0499	48,9	2420	0,05426	44,6						
2500	3740	0,04684	79,85	3700	0,05122	72,24						
3000	6403,2	0,03787	169,08	6311,6	0,04387	143,87						

Приложение Г

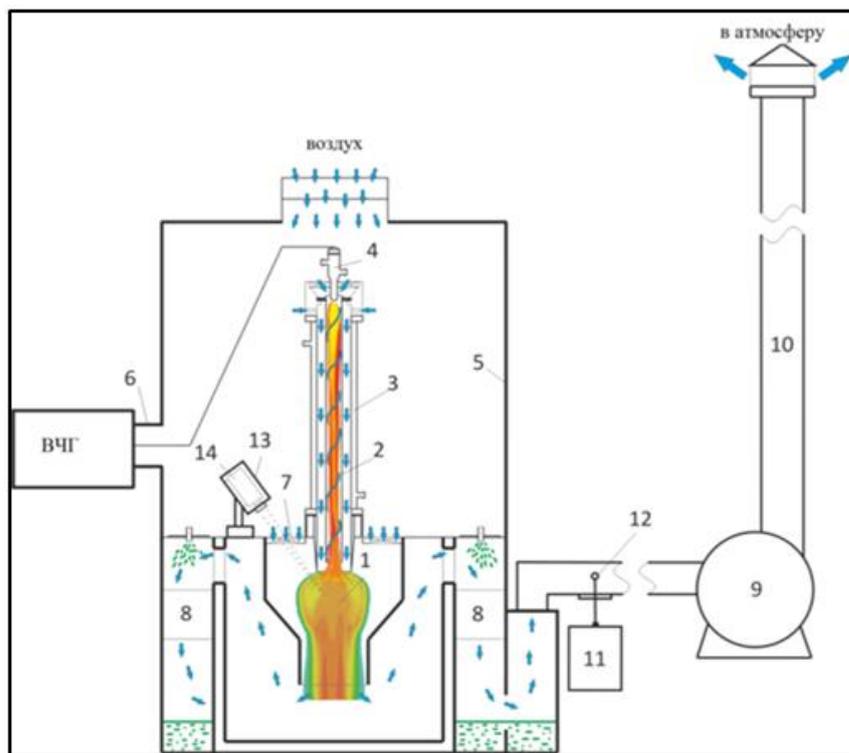


Рисунок Г1 – Лабораторный стенд «Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01»:

1 – диспергатор, 2 – ВЧФ-разряд, 3 – ВЧФ-плазмоторн; 4 – медный электрод, 5 – корпус; 6 – коаксиальный вывод; 7 – импеллер реактора; 8 – узел «мокрой» очистки отходящих газов; 9 – вытяжной вентилятор (ВР 12-26, №4), 10 – воздуховод, 11 – газоанализатор «Quintox» КМ 9106, 12 – пробоотборник; 13 – защитный кожух пирометра, 14 – пирометр IPE 140/45, ВЧГ – высокочастотный генератор ВЧГ8-60/13-01.

Приложение Д

Таблица Д1 – Результаты измерений расхода воздуха через газоход без узла ввода ПГ (трубка 50/300 мм)

№	S _{нмг}		P _{пг} , мБар							P _{пг}	V _{пг}	Q _{пг}		
	3x10	см ²	1	2	3	4	5	6	7	Па	м/с	м ³ /с	кг/с	м ³ /ч
1	3x10	1650	2,33	2,37	2,35	2,40	2,39	2,41	2,38	236,86	19,86	0,990	1,19	3575,02
2	3x8	1320	2,39	2,41	2,48	2,47	2,48	2,51	2,43	244,55	20,18	1,009	1,21	3632,60
3	3x6	990	2,09	2,14	2,00	2,16	2,10	2,09	2,10	209,09	18,66	0,933	1,12	3358,88
4	3x4	660	2,03	2,06	2,07	1,97	2,07	1,96	1,94	200,82	18,29	0,914	1,10	3291,86
1	3x10	1650	2,47	2,44	2,52	2,46	2,48	2,50	2,49	247,26	20,29	1,014	1,22	3652,64
2	3x8	1320	2,35	2,37	2,42	2,38	2,39	2,33	2,38	236,72	19,86	0,992	1,19	3573,94
3	3x6	990	2,15	2,25	2,12	2,24	2,28	2,29	2,24	221,76	19,22	0,961	1,15	3459,21
4	3x4	660	1,96	1,93	1,96	1,94	1,92	1,89	1,94	192,85	17,92	0,896	1,08	3225,83

Таблица Д2 – Результаты измерений расхода воздуха через ВЧФП без узла ввода ПГ (трубка 50/300 мм)

