

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

Институт Физико-технический
Направление подготовки Ядерные физика и технологии
Кафедра Техническая физика

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Плазмохимический синтез и исследование гомогенных оксидных композиций для ториевого ядерного топлива

УДК 533.9

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Б	Перминов Сергей Викторович		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. ТФ ФТИ	Шаманин И.В.	д.ф.-м.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения
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 образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический
Направление подготовки Ядерные физика и технологии
Кафедра Техническая физика

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

_____ И.В. Шаманин

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ4Б	Перминов Сергей Викторович

Тема работы:

Плазмохимический синтез и исследование гомогенных оксидных композиций для ториевого ядерного топлива

Утверждена приказом директора ФТИ

№791/с от 04.02.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

Исследовать процесс получения гомогенных оксидных композиций на основе нитратных растворов урана и тория в воздушной плазме в виде горючих водно-солеорганических композиций (ВСОК). Определить оптимальные режимы переработки ВСОК, обеспечивающие энергоэффективность и экологическую безопасность исследуемого процесса получения гомогенных оксидных композиций на основе нитратных растворов урана и тория.

<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 и анализ методов получения оксидного ядерного топлива, в том числе, на основе смесевых нитратных растворов урана и тория. 2. Расчет показателей горения ВСОК на основе смесевых нитратных растворов урана и тория. Определение оптимальных составов ВСОК. 3. Термодинамическое моделирование процесса плазменной переработки смесевых нитратных растворов урана и тория в виде горючих ВСОК. Определение оптимальных режимов их переработки в воздушной плазме. 4. Экспериментальные исследования и оптимизация режимов работы плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона. Экспериментальное подтверждение рекомендованных режимов для разрабатываемого процесса плазменной переработки смесевых нитратных растворов урана и тория в воздушной плазме. 5. Экономическое обоснование проведения НИР. <p>Выводы по работе. Заключение</p>
--	--

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Доцент кафедры «Менеджмент» М.В. Верховская</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Ассистент кафедры «Прикладная физика» Т.С. Гоголева</p>

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

<p>Группа</p>	<p>ФИО</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>0АМ4Б</p>	<p>Перминов Сергей Викторович</p>		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ4Б	Перминов Сергей Викторович

Институт	Физико-технический	Кафедра	ТФ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Изотопные материалы и технологии

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

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

<p>1. Оценочная карта конкурентных технических решений</p> <p>2. Матрица SWOT</p> <p>3. Иерархическая структура работ</p> <p>4. Календарный план проекта</p> <p>5. Бюджет проекта</p> <p>6. Определение ресурсоэффективности проекта</p>	
--	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Б	Перминов Сергей Викторович		

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	9
ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	10
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	11
ВВЕДЕНИЕ.....	12
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	14
1.1 Ядерное оксидное топливо.....	14
1.1.1 Диоксид урана	14
1.1.2 Диоксид тория	16
1.1.3 Уран-ториевое ядерное топливо.....	16
1.1.4 Критерии оценки качества ядерного топлива.....	19
1.1.4.1 Химический состав	19
1.1.4.2 Физико-химические свойства	20
1.1.4.3 Технологические свойства	22
1.2 Способы получения оксидов урана.....	23
1.2.1 АДУ-процесс	23
1.2.2 АУК-процесс	25
1.2.3 Свойства порошков диоксида урана	26
1.3 Способы получения оксидов тория.....	26
1.3.1 Метод термического разложения	27
1.3.2 Плазменный метод.....	28
1.4 Способы получения оксидных композиций урана и тория	32
1.4.1 Спекание порошков оксидных композиций урана и тория	32
1.4.2 Прокалка солей урана и тория.....	33
1.4.2.1 Микроволновая технология производства уран-ториевых композиций	35
1.4.3 Плазменная технология получения оксидного уран-ториевого топлива.. ..	38
1.5 Прессование.....	42
1.6 Спекание	42
2 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ	44
2.1 Моделирование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций урана и тория	46

2.1.1	Расчёт показателей горения водно-органических композиций на основе нитратных растворов урана и тория	46
2.1.2	Расчёт равновесных составов продуктов плазменной переработки водно-органических композиций на основе смесевых нитратных растворов урана и тория	49
2.1.3	Оценка удельных энергозатрат на процесс плазменной переработки смесевых нитратных растворов урана и тория	58
2.2	Обсуждение результатов	59
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	61
3.1	Описание плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона	61
3.2	Определение расходов воздушного теплоносителя через ВЧФ-плазмотрон и газоход.....	62
3.3	Определение расходов воздушного теплоносителя через реактор.....	64
3.4	Исследование режимов работы плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона	65
3.5	Плазмохимическая переработка модельных ВСОК.....	68
4	ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	73
4.1	Потенциальные потребители результатов исследования	73
4.1.1	SWOT – анализ.....	74
4.2	Планирование управления научно-техническим проектом	76
4.2.1	Структура работ в рамках научного исследования	76
4.2.2	Контрольные события проекта.....	78
4.2.3	План проекта.....	78
4.3	Бюджет научного исследования.....	79
4.3.1	Расчет материальных затрат	79
4.3.2	Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	81
4.3.3	Основная заработная плата исполнителей темы	82
4.3.4	Дополнительная заработная плата	83
4.3.5	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	84
4.3.6	Накладные расходы	84
4.3.7	Контрагентные расходы	85
4.3.8	Формирование бюджета затрат исследовательского проекта.....	85
4.4	Организационная структура проекта	86
4.5	Матрица ответственности	87

4.6	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	88
5	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	91
5.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	91
5.2	Требования безопасности при выполнении работ с использованием персональных электронно-вычислительных машин	93
5.2.1	Организационные мероприятия	93
5.2.2	Условия труда.....	93
5.2.3	Технические мероприятия	95
5.3	Требования безопасности при выполнении работ в химических лабораториях.....	96
5.3.1	Общие требования	96
5.3.2	Характеристика вредных веществ.....	97
5.3.3	Действия работников при аварийных ситуациях	99
5.3.4	Оказание первой доврачебной помощи.....	100
5.4	Электробезопасность	101
5.4.1	Оказание первой доврачебной помощи.....	102
5.5	Пожарная и взрывная безопасность.....	103
	ВЫВОДЫ.....	105
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
	СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	107
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	108
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	111
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	126
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	139

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 110 страниц, 32 рисунка, 33 таблицы, 31 источник, 3 приложения.

Ключевые слова: высокочастотный факельный разряд, плазма, высокочастотный факельный плазмотрон, плазмохимический синтез, оксид урана, оксид тория, ториевое ядерное топливо.

Объектом исследования является процесс плазмохимического синтеза оксидных композиций урана и тория для ториевого ядерного топлива.

Цель работы – исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций урана и тория из смесевых нитратных растворов (СНР) в воздушной плазме в виде диспергированных водно-солеорганических композиций (ВСОК)

В процессе исследований проводились: расчет показателей горения различных по составу ВСОК на основе СНР; термодинамические расчеты процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций урана и тория из ВСОК в воздушной плазме; измерение теплофизических и газодинамических параметров воздушно-плазменного потока при работе плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона.

В результате исследования: определены оптимальные составы ВСОК и режимы, обеспечивающие их экологически безопасную и энергоэффективную плазменную обработку. Впервые экспериментально подтверждена на модельных СНР возможность и эффективность процесса прямого плазмохимического синтеза гомогенных оксидных композиций урана и тория из диспергированных ВСОК в воздушно-плазменном потоке.

Область применения: результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы для создания энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза гомогенных оксидных композиций для ториевого ядерного топлива.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Плазма – частично или полностью ионизированный газ, образованный из нейтральных атомов (или молекул) и заряженных частиц (ионов и электронов).

ВЧФ-плазмотрон – устройство для генерирования потоков воздушной неравновесной плазмы.

Температура вспышки – наименьшая температура летучего конденсированного вещества, при которой пары над поверхностью вещества способны вспыхивать в воздухе под воздействием источника зажигания, однако, устойчивое горение после удаления источника зажигания не возникает.

Температура воспламенения – наименьшая температура вещества, при которой пары над поверхностью горючего вещества выделяются с такой скоростью, что при воздействии на них источника зажигания наблюдается воспламенение.

Температура самовоспламенения – наименьшая температура горючего вещества, при нагреве до которой происходит резкое увеличение скорости реакций, приводящее к возникновению пламенного горения или взрыва.

Адиабатическая температура горения – это температура полного сгорания смесей любого состава при отсутствии тепловых потерь в окружающую среду.

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

МОКС-топливо – ядерное топливо, содержащее несколько видов оксидов делящихся материалов.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВЧФ–разряд – высокочастотный факельный разряд.

ВЧФ–плазмотрон – высокочастотный факельный плазмотрон.

ВЧГ – высокочастотный генератор.

ВСК – водно-солевая композиция.

ВСОК – водно-солеорганическая композиция.

СНР – смесевой нитратный раствор.

ЯТ – ядерное топливо.

ЯТЦ – ядерно-топливный цикл.

АЭС – атомная электростанция.

ТП – теоретическая плотность

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент

СБЭ – суммарный борный эквивалент.

ВВЕДЕНИЕ

Динамичное развитие человечества требует постоянного увеличения энергетических мощностей, обеспечивающих нужды науки, производства и многих других сфер человеческой жизни, поэтому в настоящее время активно изучаются пути увеличения выработки различных видов энергии.

В структуре мирового производства электроэнергии более 2/3 долей составляет генерация только на ТЭС [1]. Доля атомной энергетики не столь велика, однако создание энергетики будущего не представляется возможным без использования энергии деления ядер.

На сегодняшний день, на большинстве ядерных реакторов в качестве ядерного топлива используется уран, активно проводятся работы по вовлечению в ЯТЦ плутония в составе МОХ-топлива, но использование в качестве ЯТ только урана и плутония ограничивает возможности развития и распространения атомной энергетики. Связано это с тем, что мировые разведанные запасы природного урана не способны обеспечить ядерным горючим все возрастающее число энергоблоков АЭС в долгосрочной перспективе, что ставит вопрос о необходимости расширения сырьевой базы для ядерной энергетики [2]. Это осуществимо при вовлечении в ЯТЦ тория.

Использование тория в качестве ЯТ поможет попутно решать такие задачи как создание малогабаритной мобильной энергетической установки, упрощение обеспечения режима нераспространения и др. Торий, благодаря высокой температуре плавления, может быть использован в качестве ЯТ для высокотемпературных газоохлаждаемых ядерных реакторов, перспективных для неэлектрического применения и водородной энергетики.

Приоритетной задачей при создании ториевого ЯТЦ является его удешевление. Одним из способов удешевления ЯТЦ является снижение себестоимости производства топлива, в частности, стоимости получения порошков и спекания топливных таблеток. Добиться этого можно путем увеличения удельной поверхности порошков, а значит уменьшения

температуры спекания, улучшения самой спекаемости.

Плазменная технология получения оксидов металлов дает возможность получать гомогенные композиции заданного стехиометрического состава во всем объеме порошка и при этом влиять на морфологию частиц.

Целью выпускной квалификационной работы является исследование процесса плазмохимического синтеза высокодисперсных гомогенных оксидных композиций урана и тория в воздушной плазме из диспергированных водно-солеорганических композиций.

Новизна исследования состоит в использовании вместо смесевых нитратных растворов водно-солеорганических композиций на их основе, обеспечивающих прямой плазмохимический синтез в воздушно-плазменном потоке высокодисперсных гомогенных оксидных композиций урана и тория.

Практическая значимость результатов исследований связана с повышением энергоэффективности процесса плазмохимического синтеза гомогенных оксидных композиций для ториевого ядерного топлива.

Результаты научной работы получены при личном участии автора в теоретических и экспериментальных исследованиях. Апробация результатов исследований проводилась на научных конференциях.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Ядерное оксидное топливо

Основными преимуществами использования оксидного керамического уранового топлива вместо металлического, являются [3]:

- возможность эксплуатации топливных сборок АЭС на более высокотемпературных режимах, благодаря значительно более высоким температурам плавления керамики;
- хорошая температурная стойкость благодаря отсутствию фазовых превращений на низких температурах;
- высокая коррозионная стойкость, стойкость к взаимодействию с теплоносителем благодаря совместимости с материалами оболочек и относительной химической инертности.

Однако термодинамической устойчивостью обладают лишь оксиды ThO_2 , PuO_2 и UO_2 , а остальные соединения могут вступать в реакцию с кислородом и парами воды.

По этим и ряду других причин, широкое мировое распространение, для изготовления тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), получили диоксид урана (UO_2) и диоксид плутония (PuO_2).

Исследование ториевого топливного цикла также проводится, в основном, в области керамического топлива на основе диоксида тория. Повышенный интерес к ЯТ на основе диоксида тория вызван его высокой температурой плавления, хорошей теплопроводностью, устойчивостью в окислительной среде и другими важными теплофизическими свойствами.

1.1.1 Диоксид урана

Диоксид урана, в настоящее время, является наиболее распространенным химическим соединением, которое используется для создания ядерного топлива для легководных и тяжеловодных ядерных реакторов.

Помимо уже отмеченного свойства термодинамической стабильности, диоксид урана также обладает хорошей совместимостью с широко используемыми материалами оболочек ТВЭЛов, размерной стабильностью при облучении, высокой температурой плавления и простотой получения [4].

Диоксид урана имеет гранецентрированную кубическую решетку типа CaF_2 . Ионы урана располагаются по углам и граням решетки, а ионы кислорода находятся в тетраэдрических позициях. Параметр ячейки 0,546 нм. Графическое представление решетки UO_2 представлено на рисунке 1.1.

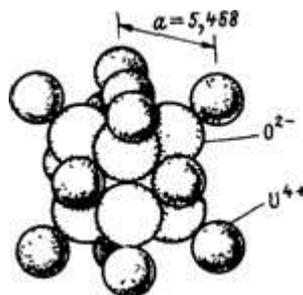


Рисунок 1.1 – Графическое представление решетки UO_2

Принятая теоретическая плотность (ТП) UO_2 составляет $10,96 \text{ г/см}^3$ [3, 5]. Температура плавления составляет $\sim 3000^\circ\text{C}$.

Фактическая плотность оксидного топлива может колебаться в пределах 80 — 95% ТП (от $8,768$ до $10,412 \text{ г/см}^3$) в зависимости главным образом от размера и кристаллической формы частиц порошка и метода порошковой металлургии, используемого при производстве топлива [3][6].

Важными тепло физическими свойствами UO_2 являются термическое расширение, теплоемкость и теплопроводность, поскольку эти параметры необходимы для проектирования ядерных реакторов (легководных и тяжеловодных энергетических реакторов).

Теплопроводность увеличивается с ростом плотности, но падает с ростом температуры. Понижение теплопроводности с ростом температуры представляет собой отрицательную характеристику работоспособности оксидного топлива в ТВЭЛах ядерных реакторов.

1.1.2 Диоксид тория

Диоксид тория имеет гранцентрированную кубическую решетку типа CaF₂. Период кристаллической решетки ThO₂ равен 0,55974 при 300 К. Теоретическая плотность ThO₂, рассчитанная из данных периода кристаллической решетки, равна 10,00 г/см³ [2]. Температура плавления составляет ~3500°С.

Диоксид тория, по сравнению с ураном характеризуется более высокой теплопроводностью и низким коэффициентом термического расширения.

Таблица 1.1 – Теплопроводность ThO₂

Температура, К	Литературный источник		
	1	2	3
373	10,26	8,54(9,21)	12,5-13,2
673	5,99	4,98	5,1 **
1073	3,41	2,85	
1273	-	(2,93)	2,6**
1473	2,51	2,09	
1673	2,45	2,05	2,45**

Примечание. Пористость 0-25% (1), пористость 16% (2), (пористость 3-7%), * - пористость 1,5%, ** - пористость 9,5-20,1 %.

Такая повышенная стойкость ThO₂ обеспечивает высокую степень выгорания (~100 МВт·сут/т) и допускает высокотемпературные режимы работы реактора [2].

Данные показывают, что температура и пористость оказывают значительное влияние на теплопроводность.

Природный торий не содержит делящихся изотопов, поэтому работа реактора только на тории не может быть реализована. Для достижения критичности, в начальный период времени требуется использовать U²³⁵ или Pu²³⁹.

1.1.3 Уран-ториевое ядерное топливо

Данные о теплоемкости $(\text{Th,U})\text{O}_2$ достаточно хорошо соответствуют средневзвешенным значениям $C_p(T)$ для ThO_2 и UO_2 [2].

Температура плавления $(\text{Th,U})\text{O}_2$ соответствует температурам плавления идеальных твердых растворов.

Таблица 1.2 – Температура плавления и фазового превращения UO_2 , ThO_2 , $(\text{Th,U})\text{O}_2$

Композиция	Температура плавления (T_m), К	Температура фазового превращения (T_f), К	T_f/T_m
UO_2	3120	2670	0,86
$(\text{Th}_{0,70}\text{U}_{0,30})\text{O}_2$	3460	2900	0,84
$(\text{Th}_{0,70}\text{U}_{0,30})\text{O}_2$	3550	2950	0,83
$(\text{Th}_{0,70}\text{U}_{0,30})\text{O}_2$	3590	2850	0,79
ThO_2	3640	2950	0,81

Исходя из идеальности твердых растворов $(\text{Th,U})\text{O}_2$ можно рассматривать изменение их свойств в зависимости от состава, подчиняющееся закону аддитивности. В таблице 1.3 приведены данные о физических свойствах диоксида урана и диоксида тория.

Таблица 1.3 – Физические свойства диоксида урана и диоксида тория UO_2 , ThO_2

Свойство	ThO_2	UO_2
Кристаллическая структура	ГЦК(CaF_2)	ГЦК(CaF_2)
Параметр решетки, нм	0,5597	0,54702
Температура плавления	3643	3123
Плотность, г/см^3	10,00	10,96
Стандартная энтальпия образования, Дж/Моль	-1226,4	-1085,0
Стандартная энтропия, Дж/Моль*К	65,23	77,03
Теплопроводность, Вт/(м·К)		
при 773 К	6,80	4,8
при 1773 К	2,40	2,4
Коэффициент линейного расширения (298-1223 К), К^{-1}	$9,67 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$

Теплопроводность твердых растворов $(Th,U)O_2$ при низких температурах зависит от содержания UO_2 в твердом растворе. С ростом температуры отмечается значительное уменьшение теплопроводности $(Th,U)O_2$ и влияния на теплопроводность содержания UO_2 (рисунок 1.2). Зависимость теплопроводности имеет минимум в интервале 0,4÷0,8 мольных долей UO_2 [2].

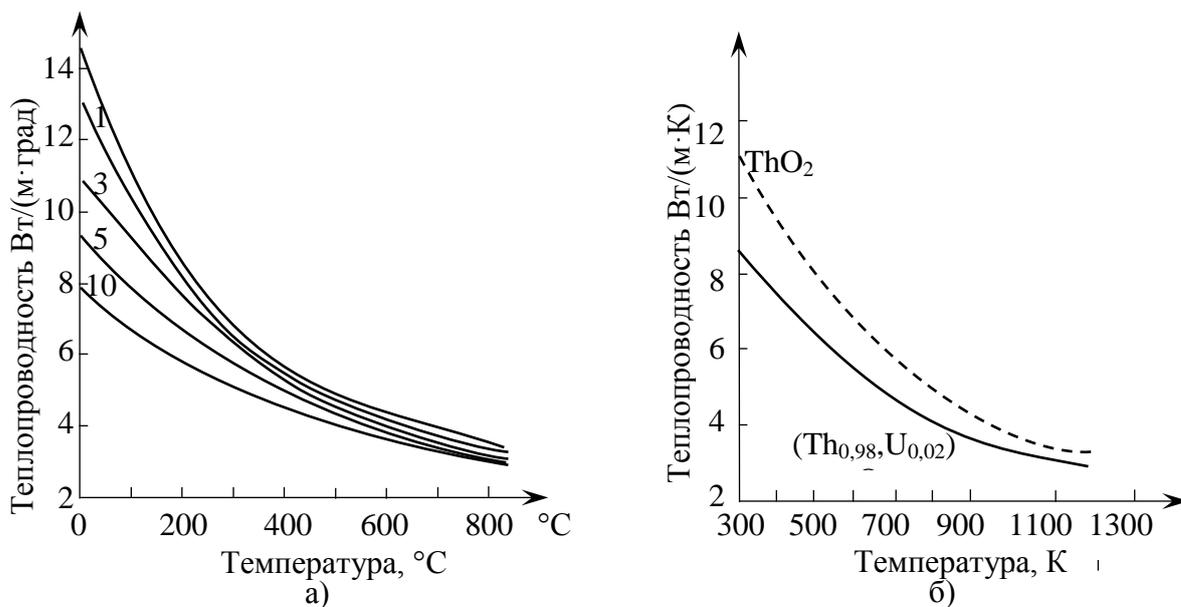


Рисунок 1.2 – Влияние температуры на теплопроводность: а) в системе ThO_2-UO_2 (на кривых содержание UO_2); б) на теплопроводность твердых растворов $(Th,U)O_2$

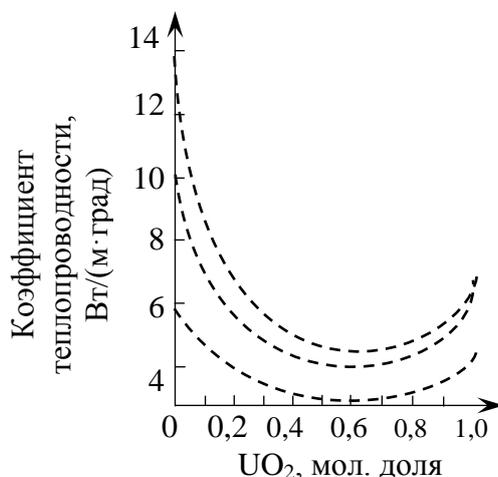


Рисунок 1.3 – Влияние состава твердых растворов ThO_2-UO_2 на коэффициент теплопроводности

1.1.4 Критерии оценки качества ядерного топлива

Совокупность свойств дисперсного топлива должна обеспечивать изготовление топливных таблеток с воспроизводимой плотностью, с контролируемой усадкой, без дефектов микроструктуры и поверхностных дефектов. Эти требования можно выполнить при использовании дисперсных порошков, обладающих определенной совокупностью свойств, изменяющихся в достаточно узких пределах. Свойства дисперсного материала, определяющие его статус как керамического, делятся на три группы [4]:

- химические показатели (химический состав, содержание примесей);
- физико-химические свойства;
- технологические свойства.

Многие исследователи отмечают наличие зависимости конечных свойств дисперсных порошков от условий и способов их получения, вида исходного сырья, а также условий синтеза исходного сырья [2]. Также отмечается взаимозависимость различных свойств конечных порошков.

Приведем некоторые отдельные характеристики порошков, а также их взаимное влияние на спекаемость и поведение таблеток реакторе.

1.1.4.1 Химический состав

Одной из важных характеристик порошка является т.н. кислородный коэффициент. Кислородный коэффициент - мольное отношение O/U в порошке, определяющее активность последнего при спекании. Величина кислородного коэффициента обычно хорошо коррелируется с удельной поверхностью порошка и находится в широких пределах: нижний предел составляет $2,06 \div 2,07$, верхний – $2,17 \div 2,18$ [4]. В промышленности используется коэффициент $2,07 \div 2,10$ [7]. Эффективный кислородный

коэффициент UO_2 при спекании в восстановительной атмосфере близок к стехиометрической величине 2,00 и не зависит от кислородного коэффициента исходного порошка, поскольку уже в интервале 873 ÷ 1073 К (еще при выходе на температурный режим первой стадии спекания) происходит удаление избыточного кислорода и образование почти стехиометрического UO_2 .

Требования по чистоте по примесям определяются практическими соображениями. Водород, поступивший в таблетки, независимо от формы, но особенно в виде влаги, приводит к гидрированию оболочки ТВЭЛа, выполненного из циркониевого сплава. Фтор, хлор (а также иод-продукт деления урана) вызывают локальную депассивацию защитной оксидной пленки на внутренней поверхности оболочки ТВЭЛа и ее водородную коррозию. Азот образует нитриды на внутренней поверхности оболочки ТВЭЛа, что способствует также водородной коррозии последней.

Чистоту ядерного топлива с точки зрения экономии нейтронов в реакторе оценивают борным эквивалентом. Суммарный борный эквивалент (СБЭ) для топлива реакторов на тепловых нейтронах определяют, как сумму борных эквивалентов каждой примеси с учетом ее концентрации.

1.1.4.2 Физико-химические свойства

При оценке керамических свойств UO_2 определяющим параметром дисперсного материала является собственно его дисперсность. Степень дисперсности оценивается по таким параметрам, как удельная поверхность, размер зерна, средний размер частиц материала и т. д.

Удельная поверхность порошка – одна из наиболее существенных характеристик, которая может быть использована для получения информации о технологических качествах порошка и о его пригодности для изготовления таблетированного ядерного топлива. Если условно принять, что все частицы имеют одинаковый размер и сферическую форму, то зная размер

частиц, можно вычислить удельную поверхность порошка.

Анализ методов измерения удельной поверхности (по низкотемпературной адсорбции газов на поверхности частиц, по измерению воздухопроницаемости слоя при атмосферном давлении и при пониженном давлении) показывает, что этот параметр несет в себе сложную информацию, включающую размеры кристаллитов, степень их агрегирования и агломерации, форму и структуру частиц. Поэтому корреляция между удельной поверхностью и спекаемостью проявляется в известных пределах. Существуют ограничения по этому параметру как сверху, так и снизу.

В соответствии с принятой ASTM классификацией в порошках различают следующие образования:

- индивидуальные частицы – наиболее мелкие дискретные образования (кристалл или аморфная частица);
- агрегаты – группа из нескольких индивидуальных частиц, удерживаемых друг с другом прочными связями;
- агломераты – группа двух или нескольких частиц и/или агрегатов, удерживаемых сравнительно слабыми когезионными силами;
- первичные частицы – группы из индивидуальных частиц, агрегатов или агломератов, в которых невозможно различить составные части, образующие группу.

Эта классификация в наибольшей степени применима к порошкам UO_2 , полученным по различного рода гидрохимическим технологиям, связанным с осаждением нерастворимых солей (полиуранатов, карбонатов и пр.). При использовании этих технологий установлено, что частицы UO_2 сохраняют форму частиц той соли, из которой они получены.

Накоплена обширная информация о влиянии гранулометрии порошка UO_2 на его керамические свойства, а также пористость частиц. Известно также, что порошки UO_2 , полученные методом высокотемпературного гидролиза UF_6 , имеют меньшую открытую пористость и удельную

поверхность и менее подвержены образованиям агрегатов, агломератов и прочим явлениям, усложняющим анализ керамических свойств порошка UO_2 .

1.1.4.3 Технологические свойства

К технологическим свойствам порошка относят насыпную плотность при свободной засыпке, насыпную плотность при утряске и текучесть порошка. Порошки с малой насыпной плотностью характеризуются небольшим размером кристаллитов и состоят из рыхлых агломератов, составные части которых связаны слабыми когезионными силами. Такие порошки обладают хорошей спекаемостью, но слабой прессуемостью.

Текучесть порошка характеризует его способность заполнять пресс-форму. Хорошей текучестью обладают порошки, имеющие сферическую форму частиц. Такие порошки получают при использовании газовых методов конверсии обогащенного по изотопу U^{235} гексафторида урана: газопламенной или плазменной технологии конверсии UF_6 .

Для оценки керамических свойств порошка UO_2 определения физических свойств недостаточно; дополнительно проводят тесты на спекаемость, в которых устанавливают не только достижение высокой плотности таблеток (в диапазоне $10,4 \div 10,7 \text{ г/см}^3$), но и воспроизводимость результатов.

В таблице 1.4 представлены характеристики порошка UO_2 , важные для производства таблеток, определенные на основании опыта спекания большого количества партий порошка [8].

Таблица 1.4 – Технологические характеристики порошков UO_2

Физическое свойство		Технологический эффект
Удельная поверхность	Низкая	Стабильность к окислению Низкая спеченная плотность Большие спеченные поры

Продолжение таблицы 1.4

Удельная поверхность	Высокая	Легкое спекание до высокой плотности Растрескивание во время спекания Нестабильность к окислению
Размер частиц	Малый	Трудность прессования Большие градиенты в сырых таблетках Легкое спекание до высокой плотности
	Большой	Низкая спеченная плотность Более гомогенные сырые таблетки
Прочность агломератов	Низкая	Легкость прессования Спекание до высокой плотности Гомогенная микроструктура таблеток
	Высокая	Трудность прессования Некачественные спеченные таблетки
Отношение О/У	Низкое	Низкая спеченная плотность Нестабильность порошка
	Высокое	Легкое спекание до высокой плотности Негомогенная структура

1.2 Способы получения оксидов урана

Методы получения оксидов можно разделить на два типа: водные и безводные методы переработки.

К водным методам переработки относят [9]:

- гидролиз с нитратом алюминия;
- аммонийуранлкарбонатный процесс (АУК);
- аммонийдиуранатный процесс (АДУ);
- золь-гель процесс.
- К безводным методам переработки относят:
- восстановление гексафторида урана водородом.

Далее, более подробно, рассматриваются некоторые из них.

1.2.1 АДУ-процесс

Исходным продуктом для получения керамического UO_2 является аммонийдиуранат, благодаря этому метод и получил свое название.

Классическая схема стадий АДУ-процесса по получения

керамического UO_2 из UF_6 выглядит следующим образом: гидролиз UF_6 в воде или в растворе аммиака \rightarrow осаждение полиураната аммония \rightarrow сушка \rightarrow прокатка \rightarrow восстановление.

АДУ-процесс может использоваться для переработки UF_6 как с повышенной концентрацией делящегося изотопа U^{235} , так и обедненного данному изотопу. Порошок диоксида урана с содержанием U^{235} до 5%, предполагается к использованию для изготовления ТВЭЛов энергетических реакторов. Порошок UO_2 , обедненный по изотопу U^{235} может использоваться в качестве сырьевого топлива зоны воспроизводства реакторов БН.

Осаждение полиураната аммония ведётся при использовании большого избытка аммиака по следующей схеме:



В случае недостатка аммиака возможна реакция (1.3):



Извлечение урана в осадок составляет более 99,5%. Для осаждения можно использовать агитаторы с мешалками, а фильтрацию осуществлять на барабанных вакуумных фильтрах. Отфильтрованный осадок полиураната аммония содержит несколько процентов фтора. Его дальнейшая переработка заключается в термической диссоциации до закиси-окиси урана U_3O_8 и последующем восстановлении до диоксида урана. Процесс удобно проводить в печах кипящего слоя. Последующая переработка UO_2 заключается в холодном прессовании и затем спекании образцов в атмосфере водорода при температуре $1750^\circ C$. Ввиду того, что из полиураната аммония получается мелкодисперсный диоксид циркония, прессованные образцы имеют очень высокую плотность – не менее 95% от теоретической, т. е. ~ 10 г/см³.