№	S _{имп}		P _{пг} , мБар							P _{пг}	V _{пг}	Q _{пг}		
	3x10	см ²	1	2	3	4	5	6	7	Па	м/с	м ³ /с	кг/с	м ³ /ч
1	3x10	1650	1,75	1,79	1,80	1,78	1,79	1,78	1,80	177,89	17,21	0,089	0,11	322,22
2	3x8	1320	2,11	2,12	2,19	2,10	2,20	2,11	2,14	213,22	18,84	0,097	0,12	352,76
3	3x6	990	2,83	2,78	2,81	2,83	2,80	2,79	2,80	279,73	21,58	0,112	0,13	404,05
4	3x4	660	3,62	3,56	3,6	3,57	3,56	3,61	3,58	357,50	24,40	0,126	0,15	456,78
1	3x10	1650	1,79	1,75	1,82	1,89	1,82	1,88	1,80	181,60	17,39	0,091	0,11	325,55
2	3x8	1320	2,15	2,19	2,15	2,10	2,09	2,12	2,17	213,22	18,84	0,098	0,12	352,76
3	3x6	990	2,33	2,37	2,35	2,42	2,41	2,37	2,41	237,29	19,88	0,103	0,12	372,14
4	3x4	660	3,31	3,35	3,31	3,37	3,29	3,35	3,32	331,86	23,51	0,122	0,15	440,09

Таблица ДЗ – Результаты измерений расхода воздуха через реактор

№	S _{имп}		Газоход			ВЧФП			T _{пг}	ρ	Q _p
	3xп	см ²	P _{ср} , мБар	P _{пг} , Па	Q, кг/с	P _{ср} , мБар	P _{пг} , Па	Q, кг/с	°C	кг/м ³	кг/с
1	3x10	1650	2,38	236,86	1,19	1,78	177,89	0,11	21	1,2009	1,09
2	3x8	1320	2,45	244,55	1,21	2,14	213,22	0,12			1,09
3	3x6	990	2,10	209,09	1,12	2,81	279,73	0,13			0,99
4	3x4	660	2,01	200,82	1,10	3,59	357,50	0,15			0,95
1	3x10	1650	2,48	247,26	1,22	1,82	181,60	0,11	21	1,2009	1,11
2	3x8	1320	2,37	236,72	1,19	2,14	213,22	0,12			1,07
3	3x6	990	2,22	221,76	1,15	2,38	237,29	0,12			1,03
4	3x4	660	1,93	192,85	1,08	3,33	331,86	0,15			0,93

Приложение Е

Таблица Е1 – Значения технологических параметров установки

№	I _а , А	I _с , А	U _а , кВ	P ₀ , кВт	T _{дг} , °С	S, см ²	ВЧФП					
							P _р , кВт	P _{ст} , кВт	Q _{пг} , кг/с	H, кДж/кг	T _{стр} , К	η, %
1	3	1,2	5,7	17,1	29,8	3x10	8,43	8,36	0,11	378,03	375	99,149
2	3	1,2	5,7	17,1	30,6	3x8	8,40	8,33	0,12	371,07	375	99,147
3	3	1,2	5,7	17,1	31,3	3x6	8,19	8,12	0,13	360,55	350	99,125
4	3	1,2	5,7	17,1	31,7	3x4	8,29	8,22	0,15	354,23	350	99,136
1	3,5	1,2	6,25	21,9	33,6	3x10	11,14	11,04	0,11	403,05	400	99,142
2	3,5	1,2	6,4	22,4	34,3	3x8	11,38	11,23	0,12	395,77	400	98,741
3	3,5	1,2	6,4	22,4	34,6	3x6	11,17	11,03	0,13	382,11	375	98,717
4	3,5	1,2	6,5	22,8	35,1	3x4	11,11	10,94	0,15	372,13	375	98,495
1	4	1,2	6,5	26,0	37,8	3x10	12,82	12,58	0,11	417,36	425	98,137
2	4	1,2	6,7	26,8	38,1	3x8	13,50	13,26	0,12	412,97	400	98,231
3	4	1,2	6,9	27,6	37,9	3x6	14,10	13,88	0,13	403,30	400	98,475
4	4	1,2	7,0	28,0	36,8	3x4	14,53	14,34	0,15	394,41	400	98,685