1.2.2 АУК-процесс

АУК-процесс берёт своё название от аммонийуранилкарбоната. Промышленный способ получения керамического UO_2 из UF_6 осуществляется через промежуточное соединение $(NH_4)_4UO_2(CO_3)_3$.

Аппаратурная схема технологической АУК линии по производству двуоксида урана на заводе в Вольфганге под Ханану (Германия) показана на рисунке 1.4.

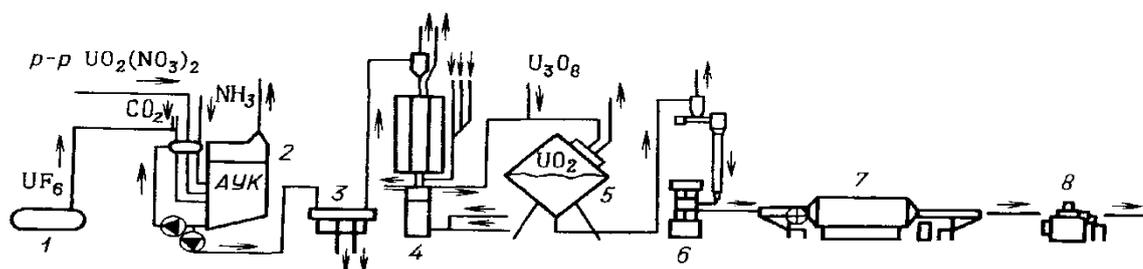


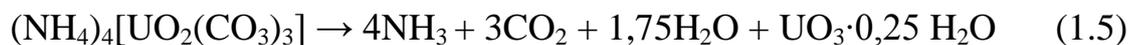
Рисунок 1.4 – Аппаратурная (АУК) схема получения таблетированного топлива

1 – испарение гексафторида урана; 2 – осаждение трикарбонатуранилата аммония; 3 – фильтр; 4 – печь кипящего слоя; 5 – вращающийся смеситель; 6 – пресс; 7 – печь для спекания; 8 – шлифование таблеток.

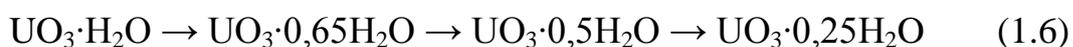
Аммоний-уранилкарбонат образуется по реакции 1.4:



Далее $(NH_4)_4[UO_2(CO_3)_3]$ подвергают термическому разложению с последующим восстановлением промежуточных продуктов разложения до UO_2 . Процесс протекает по схеме 1.5:



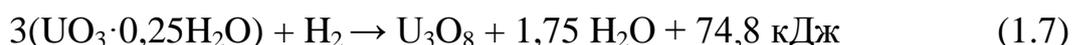
Конечным продуктом прокаливания является U_3O_8 (на воздухе) и UO_2 (в водороде). Разложение $(NH_4)_4[UO_2(CO_3)_3]$ протекает ступенчато, сначала до моногидрата триоксида урана с постепенной потерей воды в дальнейшем. Процесс дегидратации можно представить следующим образом:



Соединение $UO_3 \cdot 0,25H_2O$ образуется в качестве промежуточного

продукта при прокатке в атмосфере всех газов и существует вплоть до температуры 653 К.

Дальнейшее термическое разложение в гелии (и на воздухе) и в водороде протекает по-разному. В водороде образование октаоксида триурана из $UO_3 \cdot 0,25H_2O$ протекает, минуя стадию образования безводного UO_3 . Эта реакция экзотермична и начинается уже при 683 К.



1.2.3 Свойства порошков диоксида урана

В таблице 1.5 представлены некоторые свойства порошков, полученных методами АДУ и АУК.

Таблица 1.5 – Сравнительные характеристики порошков

Параметр	АДУ-процесс	АУК-процесс
Удельная поверхность, м ² /г	2,5-6	3,6-6
Насыпная плотность, г/см ³	1,5-2	2-2,23
Плотность утряски, г/см ³	2,4-2,8	2,6-3
Текучесть	Не текучие	Текучие
Отношение O/U	2,03-2,17	2,06-2,16
Содержание примесей		
Фтор	30-50	30-70
Углерод	40-200	120
Железо	До 70	10-20
Хром	40	3
Никель	40	10
Марганец	5	1
Ванадий	10	10

1.3 Способы получения оксидов тория

Выделим и опишем наиболее распространенный и наиболее перспективный методы получения оксидов тория из нитратных растворов –

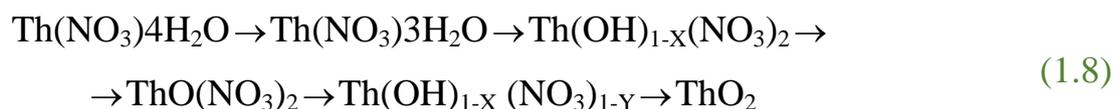
термический и плазменный соответственно.

1.3.1 Метод термического разложения

Хорошо спекающийся порошок диоксида тория (ThO_2) получают путем термического разложения солей тория: гидроксида ($\text{Th}(\text{OH})_4$), нитрата ($\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), оксалата ($\text{Th}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), сульфата ($\text{Th}(\text{SO}_4)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), карбоната ($\text{Th}(\text{CO}_3)_2$). Наиболее часто, используется процесс термического разложения нитрата тория или оксалата тория, осажденного из нитратного раствора.

Процессы термообработки $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$, их кинетика и процесс превращения нитрата тория в диоксид тория исследовались в работе [10].

В качестве исходных порошков, использовались порошки $\text{Th}(\text{NO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ с размером частиц 5-15 мкм. Прокалка порошков проводилась в печах сопротивления, при температуре от 300 до 1200 К. Скорость подъема температуры 6 К/мин. Изучение стадий процесса прокалки проводилось при помощи методов масс-спектрального, термогравиметрического и рентгеноструктурного анализов:



При получении диоксида тория из $\text{Th}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, процесс также начинается с приготовления раствора нитрата тория.

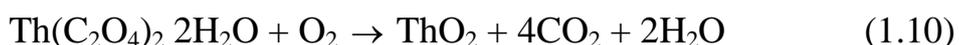
Нитрат тория растворяют в азотной кислоте с концентрацией 0,5 моль/л. В конце процесса растворения, нитрата тория, его содержание в растворе составляет ~240 г/л.

Раствор нагревают до 50°C, после чего добавляется кристаллическая щавелевая кислота в 5%-ном избытке по отношению к стехеометрическому., осадок оксалата тория выпадает через 15 минут, в соответствии с реакцией:



Осадок отделяют от растворимых солей путем фильтрации на

барабанном вакуумном фильтре. Осадок из фильтра может содержать до ~ 50 % влаги и до 0,5 % нитрата. Далее проводят процедуру предварительной сушки осадка и его прокалки. Сушка проводится в шнековых сушилках при температуре ~120°C, до остаточного содержания влаги в 10 %. После сушки проводят прокалку во вращающейся печи при температуре 540-560°C, при этом оксалат тория разлагается до оксида:



1.3.2 Плазменный метод

Плазмохимическая технология состоит в смешении плазменного теплоносителя с распыляемым водным раствором нитрата тория. В качестве плазменного теплоносителя используют азот или аргон, нагретые до состояния низкотемпературной плазмы. При смешении высокотемпературного плазменного теплоносителя с диспергированным водным раствором нитрата тория происходят процессы нагрева и испарения капель раствора с последующим термическим разложением частиц солевого остатка, сопровождающиеся обогащением газовой фазы водяным паром и образованием высокодисперсных частиц оксида тория. Охлаждение продуктов реакции (закалка) проводится путем их взаимодействия с распыляемой жидкостью. В качестве жидкости может выступать деионизированная вода, жидкий азот или жидкий оксид углерода, которые подают под давлением не менее 2 МПа в область, расположенную за зоной реакции.

Поскольку скорости ввода газовой смеси и диспергированного водного раствора в зону конверсии реактора, как правило, существенно различаются, то за счет эффекта инжекции в реакторе образуются области возвратно-поступательного движения газа с содержащимися в нем аэрозольными частицами. В зонах циркуляции происходит агломерация частиц и их укрупнение. Рост и агломерация частиц в зоне конверсии

облегчает последующее разделение пылегазовой смеси и уменьшает протекание обратных реакций взаимодействия частиц диоксида тория ThO_2 с парами азотной кислоты на поверхности твердой фазы при охлаждении реакционного потока, поскольку суммарная скорость взаимодействия конденсированной и газовой фаз уменьшается с уменьшением площади поверхности раздела фаз [11].

Диапазон значений концентраций водных растворов нитрата тория и массовый расход данного раствора на конверсию определяется условиями получения порошка торий-оксидной композиции с требуемой концентрацией металла, содержащегося в водном растворе соли.

На рисунках 1.5 и 1.6 показаны принципиальные схемы реализации процесса.

Плазменный теплоноситель (азот, аргон или их смесь) нагревают до состояния низкотемпературной плазмы ($5000 \div 6000\text{K}$) высокочастотным индукционным разрядом в ВЧИ-плазмотроне 2 и направляют в реакционную зону плазменного реактора 4. Водный раствор нитрата тория из ёмкости 10 в плазменный реактор нагнетается насосом. Распыление раствора в камеру смешения реактора осуществляют пневматическими или пневмоцентробежными форсунками, обеспечивающими среднюю дисперсность распыла жидкости не более $(50 \div 70) \cdot 10^{-6}$ м, для чего в форсунки дополнительно подводят сжатый газ (азот), где происходит его смешение с газом-теплоносителем. Температура газа-теплоносителя после смешения снижается до $2000 \div 3000\text{K}$.

Впрыск (распыление) раствора в зону конверсии ведется под углом к направлению движения газа-теплоносителя. Во время технологического процесса давление в зоне конверсии плазменного реактора поддерживают на $10 \div 50$ кПа ниже атмосферного [11].

В результате термического разложения диспергированного водного раствора соли в зоне конверсии образуется аэрозоль оксидов тория с тем или иным мольным отношением O/Th в зависимости от восстановительного

потенциала газовой фазы.

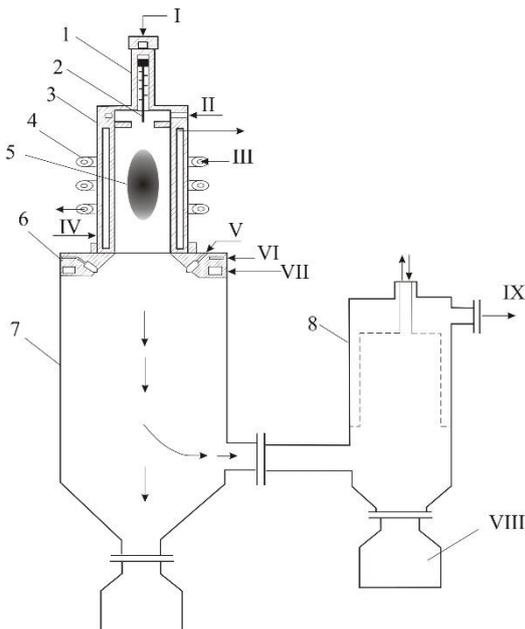


Рисунок 1.5 – Схема плазмохимической установки 1:

1-поджигающее устройство; 2- электрод; 3- плазмотрон; 4- индуктор; 5- плазменный разряд; 6 - распыляющее устройство; 7 - плазмохимический реактор; 8 - фильтр; I - газ для поджигания разряда; II - газ для плазмообразования; III - вода для охлаждения индуктора; IV - вода для охлаждения плазмотрона; V - перерабатываемые неорганические соединения металлов; VI - воздух для распыления; VII - вода для охлаждения форсунки; VIII - полученный продукт; IX - газ на очистку.

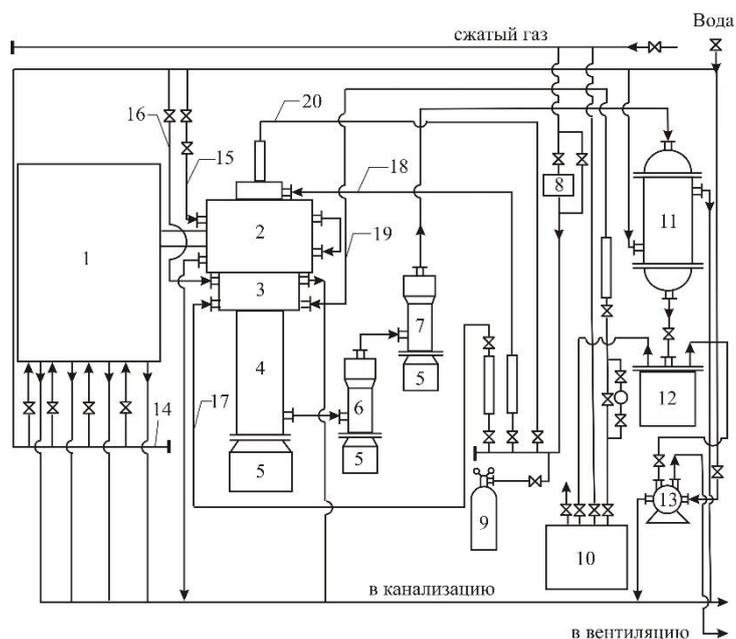


Рисунок 1.6 – Схема плазмохимической установки 2: 1-ВЧ-генератор,

2- плазмотрон, 3- форсунка; 4- плазмохимический реактор, 5- приёмный бункер, 6- первый вихревой пылеуловитель, 7- второй вихревой пылеуловитель, 8- фильтр, 9- баллон с плазмообразующим газом; 10-ёмкость для подачи исходного раствора, 11-сборник для конденсата, 12- ёмкость для конденсата, 13- вакуум-насос, 14- вода для охлаждения генератора, 15- вода для охлаждения плазмотрона, 16- вода для охлаждения форсунки, 17- газ для распыления раствора, 18- газ на плазмообразование, 19- раствор, 20- газ для поджигания [11].

Выделение частичек оксидов из пылегазового потока осуществляют в системе разделения 6, 7 и 8 состоящей из циклонных аппаратов и металлокерамического фильтра, включенных последовательно, при температуре соответственно $500\div 600^{\circ}\text{C}$ и $200\div 300^{\circ}\text{C}$. Порошок собирают в контейнер 5. Дисперсность аэрозоля $(2\div 5)\cdot 10^{-6}\text{м}$.

Очищенный газ, состоящий из остаточного водяного пара, паров азотной кислоты, азота (аргона) и водорода, направляют на совместную конденсацию паров воды и азотной кислоты в холодильник-конденсатор 11 с получением в сборнике 12 азотной кислоты различной концентрации.

Азот (аргон) направляют в блок газоочистки.

Кубовый остаток концентрирует в себе проскок аэрозолей оксидов тория и может быть возвращен в плазменный реактор в виде раствора тория путем добавки к исходному раствору солей металлов. Далее порошок оксидов подвергают термообработке в восстановительной атмосфере для удаления остаточного азота и доведения мольного отношения O/Th до $2,06\div 2,18$. Партии порошка ThO_2 анализируют на содержание компонентов и, если требуется, подвергают усреднению.

Концентрация тория в растворе $80\div 100$ г/л; мощность плазмотрона – до 55 кВт; мощность, потребляемая плазменной установкой от электросети – до 90 кВт; расход газа-теплоносителя – $10\div 12$ кг/ч; расход раствора – $9\div 11$ кг/ч; расход газа на распыление – $3\div 4$ кг/ч (пневматические форсунки);

степень улавливания- 0,999; энергозатраты – 1,6÷1,8 кВт/кг. В зону реакции впрыскивается водный раствор нитрата тория [11].

Данная технология позволяет получать гомогенные смеси оксидов за одну стадию, и одновременно, позволяет реализовать утилизацию оборотных растворов.

1.4 Способы получения оксидных композиций урана и тория

Для получения оксидных композиций $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$ могут быть использованы следующие методы:

- спекание механической смеси порошков ThO_2 и UO_2 ;
- прокалка солей урана и тория;
- плазменная технология;
- золь-гель метод.

1.4.1 Спекание порошков оксидных композиций урана и тория

Изучение твердых растворов $(\text{Th,U})\text{O}_2$, получаемых механическим смешением заранее подготовленных порошков ThO_2 и UO_2 , проводилось в работе [12]. Согласно исследованиям, образование твердых растворов $(\text{Th,U})\text{O}_2$, при спекании смесей порошков ThO_2 и UO_2 , происходит только в условиях высоких температур (1673-1973 К) термообработки. В работе [13] получение $(\text{Th,U})\text{O}_2$ проходило путем прокалки на воздухе, при температуре 1923 К, смеси гидроксидов тория и урана. Спекание смеси оксалатов тория и урана проводили для получения твердых растворов $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$ в работе [14]. Смесь оксалатов урана и тория подвергалась прокалке на воздухе или в атмосфере $\text{He}+6\% \text{H}_2$ при температурах свыше 700°C. Установлено, что при медленном выделении CO и CO_2 получаемые $(\text{Th,U})\text{O}_2$ загрязнены значительными (5550 ppm) количествами углерода, который удалялся на стадии спекания при 1923 К.

1.4.2 Прокалка солей урана и тория

Для прокалки солей тория могут использоваться:

- печи сопротивления;
- микроволновые печи.

Для прокалки смеси солей (гидроксид, нитрат, карбонат, оксалат и т.д.), чаще всего, используют в печи сопротивления.

В работах [15,16] установлено, что при использовании для прокалки солей урана и тория микроволновых печей (частота 245 МГц, Мощность 700 Вт), можно добиться снижения температуры и времени процесса получения оксидных порошков.

Работы [17,18] посвящены исследованию процессов синтеза $(Th,U)O_2$ путем прокалки соосажденных солей тория и урана. В работе [17] изучалось влияние условий получения порошков $(Th,U)O_2$. Авторы использовали смеси нитратов тория и урана следующих концентраций $(U/(Th+U)) = 0,15, 0,50, 0,65, \text{ и } 0,80$). Прокалка осуществлялась в микроволновой печи и печи сопротивления, в присутствии добавки поливинилового спирта. Добавка служит для получения нанокристаллических порошков $(Th,U)O_2$. Характеристики порошков, полученных в ходе экспериментов, приведены в таблице 1.6. Экспериментальные данные говорят о том, что для порошков с содержанием $U/(Th+U) > 0,15$, удельная поверхность будет больше, если прокалку проводить в печи сопротивления.

Наличие добавки поливинилового спирта приводит к тому, что порошки $(U,Th)O_2$ загрязняются углеродом.

Таблица 1.6 – Влияние условий прокалки на загрязнение порошков [17]

Композиция	Содержание углерода, % масс	
	Микроволновая печь	Печь сопротивления
$(U_{0,15}Th_{0,85})O_2$	0,39	0,11
$(U_{0,50}Th_{0,50})O_2$	0,08	0,02
$(U_{0,80}Th_{0,20})O_2$	0,05	0,02

Данные таблицы 1.6 показывают, что порошки содержат больше остаточного углерода, в случае более высокого содержания тория и всегда больше при использовании микроволновой печи.

Как показано в работе [19], частичное разложение водных растворов нитратов тория и урана приводит к выделению оксидов азота, кислорода и воды:



Исследование размеров частиц порошков, получаемых в результате прокалки, показало, что размер порошков исходной композиции $\text{U}/(\text{U} + \text{Th}) = 0,15$ был 8-13 нм и увеличился после прокалки до 0,75 мкм. Исходные порошки композиции $\text{U}/(\text{U} + \text{Th}) = 0,5$ состояли из агломератов размером 21-28 нм. Условия прокалки оказывают существенное влияние на размер частиц порошка после прокалки. Следует иметь в виду, что время термообработки в микроволновой печи — 2 мин, а прокалка в печи сопротивления проводится при температуре 1073 К в течение 4 ч. Порошки $(\text{Th},\text{U})\text{O}_2$ с содержанием $\text{U}/(\text{Th} + \text{U}) = 0,5$ были однофазными, а порошки с $\text{U}/(\text{Th} + \text{U}) > 0,5$ — двухфазными и наряду с твердым раствором $(\text{U},\text{Th})\text{O}_2$ содержали гексагональную фазу $\alpha\text{-U}_3\text{O}_8$.

В работе [20] для получения нанокристаллических порошков использовали добавку лимонной кислоты вместо поливинилового спирта, применяемого в работе [17]. Водные растворы смесей нитратов тория и урана с лимонной кислотой дегидрировали в печи сопротивления и в микроволновой печи (частота 2450 МГц, мощность 600-700 Вт). Полученный твердый осадок прокаливали на воздухе в печи сопротивления при 973 К в течение 5 ч. Исследовалось влияние соотношения количества молей лимонной кислоты (СА) к количеству молей нитрата (СА/NO₃). На рис. 5.15 и в табл. 5.9 приведены данные о физико-химических свойствах полученных порошков. Как видно из табл. 5.9, полученные порошки с $\text{U}/(\text{U} + \text{Th}) < 0,5$ однофазны, при большем содержании урана порошки двухфазны и содержат, кроме фазы

$(U,Th)O_2$, фазу $\alpha-U_3O_8$. Удельная Поверхность порошков, полученных прокалкой в микроволновой печи, выше, чем при прокалке в печи сопротивления.

Независимо от соотношения $U/(U + Th)$ и вида печи прокалки удельная поверхность увеличивается с увеличением Ca/NO_3^- до 1,0. Дальнейшее увеличение этого соотношения приводит к уменьшению удельной поверхности получаемых порошков [2].

Таблица 1.7 – Физико-химические свойства порошков, полученных прокалкой смеси нитратов тория и урана с различным соотношением $U/(Th+U)$ при соотношении $Ca/NO_3^-=1$ [17]

Композиция	Метод прокалки	$U/(U+Th)$	Фазовый состав	Удельная поверхность, m^2/g	Размер частиц порошка, нм
1	Микроволновая печь	0,15	$(U_{0,15}Th_{0,85})O_{2+x}$	11,9	7
2		0,30	$(U_{0,30}Th_{0,70})O_{2+x}$	13,4	8
3		0,50	$(U_{0,50}Th_{0,50})O_{2+x}$	12,4	9
4		0,75	$(U_{0,75}Th_{0,25})O_{2+x}[MO_{2+x}+U_3O_8]$	5,9	11
5		0,90	$(U_{0,90}Th_{0,10})O_{2+x}[MO_{2+x}+U_3O_8]$	3,79	15
6	Печь сопротивления	0,15	$(U_{0,15}Th_{0,85})O_{2+x}$	10,55	6
7		0,30	$(U_{0,30}Th_{0,70})O_{2+x}$	12,09	7
8		0,50	$(U_{0,50}Th_{0,50})O_{2+x}$	12,21	8
9		0,75	$(U_{0,75}Th_{0,25})O_{2+x}[MO_{2+x}+U_3O_8]$	6,00	8
10		0,90	$(U_{0,90}Th_{0,10})O_{2+x}[MO_{2+x}+U_3O_8]$	5,30	13

1.4.2.1 Микроволновая технология производства уран-ториевых композиций

Свойство поглощения микроволновой энергии водой на частотах 915 и 2450 МГц используется для ее удаления из различных конденсированных систем.

Нитратные растворы урана, тория и плутония могут быть подвергнуты облучению с целью испарения воды. В процессе также будет

происходить нагрев и разложение солевого остатка, образование оксидов и оксидных смесей.

Технология синтеза порошков смешанных оксидных композиций урана и плутония с использованием микроволнового нагрева смешанного нитратного раствора и промежуточного солевого остатка может быть реализована на микроволновых установках с различной, зависящей от уровня мощности, производительностью.

На рисунке 1.7 показана схема опытной установки по производству смешанного уран-плутониевого топлива из смешанных нитратных растворов, работающей на основе использования микроволнового нагрева на стадии получения оксидов [7]. Данная установка может быть применена и для получения уран-ториевого топлива из смешанных нитратных растворов.

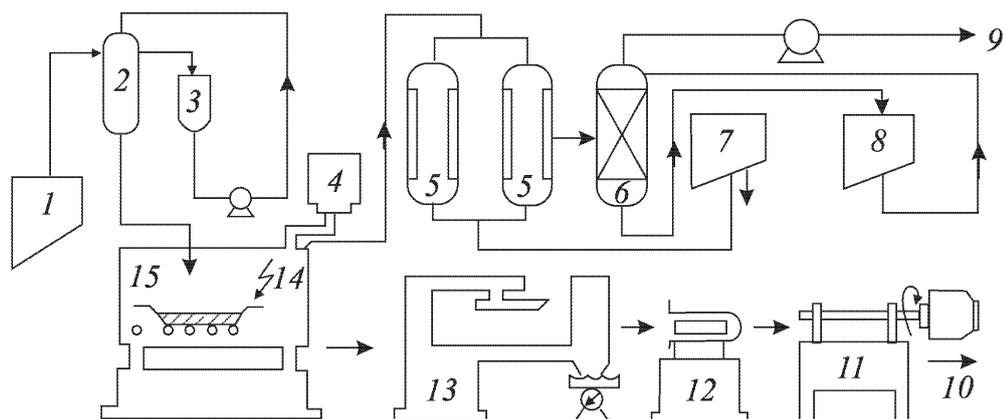


Рисунок 1.7 – Схема опытной микроволновой установки

Смешанной нитратный раствор урана и плутония с концентрацией 0,28 кг (U+Pu)/л подавали из танка 1 в резервуар 2 фиксированного объема ~ 7,2 л, а затем транспортировали в широкий плоский сосуд 14 (внутренний диаметр 0,55 м, высота 0,05 м) внутри микроволнового денитратора 15. Поток микроволновой энергии направляли от генератора 4 по волноводу к слою раствора в сосуде 14; мощность генератора - 16 кВт, частота - 2450 МГц. Свободная и связанная вода испарялись, нитраты разлагались до образования оксидной композиции PuO_2-UO_3 . Остальные обозначения на

рисунке следующие: 3 - ресивер; 5- конденсатор; 6 - скруббер; 7 - сборник азотной кислоты; 8 - водяной скруббер; 9 - выхлопные газы; 10 - готовая продукция (смесевой оксид U и Pu); 11 - шаровая мельница; 12 - печь прокали-восстановления; 13 - аппарат для извлечения смесевых оксидов, полученных методом микроволновой денитрации [7].

Процесс концентрирования раствора и отгонки азотной кислоты под действием микроволнового излучения протекал около 20 мин при температуре ~ 383 К; после отгонки жидкой фазы температура возрастала до 670 К и выше; при этом протекал процесс разложения нитратов. Затем продукт состава $\text{PuO}_2\text{-U}_2\text{O}_3$ перегружали в печь прокали-восстановления, где доводили до состава $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$. Этот продукт пригоден для изготовления таблетированного оксидного (U-Pu)-топлива. Мольное соотношение Pu/U в оксидной композиции составляло 0, 1, 2, ∞ . Была получена опытная партия таблетированного оксидного уран-плутониевого топлива; ее исследования дали хорошие результаты по гомогенности распределения плутония в таблетках, плотности и структуре.

На опытной установке, представленной в [7], было получено 0,294 т смесевых оксидов, содержащих 0,129 т плутония, и изготовлено 16 топливных сборок. По результатам испытаний изготовлено промышленное оборудование, работающее по тому же принципу, но в условиях действующего производства. Нитратные растворы урана и плутония раздельно транспортировали из регенерационного завода, смешивали так, чтобы мольное соотношение Pu/U составляло ~ 1 , обрабатывали на той же частоте 2450 МГц при мощности 16 кВт. Годовая производительность оборудования составляла ~ 2 т по смеси урана и плутония (~ 10 кг (Pu + U) в день).

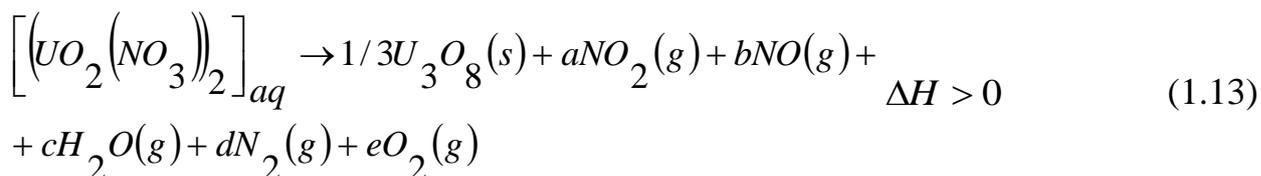
Подобная технология применялась при обработке микроволновым излучением смесевых растворов $\text{Th}(\text{NO}_3)_4\text{-UO}_2(\text{NO}_3)_2$ [17]. Прокалка полученного продукта проводилась на воздухе при температуре 1323 – 1573 К. Затем, порошок размалывали в шаровой мельнице, сушили на

воздухе, протирали через сито с размером ячеек 850 мкм и прессовали в таблетки под давлением 345 МПа, используя в качестве связующего стеарат цинка. Таблетки диаметром 14,2 мм спекали в атмосфере водорода при 1973 К со скоростью нагрева и охлаждения 250°С/ч. Удалось достичь плотности таблеток более 96% от теоретической.

1.4.3 Плазменная технология получения оксидного уран-ториевого топлива

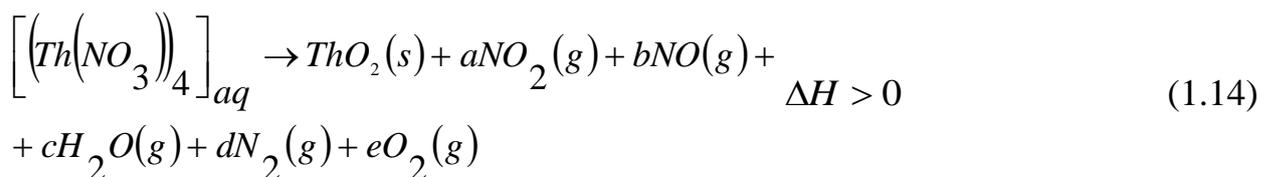
Процесс основывается на введении смесового нитратного раствора урана и тория в поток воздушной плазмы. Проблем с образованием твердых растворов ThO₂-UO₂ при плазменной денитрации смесовых нитратных растворов урана и тория не наблюдается.

В нейтральной среде нитрат уранила разлагается до закиси-оксида урана U₃O₈ согласно уравнению:



Для получения UO₂ в раствор вводят растворимый восстановитель, например карбамид (CH₄N₂O) или формальдегид (H₂CO), молекулы растворимого восстановителя в каждой капле раствора диссоциируют с образованием монооксида углерода и атомарного водорода, которые понижают валентность урана до +4.

Нитрат тория, распадается на диоксид тория и оксиды азота согласно уравнению:



Затем, в соответствии с механизмом процесса, диоксиды урана и тория образуют гомогенную композицию UO₂-ThO₂.