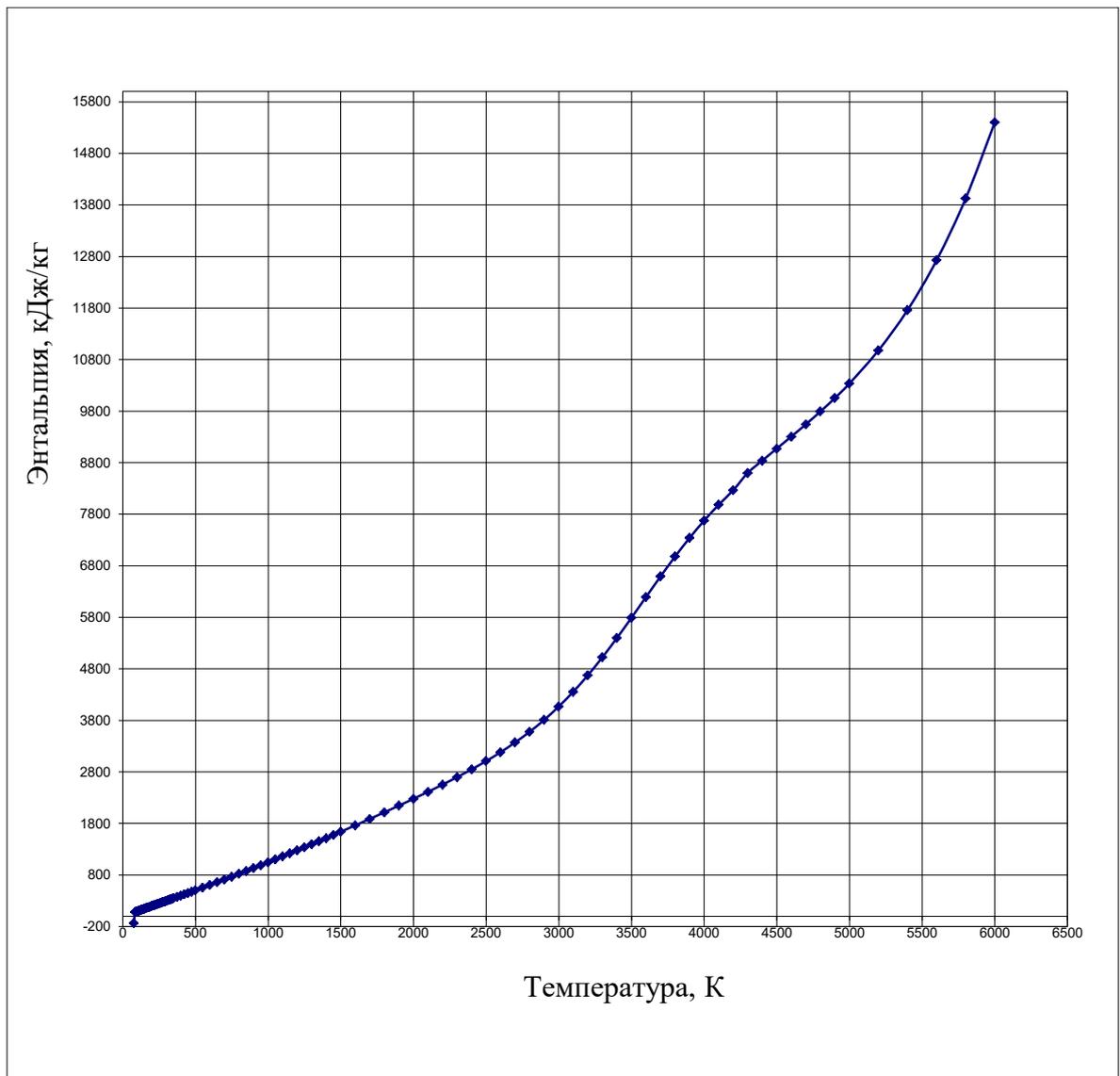


Рисунок Е1 – Зависимость энтальпии воздуха от его температуры

Приложение Ж

Таблица Ж1 – Состав и режимы переработки растворов ВОНР, физико-химические и технологические свойства полученных оксидных композиций, моделирующих в воздушно-плазменном потоке плазмохимического синтез оксидных композиций для плутоний-ториевого дисперсионного ядерного топлива