Брутто-схема разложения нитратных растворов уранила при взаимодействии с плазменным теплоносителем на оксиды урана и азотную кислоту показана на рисунке 8. В соответствии с этой схемой в плазменном реакторе, встречаются два потока: поток предварительно диспергированного раствора и поток плазмы, химически совместимой с этим раствором.

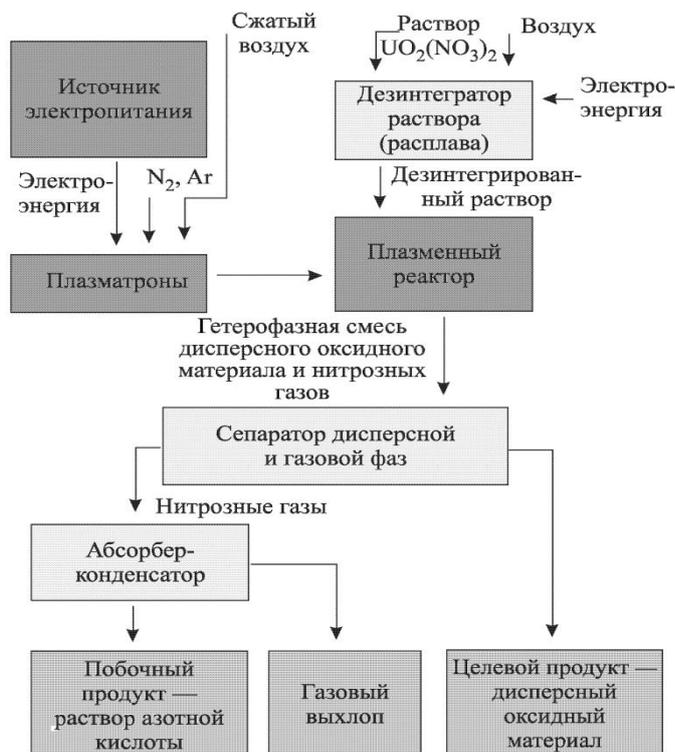


Рисунок 1.8 – Брутто-схема плазменного процесса разложения нитратных растворов урана на оксиды урана и азотную кислоту [7]

Оба потока равномерно перемешиваются в реакторе, при этом каждая капля раствора нагревается до кипения, из нее испаряется растворитель (в данном случае – вода) до образования солевого остатка, последний быстро нагревается до высокой температуры; одновременно с нагревом протекает разложение до образования оксида находящегося в растворе металла и газовой фазы, содержащей оксиды азота, водяной пар, азот и кислород.

Технологическая схема имеет следующие основные аппаратные элементы:

1. Источник электропитания плазмотрона (выпрямитель с системой автоматического регулирования тока, высокочастотный или сверхвысокочастотный генератор и т.п.).

2. Плазмотрон, в котором поток химически совместимого с раствором газа (в случае разложения нитратов – воздух или его компоненты: азот, кислород, в зависимости от валентности выделяемого металла) превращается в поток низкотемпературной плазмы. При использовании в качестве плазменного теплоносителя воздуха или азота можно, в некоторых случаях, совместить процесс разложения нитратного раствора на оксиды с процессом расширенной регенерации азотной кислоты.

3. Плазменный реактор, где перемешиваются потоки плазмы и раствора и происходит разложение раствора по уравнениям (1.13, 1.14). Плазменный реактор – охлаждаемое изделие цилиндрической или конической формы, снабженное, как правило, несколькими плазматронами и одним или несколькими дезинтеграторами раствора. При использовании нескольких плазматронов и дезинтеграторов очень интенсифицируются процесс смешения и процессы тепло- и массообмена при взаимодействии капель раствора с высокотемпературной средой.

4. Сепаратор, в котором проводится разделение дисперсной и газовой фаз; после сепаратора возникают два материальных потока: поток дисперсного оксидного материала, являющегося целевым продуктом, и поток газовой фазы, содержащей, оксиды азота, водяной пар, азот и кислород.

5. Конденсатор-абсорбер. В конденсаторе производится принудительная конденсация водяного пара и частичная абсорбция оксидов азота, а в абсорбере – рекомбинация и поглощение азотной кислоты. В результате из установки выходит поток побочного продукта – раствора азотной кислоты. В идеальном случае из установки должен выходить газовый выхлоп, содержащий азот и кислород, однако фактически требуется доочистка выхлопа от оксидов азота до санитарных норм.

Химический состав получаемых оксидных порошков, их физические свойства, степень регенерации азотной кислоты и различные другие параметры в первую очередь зависят от режима обработки раствора в плазме, а во вторую определяются режимом разделения дисперсной и газовой фаз. Процесс разложения капель нитратного раствора уранила по уравнению (1.13) аппроксимируется брутто-схемой, представленной на рисунке 9, где показаны основные стадии превращения капли раствора в конечный продукт.

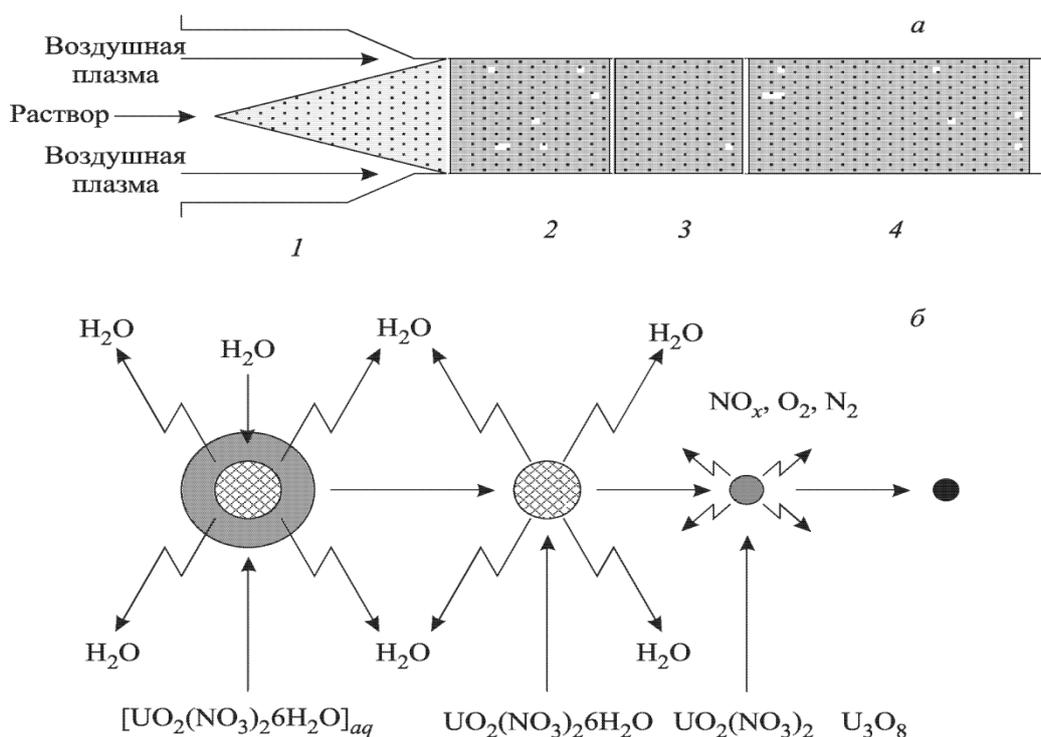


Рисунок 1.9 – Схема смешения потока дезинтегрированного нитратного раствора уранила с потоком воздушной плазмы (а) и схема разложения капли раствора до оксида урана (б): 1 - нагревание капли раствора до температуры кипения; 2 - испарение растворителя, образование ядра конденсированного гидратированного нитратного остатка $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$; 3 - нагревание и разложение солевого остатка $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, образование U_3O_8 и газовой фазы; 4 - нагревание оксида урана [7].

1.5 Прессование

Для получения таблеток из порошка $(\text{Th,U})\text{O}_2$ наиболее широко используется метод прессования на холоде.

Прессование порошка проводят на гидравлическом прессе, который помещают в камеру, заполненную сухим аргоном. Выбор давления определяется формой частиц порошка, их размерами, а также желаемыми свойствами получаемого топливного сердечника. Наиболее распространены сердечники в форме цилиндров.

Ториевое топливо для реактора BORAX-14 производили по следующему технологическому процессу [21]: прокалка ThO_2 при температуре 1000°C , смешивание ThO_2 , U_3O_8 (6,35%) и поливинилового спирта (2,5%) в шаровой мельнице в течение 3 ч, грануляция порошка с добавлением воды, сушка (80°C , 4 ч), прессование таблеток на автоматическом прессе (диаметр 6,7 мм, усилие прессования $900\text{--}1100\text{ кг/см}^2$, 80 шт/мин). Для реактора «Холден» (США) при изготовлении сердечников ТВЭЛов (таблетки) из оксалатного порошка $(\text{Th,U})\text{O}_2$ порошок сначала гранулировали, а затем прессовали при давлении 4000 кг/см^2 . Так было изготовлено 200 кг таблеток. В 1963 г. при изготовлении таблеток из $(\text{U,Th})\text{O}_2$ для первой зоны реактора Indian Point [22] была применена следующая схема: смешивание порошков ThO_2 и UO_2 , размол смеси с бракованными таблетками в шаровой мельнице, добавление карбоната (технологическое связующее), грануляция порошка и прессование заготовок таблеток.

1.6 Спекание

Высокая тугоплавкость и узкая область гомогенности, для получения плотных изделий из диоксида тория, требует использование порошков с высокой удельной поверхностью.

В связи с высокой тугоплавкостью и узкой областью гомогенности, для получения плотных изделий из ThO_2 используются порошки, имеющие высокую удельную поверхность. Отмечается, что добавление оксидов, образующих с ThO_2 твердые растворы с анионными вакансиями, улучшает спекаемость [2].

Высокая плотность таблеток, спеченных при температурах спекания ниже $1750\text{ }^\circ\text{C}$ достигается путем использования активирующих добавок оксидов магния, кальция и ниобия. Использование тория в качестве ядерного топлива накладывает ряд ограничений, одним из которых является чистота материала, поэтому наличие любых примесей неприемлемо.

Для понижения температуры спекания $(\text{Th,U})\text{O}_2$ в исследованиях [17] использовалась закись-окись урана. Процесс получения заготовок выглядел следующим образом:

- измельчение оксида тория шарами из WC в планетарной мельнице;
- смешивание шарами из WC в планетарной мельнице подготовленного оксида тория с U_3O_8 в течение 4х часов;
- предварительное компактирование композиции порошков $\text{ThO}_2+\text{U}_3\text{O}_8$ при давлении 150 МПа;
- гранулирование порошка $\text{ThO}_2+\text{U}_3\text{O}_8$;
- приготовление заготовок таблеток при давлении 300 МПа.

Полученные заготовки имели плотность $\sim 67\%$ от теоретической.

Рентгеноструктурный анализ спеченных порошков $\text{ThO}_2 + 2\% \text{U}_3\text{O}_8$ показал, что таблетки спекаемые при температуре $1400\text{ }^\circ\text{C}$ и выше, содержат только одну фазу $(\text{Th,U})\text{O}_2$.

2 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

В рамках данной работы проведено моделирование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для ториевого ядерного топлива.

При изучении работ по получению и испытанию торий-уранового ядерного топлива замечено, что у большинства исследователей, наблюдается интерес к определенному составу смешанного топлива, а именно исследования проводятся для смесей с содержанием изотопа урана-235 в диапазоне (10÷30) % от его состава. Эта особенность вызвана экономическими и физическими требованиями к готовым ТВЭЛам, спекаемым из этих порошков. При исследования процессов плазмохимического получения смешанных уран-ториевых порошков, в данной диссертационной работе, использовались такие композиции при переработке которых, содержание изотопа урана-235 в готовом порошке лежит в диапазоне (10÷30) %.

Используемый нами плазменный способ получения гомогенных оксидных композиций урана и тория несколько отличается от описанного в обзоре литературы.

Главное отличие заключается в том, что в плазменную струю, генерируемую ВЧФ-плазмотроном, подается не смесевой нитратный раствор, а диспергированная водно-солеорганическая композиция (ВСОК) на основе СНР и горючего компонента (этанол, ацетон и др). Плазменная обработка только диспергированных СНР требует огромных затрат электрической энергии (до 10 кВт·ч/кг). Добавление горючего компонента в СНР приводит к резкому снижению затрат электрической энергии и обеспечивает одностадийную и энергоэффективную плазменную обработку СНР в виде диспергированных ВСОК (до 0,1 кВт·ч/кг)..

В качестве исходного сырья могут быть использованы соли урана и тория ($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и ($\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

Расчет необходимого соотношения между солями урана ($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и тория ($\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для обеспечения требуемого соотношения $\text{U}/(\text{Th}+\text{U})$ в готовом топливе, представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Таблица соотношения солей U и Th

U/(U+Th) в готовом топливе	Необходимое соотношение солей	
	$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
0,1	0,08	0,92
0,15	0,13	0,87
0,2	0,17	0,83
0,25	0,22	0,78
0,3	0,26	0,74

Значения растворимостей солей урана и тория в воде представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Растворимость солей урана и тория в воде

Растворимость в воде, г/100мл	Соль	Соль/Вода
190,7	$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,65
621	$\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,86

С учетом растворимости солей в воде, получим соотношения между компонентами для водно-солевой композиции (ВСК). Результаты расчетов представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Состав водно-солевой композиции

U/(U+Th) в готовом топливе	ВСК=Вода+Соль			
	Соль/(Соль+Вода)	Соль		H_2O
		$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
0,1	0,65	0,05	0,60	0,35
0,15	0,65	0,08	0,57	0,35
0,2	0,65	0,11	0,54	0,35
0,25	0,65	0,14	0,51	0,35
0,3	0,65	0,17	0,48	0,35

В работе проведены исследования различных водно-солеорганических композиций на основе смесевых нитратных растворов урана и тория (СНР): «СНР-метанол», «СНР-этанол», «СНР-пропанол», «СНР-бутанол» и «СНР-

ацетон». Данные вещества широко применяются в промышленности, синтезируются в больших объёмах, обладают приемлемой стоимостью и достаточной теплотворной способностью.

Выбор оптимальных по составу ВСОК и режимов плазмохимического синтеза оксидных композиций урана и тория в воздушной плазме проведем путем компьютерного термодинамического моделирования.

2.1 Моделирование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций урана и тория

Моделирование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций урана и тория предполагает:

— расчёт показателей горения водно-солеорганических композиций (ВСОК) на основе смесевых нитратных растворов урана и тория (СНР).

Выбор составов горючих ВСОК с низшей теплотой сгорания $Q_H^p \geq 8,4$ МДж/кг;

— термодинамический расчёт процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций урана и тория из горючих ВСОК и оценка удельных энергозатрат на исследуемый процесс. Выбор оптимальных режимов для практической реализации процесса;

2.1.1 Расчёт показателей горения водно-органических композиций на основе нитратных растворов урана и тория

Жидкими горючими композициями считают композиции с низшей теплотой сгорания более 8,4 МДж/кг [24]. Теплота сгорания горючей водно-солеорганической композиции рассчитывается как теплота сгорания влажного топлива Q_H^p (МДж/кг):

$$Q_H^p = \frac{(100-W-A) \cdot Q_H^c}{100} - \frac{2,5 \cdot W}{100}, \quad (2.1)$$

где Q_H^c – низшая теплота сгорания горючих компонентов композиции, МДж/кг;

W – содержание воды, A – негорючих минеральных веществ в композиции, %;

Коэффициент 2,5 учитывает скрытую теплоту испарения воды при 0 °С, МДж/кг.

Жидкие композиции могут становятся горючими при различных теплотах сгорания - в зависимости от теплоты сгорания горючих компонентов и классу соединений к которым они принадлежат.

Требование достижения значения показателя $Q_H^p \geq 8,4$ МДж/кг для того чтобы смесь считалась горючей, является завышенным для большого числа используемых в промышленности композиций, содержащих горючие компоненты с низкими значениями Q_H^c , но с высокой жаропроизводительностью.

Более показательной характеристикой горючести жидких горючих смесей является адиабатическая температура горения:

$$T_{\text{а.д.}} = \frac{Q_H^p + c_{\text{отх}} \cdot t_{\text{отх}} + \alpha \cdot \vartheta_{\text{ок}}^0 \cdot c_{\text{ок}} \cdot t_{\text{ок}}}{\vartheta \cdot c + \frac{W \cdot c_W}{100} + \frac{A \cdot c_A}{100}} \quad (2.2)$$

где $c_{\text{отх}}$ – средняя массовая теплоемкость жидкой композиции, кДж/(кг·град);

$t_{\text{отх}}$ – температура жидкой композиции, °С;

α – коэффициент расхода окислителя;

$\vartheta_{\text{ок}}^0$ – теоретический расход окислителя, м³/м³;

$c_{\text{ок}}$ – средняя теплоемкость окислителя, (кДж/м³/град);

$t_{\text{ок}}$ – температура окислителя, °С;

ϑ и c – выход и средняя объемная теплоемкость продуктов сгорания горючих компонентов композиции соответственно, м³/кг и МДж/(м³·град);

В наших расчетах будем использовать несколько видоизмененную формулу:

$$T_{\text{а.д.}} = \frac{Q_H^p + c_{\text{отх}} \cdot t_{\text{отх}} + \alpha \cdot \vartheta_{\text{ок}}^0 \cdot c_{\text{ок}} \cdot t_{\text{ок}}}{\vartheta \cdot c}, \quad (2.3)$$

Опыты по сжиганию жидких горючих композиций некоторых

органических веществ показали, что полное и достаточное их сгорание в камерах с незначительными потерями тепла в окружающую среду наблюдается при $T_{ад} \geq 1200$ °С, причем такая температура необходима и достаточна для самостоятельного горения таких композиций [23].

Приведенные выше формулы были использованы для проведения расчетов теплоты сгорания влажного топлива Q_H^p (МДж/кг), адиабатической температуры горения $T_{ад}$ (°С) для различных водно-солеорганических композиций на основе смесевых нитратных растворов урана и тория.

В таблице 2.4 приведены значения низшей теплотворной способности Q_H^c выбранных нами горючих компонентов.

Таблица 2.4 – Физические параметры веществ [23]

Параметр	Вещество				
	Метанол	Этанол	Пропанол	Бутанол	Ацетон
$Q_{нс}$, МДж/кг	19,950	26,800	31,38	33,472	31,54
$T_{с.в.}$, К	658	619	673	618	738
$T_{вспышки.}$, К	284	285	285	302	254

Введем обозначение ВСОК-1 – для топлива содержащего 10% U-235, ВСОК-3 – для топлива содержащего 30% U-235.

Результаты расчетов теплоты сгорания влажного топлива Q_H^p (МДж/кг) представлены в таблицах:

- Б1 (Приложение Б) для ВСОК-1;
- Б2 (Приложение Б) для ВСОК-3.

Оптимальные соотношения между компонентами в водно-солеорганической композиции, полученные по результатам проведенных расчетов, представлены в таблицах 2.5 и 2.6.

Анализ расчетных данных показывает, что приготовление горючих ВСОК при использовании различных горючих компонентов приводит к изменению оптимального соотношения между горючими и негорючими компонентами. Так, в ряду метилового, этилового, пропилового и бутилового

спиртов и ацетона на приготовление горючей композиции меньше всего потребуется бутилового спирта – 27 % от общего состава композиции (ВСОК{1,3}.4). Однако, из литературных источников известно, что бутиловый спирт плохо растворяется в воде и для приготовления горючей ВСОК и придется дополнительно использовать миксеры для получения устойчивых гомогенных эмульсий. В то же время, при увеличении содержания горючего компонента до 29%, можно использовать пропиловый спирт (ВСОК{1,3}.4) или ацетон (ВСОК{1,3}.5), обладающих хорошей взаимной растворимостью с водой и водно-солевыми растворами. Немногом более (34 %) потребуется этанола (ВСОК{1,3}.2). При использовании в качестве горючего метанола (ВСОК{1,3}.1), доля спирта в оптимальной композиции увеличивается до 45%.

Таблица 2.5 – Оптимальные соотношения между компонентами ВСОК-1

Название горючего компонента	ВСК/(Спирт +ВСК)	Соль, % масс.		H ₂ O, % масс.	Спирт, % масс.	Наименование
		UO ₂ (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ ·6H ₂ O			
1) Метанол	0,550	0,030	0,327	0,193	0,450	ВСОК-1.1
2) Этанол	0,660	0,036	0,393	0,231	0,340	ВСОК-1.2
3) Пропанол	0,710	0,039	0,423	0,249	0,290	ВСОК-1.3
4) Бутанол	0,730	0,040	0,434	0,256	0,270	ВСОК-1.4
5) Ацетон	0,710	0,039	0,423	0,249	0,290	ВСОК-1.5

Таблица 2.6 – Оптимальные соотношения между компонентами ВСОК-3

Название горючего компонента	ВСК/ (Спирт+ВСК)	Соль, % масс.		H ₂ O, % масс.	Спирт, % масс.	Наименование
		UO ₂ (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ ·6H ₂ O			
1) Метанол	0,550	0,094	0,264	0,193	0,450	ВСОК-3.1
2) Этанол	0,660	0,113	0,316	0,231	0,340	ВСОК-3.2
3) Пропанол	0,710	0,121	0,340	0,249	0,290	ВСОК-3.3
4) Бутанол	0,730	0,124	0,350	0,256	0,270	ВСОК-3.4
5) Ацетон	0,710	0,121	0,340	0,249	0,290	ВСОК-3.5

2.1.2 Расчёт равновесных составов продуктов плазменной переработки водно-органических композиций на основе смесевых нитратных растворов урана и тория

Расчет равновесных составов газообразных и конденсированных

продуктов плазменной переработки проводился при помощи программной системы для моделирования фазовых и химических равновесий в плазмохимических системах TERRA.

Моделирование процессов проводилось при атмосферном давлении (0,1 МПа), в диапазоне температур (300÷4000 К) и массовой долей воздуха в реакторе плазмотрона (10÷90) %. При этом, для каждой горючей ВСОК, представленной в таблицах 2.5 и 2.6 подбиралась такая минимальная массовая доля воздуха, которая обеспечивала максимально возможное окисление органического растворителя (ацетон, спирт). а также соблюдение условия $T_{ад} \geq 1200$ °С для такой композиции.

В таблицах Б3 и Б4 приложения Б представлены результаты расчетов составов композиций ВСОК-1.1, ВСОК-3.1.

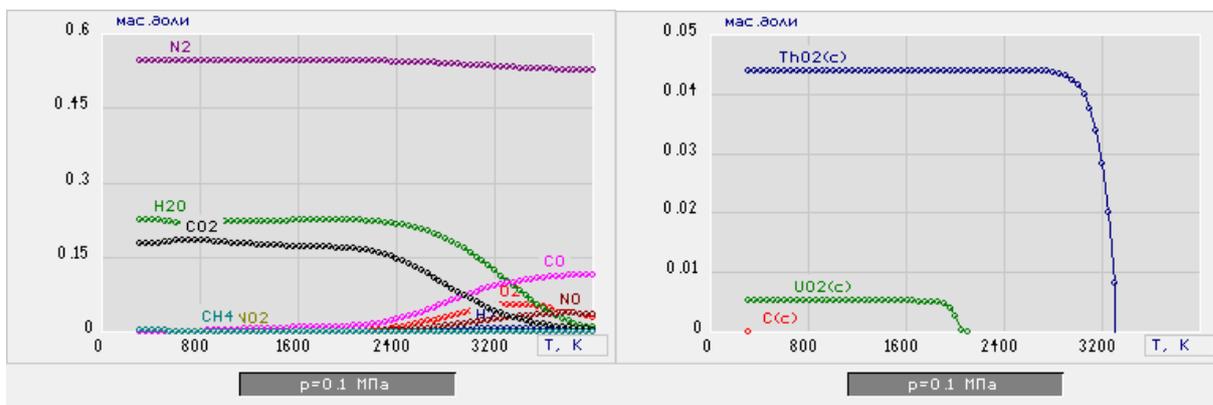
Данные таблиц Б3 и Б4 указывают на то, что для ВСОК-1.1 и ВСОК-3.1 обеспечение требуемого условия $T_{ад} \geq 1200$ °С достигается при массовой доле воздуха, равной 70 %, и 30 % ВСОК. При массовых долях воздуха менее 70% воздуха условие $T_{ад} \geq 1200$ °С уже не выполняется. При массовых долях воздуха более 70% воздуха только снижает производительности процесса.

В таблице 2.7 представлены оптимальные показатели горения ВСОК-1.1 и ВСОК-3.1 в воздушной плазме.

Таблица 2.7 – Оптимальные показатели горения ВСОК-1.1 и ВСОК-3.1 в воздушной плазме

ВСОК	ВСОК, % масс.	Воздух, % масс.	$\nu_{уд}$	$\epsilon_{уд}$	$T_{ад}$, °С
ВСОК-1.1	30	70	4,546	0,002	1269,097
ВСОК-3.1	30	70	4,549	0,0015	1268,647

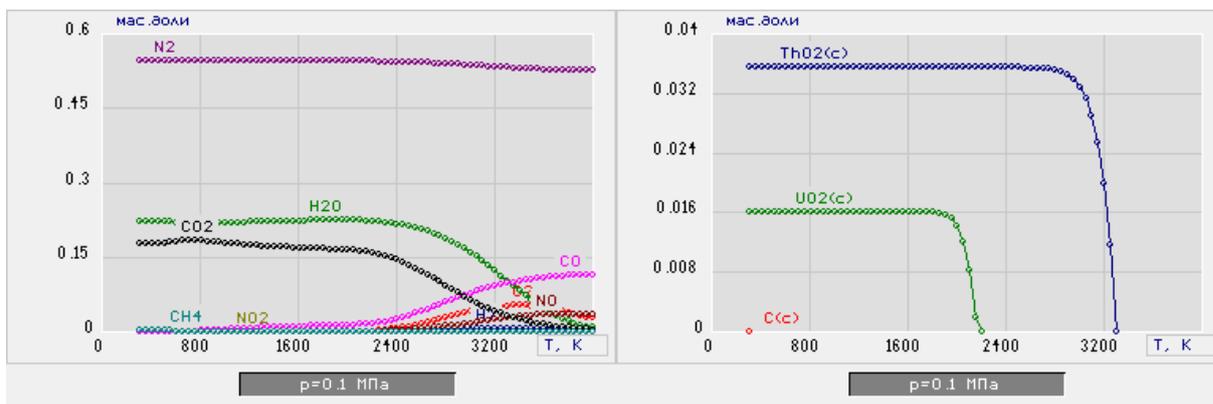
На рисунках 2.1 и 2.2 представлены характерные равновесные составы основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной переработки водно-солеорганических композиций ВСОК-1.1 и ВСОК-3.1 при массовой доле воздуха 70 %.



а)

б)

Рисунок 2.1 – Равновесный состав газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной переработки ВСОК-1.1 в воздушной плазме: (70 % Воздух: 30 % ВСОК- 1.1)



а)

б)

Рисунок 2.2 – Равновесный состав газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной переработки ВСОК-3.1 в воздушной плазме: (70 % Воздух: 30 % ВСОК- 3.1)

Из анализа представленных графиков следует, что при плазменной обработке ВСОК-1.1 и ВСОК-3.1 с массовой долей воздуха 70 % основными газообразными продуктами при температурах до 2000 К являются N_2 , CO_2 , и H_2O , а в конденсированной фазе образуются требуемые целевые продукты в виде диоксида урана и диоксида тория. Отсутствие сажи $C(c)$ и низкое содержание CO , NO и NO_2 указывает на то, что процесс идет в оптимальном режиме с получением требуемых целевых продуктов.

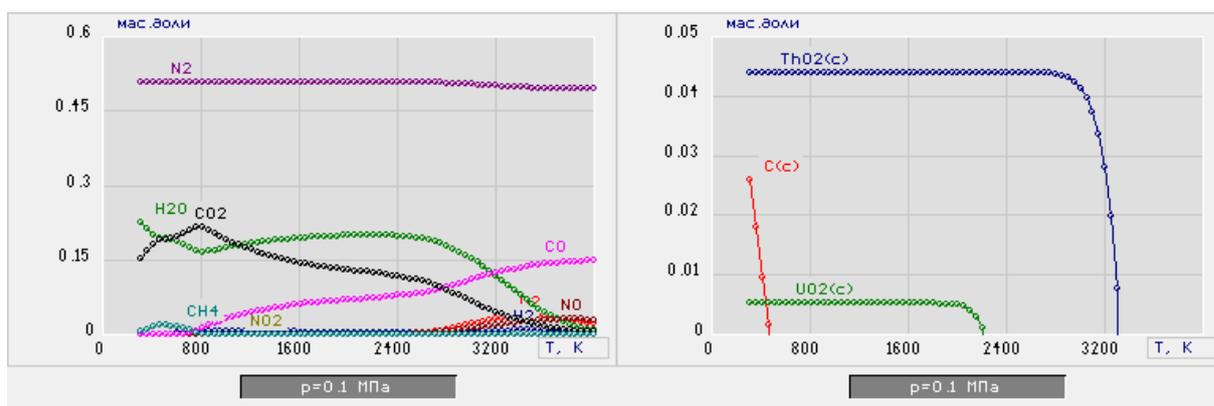
В таблицах Б5 и Б6 приложения Б представлены результаты расчетов составов композиций ВСОК-1.2, ВСОК-3.2.

В таблице 2.8 представлены оптимальные показатели горения ВСОК-1.2 и ВСОК-3.2 в воздушной плазме.

Таблица 2.8 – Оптимальные показатели горения ВСОК-1.2 и ВСОК-3.2 в воздушной плазме

ВСОК	ВСОК, об. доли	Воздух, об. доли	$u_{уд}$	$c_{уд}$	Тад, °С
ВСОК-1.2	30	0,700	4,797	0,002	1191,701
ВСОК-3.2	30	0,700	4,800	0,0016	1191,263

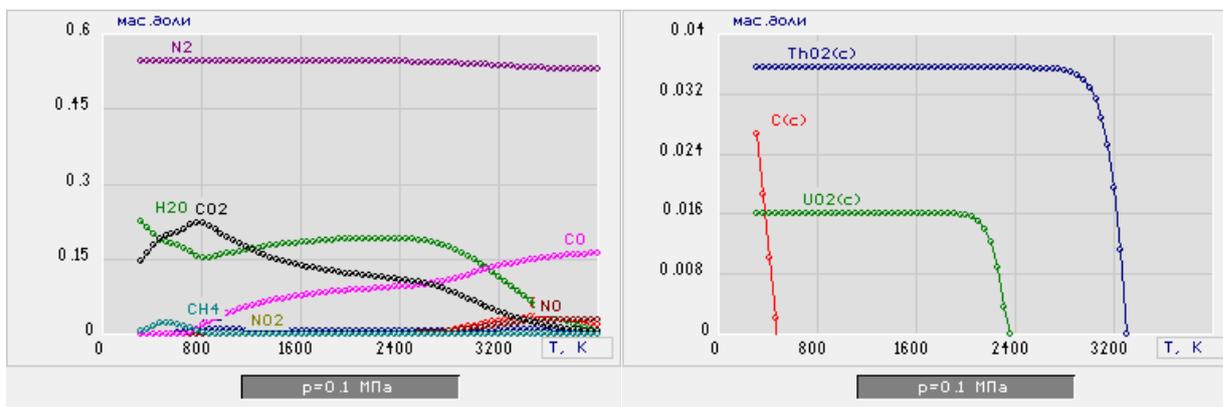
На рисунках 2.3 и 2.4 представлены характерные равновесные составы основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной переработки водно-солеорганических композиций ВСОК-1.2 и ВСОК-3.2 в воздушной плазме при массовой доле воздуха 70 %.