Оксидная композиция		Состав ВОНР					Режимы переработки ВОНР		Лазерная дифракция ОК	БЭТ-анализ ОК	
№	Состав ОК	№	Ce(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O, г/л	Sm(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O, г/л	Mg(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O, г/л	C ₃ H ₆ O, % масс.	f _Ф , Гц	Q _{отв} , кг/с	D ₅₀ , мкм	S, м ² /г	D _{бет} , нм
$\alpha = \text{Sm}_2\text{O}_3 / (\text{Sm}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3) = 0,1$											
1	81 % Ce ₂ O ₃ –9 % Sm ₂ O ₃ –10 % MgO	ВОНР-1	267,9	28,7	160,3	62,2	50	2,8	9,4	7,9	110
2	72 % Ce ₂ O ₃ –8 % Sm ₂ O ₃ –20 % MgO	ВОНР-2	238,1	25,5	320,5	60,2	50	2,8	9,9	11,2	86
3	63 % Ce ₂ O ₃ –7 % Sm ₂ O ₃ –30 % MgO	ВОНР-3	208,3	22,3	480,8	58,4	50	2,8	7,4	-	-
$\alpha = \text{Sm}_2\text{O}_3 / (\text{Sm}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3) = 0,2$											
4	72 % Ce ₂ O ₃ –18 % Sm ₂ O ₃ –10 % MgO	ВОНР-4	238,1	57,4	160,3	62,2	50	2,8	12,3	-	-
5	64 % Ce ₂ O ₃ –16 % Sm ₂ O ₃ –20 % MgO	ВОНР-5	211,6	51,0	320,5	60,3	50	2,8	9,8	-	-
6	56 % Ce ₂ O ₃ –14 % Sm ₂ O ₃ –30 % MgO	ВОНР-6	185,2	44,6	480,8	58,4	50	2,8	6,6	-	-
$\alpha = \text{Sm}_2\text{O}_3 / (\text{Sm}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3) = 0,3$											
7	63 % Ce ₂ O ₃ –27 % Sm ₂ O ₃ –10 % MgO	ВОНР-7	208,33	88,0	160,3	62,2	50	2,8	7,4	9,5	90
8	56 % Ce ₂ O ₃ –24 % Sm ₂ O ₃ –20 % MgO	ВОНР-8	185,18	76,5	320,5	60,3	50	2,8	7,5	11,9	80
9	49 % Ce ₂ O ₃ –21 % Sm ₂ O ₃ –30 % MgO	ВОНР-9	162,04	67,0	480,8	58,4	50	2,8	7,4	-	-

Приложение И

Таблица И1 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	Слабые стороны научно-исследовательского проекта:
	<p>С1. Низкая себестоимость плазмоподавляющих добавок.</p> <p>С2. Экономичное использование электроэнергии.</p> <p>С3. Компактность установки</p> <p>С4. Простота монтажа установки и эксплуатация.</p>	<p>Сл1. Незученность метода и сложности в его развитии.</p> <p>Сл2. Низкая актуальность исследований.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>В2. Усовершенствование установки.</p>	<p>Из данной комбинации видно, что существует возможность создания усовершенствованной и экономически выгодной установки по получению наноразмерных оксидных композиций.</p>	<p>В свою очередь неизученность метода, а также низкая актуальность может внести много трудностей при работе с установкой и разработке новых проектов.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие финансирования.</p> <p>У2. Отсутствие спроса на технологию.</p>	<p>Проведя анализ сильных сторон и угроз, видно, что вышеуказанные сильные стороны проекта могут существенно понизить процент угроз исследования.</p>	<p>Неизученность метода, сложность его развития и низкая актуальность могут привести к отсутствию финансирования и спроса на технологию производства.</p>

Таблица И2 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}	Длительность работ в календарных днях, T_{ki}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ожг}$, чел-дни			
Подбор и изучение материалов по теме	12	16	13,6	И	13,6	20
Выбор направления исследований	5	8	6,2	Р, И	3,1	5
Календарное планирование работ по теме	2	4	2,8	Р, И	1,4	2
Моделирование технологического процесса на ПК	20	25	22	И	22	33
Проведение экспериментальных исследований	25	30	27	Р, И	13,5	20
Анализ и обработка полученных результатов	11	15	12,6	Р, И	6,3	9
Оценка эффективности полученных результатов	7	12	9	Р, И	4,5	7
Оформление пояснительной записки	6	11	8	И	8	12
Подготовка к защите	5	10	7	И	7	10
Итого:			108,2		Р/И 28,8/79,4	118

Таблица И3 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	T _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				Январь			Февраль			Март			Апрель			Июнь	
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Подбор и изучение материалов по теме	Исполнитель	20		■	■											
2	Выбор направления исследований	Руководитель, исполнитель	5				▨										
3	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, исполнитель	2				▨										
4	Моделирование технологического процесса на ПК	Руководитель, исполнитель	33					▨	▨								
5	Проведение экспериментальных исследований	Руководитель, исполнитель	20								▨	▨					
6	Анализ и обработка полученных результатов	Руководитель, исполнитель	9										▨	■			
7	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, исполнитель	7											▨	■		
8	Оформление пояснительной записки	Исполнитель	12												■	■	
9	Подготовка к защите	Исполнитель	10													■	

▨ – руководитель

■ – исполнитель