а)

б)

Рисунок 2.3 – Равновесный состав газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной переработки ВСОК-1.2 в воздушной плазме: (70 % Воздух: 30 % ВСОК- 1.2)



а)

б)

Рисунок 2.4 – Равновесный состав газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной переработки ВСОК-3.2 в воздушной плазме: (70 % Воздух: 30 % ВСОК- 3.2)

Из анализа представленных графиков следует, что при плазменной обработке ВСОК-1.2 и ВСОК-3.2 с массовой долей воздуха 70 % основными газообразными продуктами при температурах до 2000 К являются N_2 , CO_2 , и H_2O , а в конденсированной фазе образуются требуемые целевые продукты в виде диоксида урана и диоксида тория. Отсутствие сажи $C(c)$ и низкое содержание CO указывает на то, что процесс идет в оптимальном режиме при температурах (1000÷2000) К с получением требуемых целевых продуктов.

Для горючих композиций с использованием пропанола, бутанола и ацетона (ВСОК-3, ВСОК-4, ВСОК-5) в качестве горючих компонентов такие нежелательные эффекты сохраняются.

В таблицах Б7 и Б8 приложения Б представлены результаты расчетов составов композиций ВСОК-1.3 и ВСОК-3.3.

Таблица 2.9 – Оптимальные показатели горения ВСОК-1.3 и ВСОК-3.3 в воздушной плазме

ВСОК	ВСОК, об. доли	Воздух, об. доли	$u_{уд}$	$c_{уд}$	$T_{ад}$, °С
ВСОК-1.3	25	0,75	4,678	0,0015	1251,483
ВСОК-3.3	25	0,75	4,683	0,0015	1249,957

На рисунках 2.5 и 2.6 представлены характерные равновесные составы основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной переработки водно-солеорганических композиций ВСОК-1.3 и ВСОК-3.3 при массовой доле воздуха 75 %.

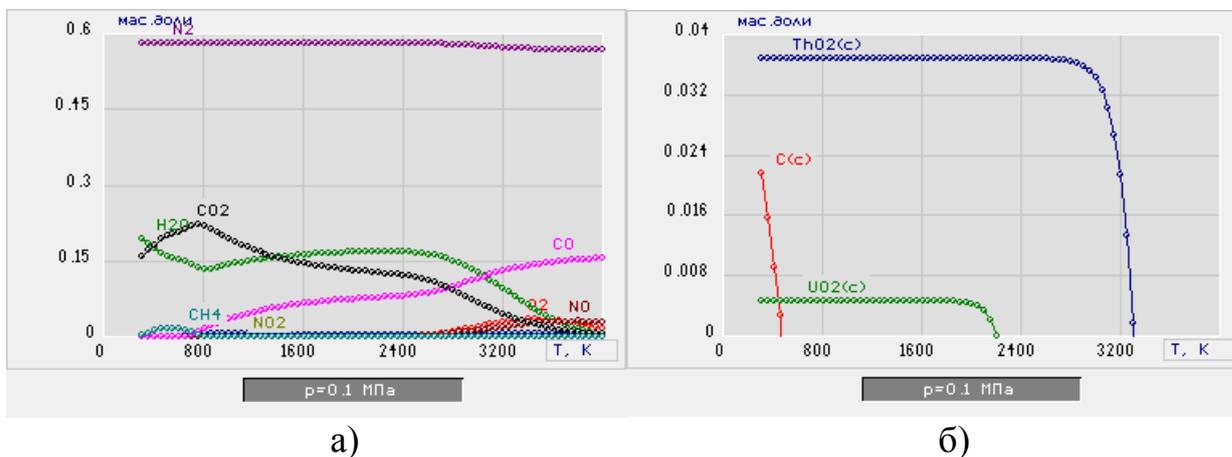


Рисунок 2.5 – Равновесный состав газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной переработки водно-солеорганических композиций ВСОК-1.3 в воздушной плазме: (75 % Воздух : 25 % ВСОК-1.3)

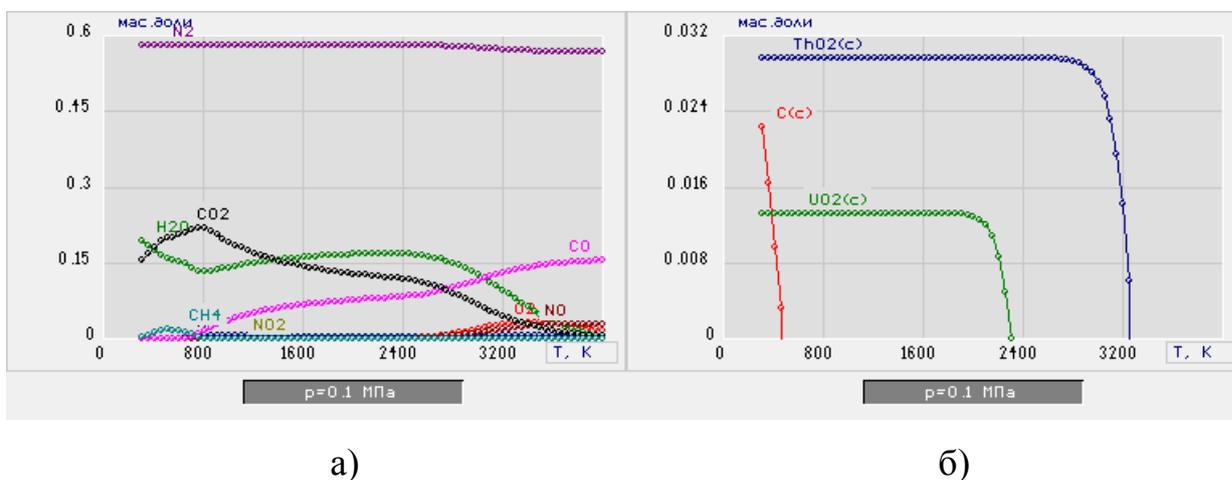


Рисунок 2.6 – Равновесный состав газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной переработки водно-солеорганических композиций ВСОК-3.3 в воздушной плазме: (75 % Воздух : 25 % ВСОК-3.3).

Из анализа представленных графиков следует, что при плазменной обработке ВСОК-1.3 и ВСОК-3.3 с массовой долей воздуха 75 % основными газообразными продуктами при температурах до 2000 К являются N₂, CO₂, и

H_2O , а в конденсированной фазе образуются требуемые целевые продукты в виде диоксида урана и диоксида тория. Отсутствие сажи $C(s)$ и низкое содержание CO указывает на то, что процесс идет в оптимальном режиме при температурах (1000÷2000) К с получением требуемых целевых продуктов.

В таблицах Б9 и Б10 приложения Б представлены результаты расчетов составов горючих композиций ВСОК-1.4 и ВСОК-3.4.

Таблица 2.10 – Оптимальные показатели горения ВСОК-1.4 и ВСОК-3.4 в воздушной плазме

ВСОК	ВСОК, об. доли	Воздух, об. доли	$u_{уд}$	$c_{уд}$	Тад, °С
ВСОК-1.4	25	0,75	4,7457	0,001509	1219,068
ВСОК-3.4	25	0,75	4,7512	0,001509	1217,576

На рисунках 2.7 и 2.8 представлены характерные равновесные составы основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной переработки водно-солеорганических композиций ВСОК-1.4 и ВСОК-3.4 при массовой доле воздуха 75 %.

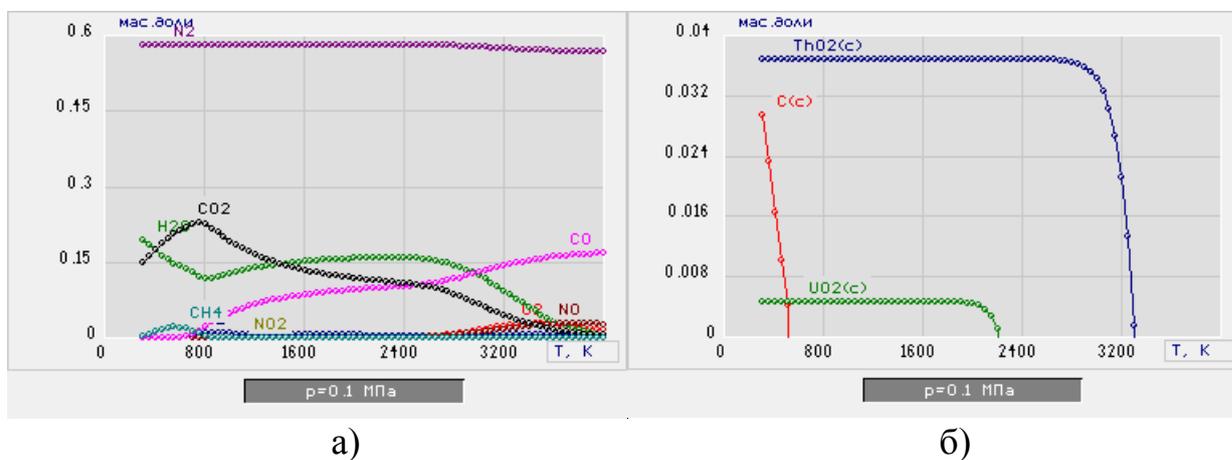
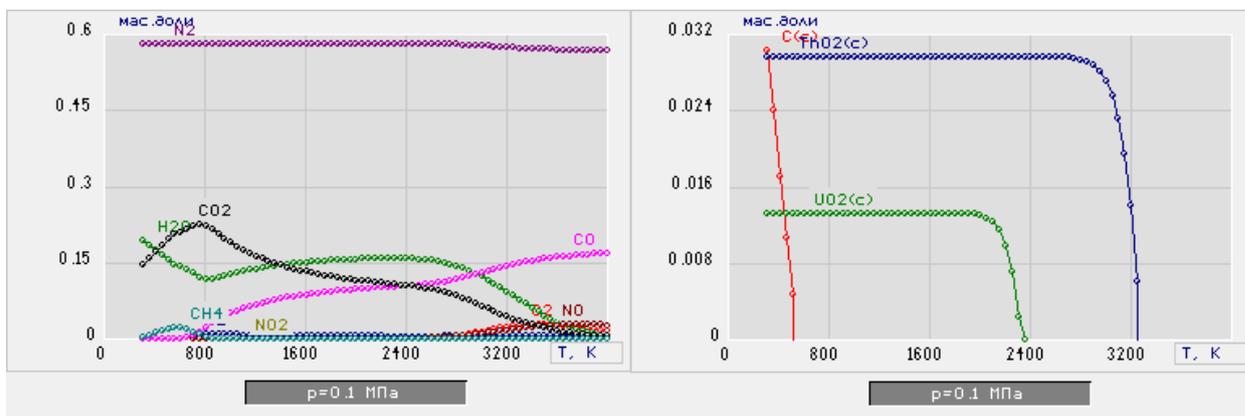


Рисунок 2.7 – Равновесный состав газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной переработки водно-солеорганических композиций ВСОК-1.4 в воздушной плазме: (75 % Воздух : 25 % ВСОК-1.4).



а)

б)

Рисунок 2.8 – Равновесный состав газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной переработки водно-солеорганических композиций ВСОК-3.4 в воздушной плазме (75 % Воздух : 25 % ВСОК-3.4).

Из анализа представленных графиков следует, что при плазменной обработке ВСОК-1.4 и ВСОК-3.4 с массовой долей воздуха 75 % основными газообразными продуктами при температурах до 2000 К являются N_2 , CO_2 , и H_2O , а в конденсированной фазе образуются требуемые целевые продукты в виде диоксида урана и диоксида тория. Отсутствие сажи $C(s)$ и низкое содержание CO указывает на то, что процесс также идет в оптимальном режиме при температурах (1000÷2000) К с получением требуемых целевых продуктов.

В таблицах Б11 и Б12 приложения Б представлены результаты расчетов составов горючих композиций ВСОК-1.5 и ВСОК-3.5.

Таблица 2.11 – Оптимальные показатели горения ВСОК-1.4 и ВСОК-3.4 в воздушной плазме

ВСОК	ВСОК, об. доли	Воздух, об. доли	$u_{уд}$	$c_{уд}$	$T_{ад}, ^\circ C$
ВСОК-1.4	30	0,700	4,709	0,002	1247,631
ВСОК-3.4	30	0,700	4,7117	0,001507	1247,167

На рисунках 2.9 и 2.10 представлены характерные равновесные составы основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов

плазменной переработки водно-солеорганических композиций ВСОК-1.5 и ВСОК-3.5 при массовой доле воздуха 70 %.

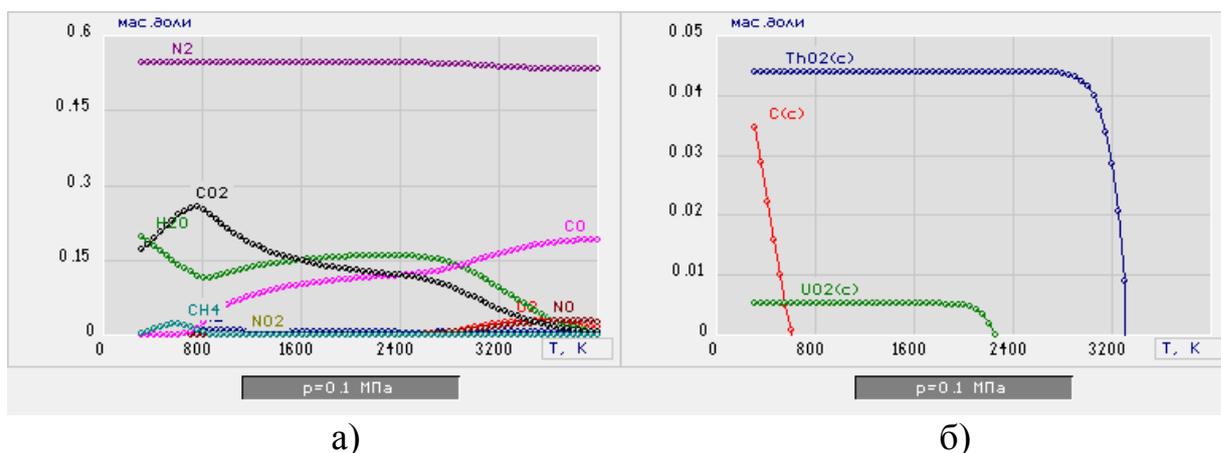


Рисунок 2.9 – Равновесный состав газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной переработки водно-солеорганических композиций ВСОК1.5 в воздушной плазме (70 % Воздух : 30 % ВСОК1.5)

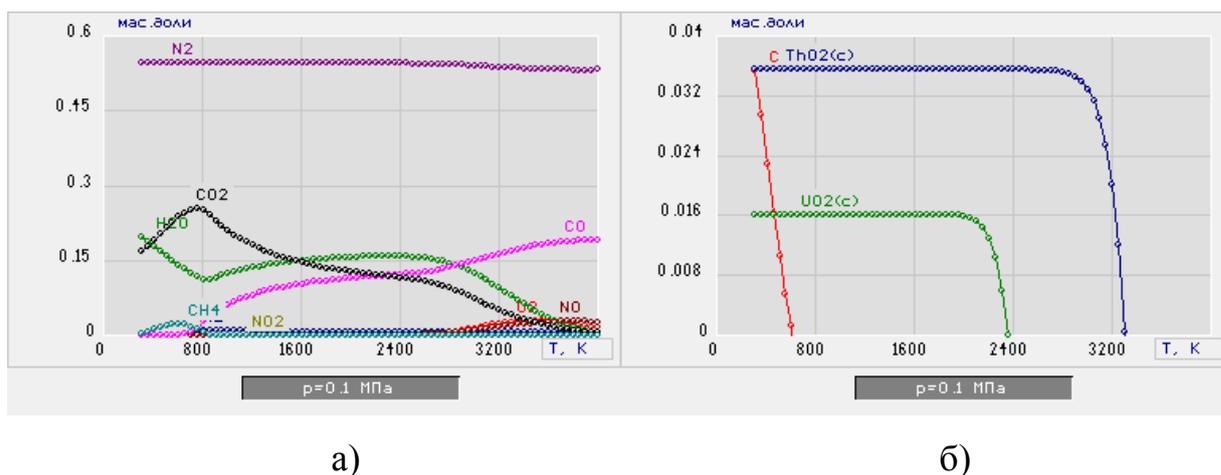


Рисунок 2.10 – Равновесный состав газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной переработки водно-солеорганических композиций ВСОК3.5 в воздушной плазме (70 % Воздух : 30 % ВСОК3.5).

Из анализа представленных графиков следует, что при плазменной обработке ВСОК-1.5 и ВСОК-3.5 с массовой долей воздуха 70 % основными газообразными продуктами при температурах до 2000 К являются N₂, CO₂, и H₂O, а в конденсированной фазе образуются требуемые целевые продукты в виде диоксида урана и диоксида тория. Отсутствие сажи C(s) и низкое содержание CO указывает на то, что процесс также идет в оптимальном

режиме при температурах (1000÷2000) К с получением требуемых целевых продуктов.

2.1.3 Оценка удельных энергозатрат на процесс плазменной переработки смесевых нитратных растворов урана и тория

На рисунке Б1 приложения Б представлены зависимости удельных энергозатрат от рабочей температуры (весь диапазон температур) для плазменной переработки горючих водно-солеорганических композиций ВСОК-1.{1-5} и ВСОК-3.{1-5} при оптимальной массовой доле воздушного теплоносителя. Удельные энергозатраты на исследуемый процесс для температур (1500±200) К представлены на рисунке 2.11.

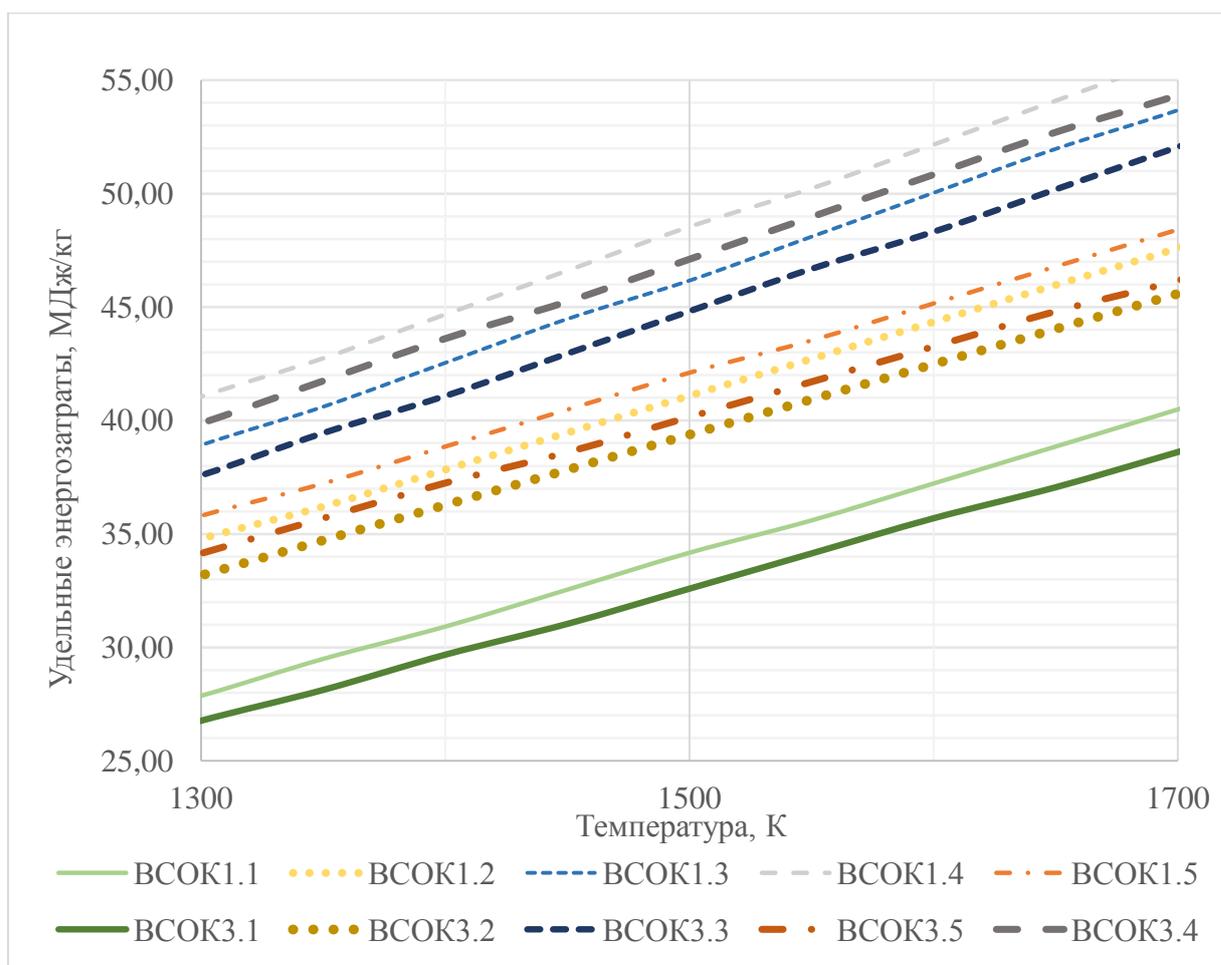


Рисунок 2.11 - Зависимость удельных энергозатрат от рабочей температуры

Анализ данных графиков показывает, что удельные энергозатраты на

получение оксидных композиций урана и тория из ВСОК возрастают от ВСОК- $\{1,3\}$.1 до ВСОК- $\{1,3\}$.5. Минимальные удельные энергозатраты достигаются при использовании ВСОК-1.1 и ВСОК-3.1, т.е. смесей, горючим компонентом в которых является метанол. Наибольшие удельные энергозатраты достигаются при использовании ВСОК на основе пропанола и бутанола.

Таблица 2.9 – Удельные энергозатраты на процесс для ВСОК-1 и ВСОК-3

Название спирта	Обозначение ВСОК	Энергозатраты, МДж/кг	Обозначение ВСОК	Энергозатраты, МДж/кг
1) Метанол	ВСОК-1.1	34	ВСОК-3.1	32,5
2) Этанол	ВСОК-1.2	41	ВСОК-3.2	39
3) Пропанол	ВСОК-1.3	46	ВСОК-3.3	45
4) Бутанол	ВСОК-1.4	49	ВСОК-3.4	47
5) Ацетон	ВСОК-1.5	42	ВСОК-3.5	40

2.2 Обсуждение результатов

Ранее, в пункте 2.1.1, отмечалось, что несмотря на более высокую теплотворную способность бутанола по сравнению с другими горючими компонентами и его невысокую массовую долю в ВСОК (27%), его использование, скорее всего, будет нецелесообразным. К рассмотрению в качестве горючего компонента были предложены этанол (требуемое содержание 34%), пропанол и ацетон (требуемое содержание 34% и 29% соответственно). Отмечено, что при использовании метанола, его массовая доля для приготовления горючей ВСОК должна быть доведена до 45%.

Дальнейшие исследования показали, что для всех ВСОК, кроме ВСОК- $\{1,3\}$.1, одним из продуктов плазменной обработки этих композиций является сажа С(с), что является нежелательным, т.к. получаемый оксидный порошок может потребовать дополнительных операций по очистке.

Анализ полученных удельных энергозатрат для плазменной переработки оптимальных ВСОК показал, что наименьшие энергозатраты будут наблюдаться при переработке ВСОК на основе метанола – 33 МДж/кг.

Ближайшим конкурентом по энергозатратами является этанол (39 МДж/кг).

Исследование рынка спиртов показало, что метиловый спирт стоит, в среднем, в 3-4 раза дешевле всех остальных.

Таким образом, с учетом всего вышеизложенного, считаю, что наиболее оптимальным вариантом для получения высокодисперсных порошков оксидных композиций урана и тория являются водно-солеорганические композиции ВСОК-{1,3}.1 на основе метанола.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Описание плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона

Эксперименты по получению порошков оксидных композиций из модельных СНР проводились на плазменном стенде. Стенд предназначен для проведения исследований процессов плазменной обработки различных водно-солевых растворов в условиях воздушной плазмы ВЧФ-разряда в виде диспергированных ВСОК. Схема плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона представлена на рисунке Б2 приложения Б.

От высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01 (рабочая частота 13.56 МГц, колебательная мощность до 60 кВт) по коаксиальному выводу 6 осуществляется передача высокочастотной энергии на водоохлаждаемый медный электрод 4 ВЧФ-плазмотрона 3, предназначенного для генерирования потоков воздушной плазмы со среднемассовой температурой до 4000 К. Разрядная камера ВЧФ-плазмотрона представляет собой трубку из кварцевого стекла диаметром 50 мм и длиной 860 мм [11].

Высоконапорный вытяжной вентилятор 9 осуществляет прокачку воздуха через ВЧФ-плазмотрон 3 и реактор плазменного стенда.

На входе в ВЧФ-плазмотрон установлен импеллер с постоянной входной площадью $S_{\text{ип}}=25 \text{ см}^2$, предназначенный для закрутки поступающего плазмообразующего газа (воздуха) в разрядную камеру,

На входе в реактор установлен импеллер 7, также служащий для закрутки поступающего в реактор воздуха. Входная площадь импеллера реактор $S_{\text{имп}}$ может регулироваться при помощи шибера, в пределах (0÷1650 см^2).

Для определения содержания загрязняющих веществ (СО, NO, NO₂) в отходящих после реактора газах служит газоанализатор 11 с пробоотборником 12. Используемый газоанализатор «Quintox» КМ 9106 также позволяет с помощью трубки Пито измерять напор набегающего воздушного потока в воздуховодах и определять его скорость и расход.

Высокоточный цифровой пирометр 14 марки IPE 140/145 предназначен для бесконтактного измерения в реакторе рабочей температуры плазменного горения диспергированных ВСОК в воздушно-плазменном потоке.

3.2 Определение расходов воздушного теплоносителя через ВЧФ-плазмотрон и газоход

Измерение расхода воздуха через разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона и газоход после узла «мокрой» очистки отходящих из реактора газов проводилось с помощи трубки Пито.

Трубка Пито измеряет напор f , создаваемый набегающим потоком, наприме, воздухом. Известна формула:

$$f = (\rho V^2)/2 = P_{\text{п}} - P_{\text{ст}} \quad (3.1)$$

где $P_{\text{п}}$ – полное давление, Па;

$P_{\text{ст}}$ – статическое давление, Па;

ρ – плотность воздуха при температуре T , кг/м³;

$f = (\rho V^2)/2$ – напор, создаваемый набегающим потоком воздуха.

Преобразовав формулу 3.1, выразим скорость набегающего потока V :

$$V = [2 \cdot (P_{\text{п}} - P_{\text{ст}}) / \rho]^{0,5}. \quad (3.2)$$

Искомое значение объёмного расхода воздуха через воздуховод вычисляется по формуле:

$$Q = S \cdot V, \quad (3.3)$$

где S – площадь поперечного сечения воздуховода.

Экспериментальные результаты проведенных измерений и расчетов представлены в таблицах Б13 и Б14 приложения Б.

На основании этих данных построены зависимости расхода плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон ($Q_{\text{пт}}$), а также воздушного теплоносителя через газоход ($Q_{\text{гхд}}$) от входной площади импеллера реактора. Влияние входной площади импеллера реактора на объемные расходы воздуха через ВЧФ-плазмотрон и газоход представлено на рисунках 3.1 и 3.2,

а на массовые расходы – на рисунках Б4 и Б5 приложения Б.

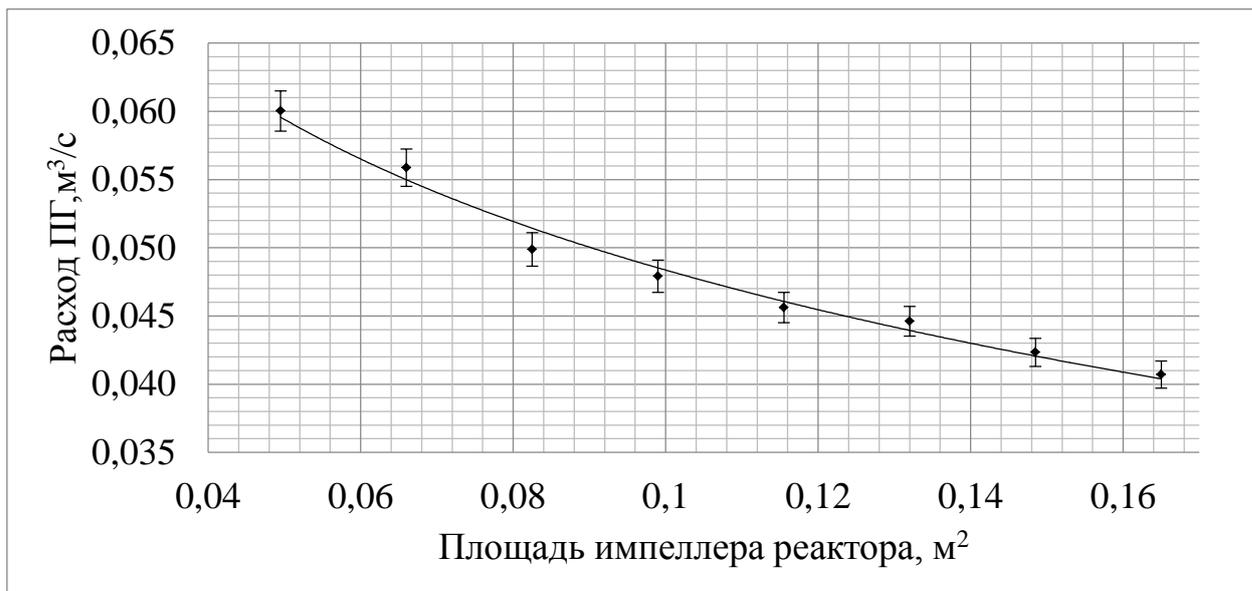


Рисунок 3.1 – Влияние входной площади импеллера реактора на объемный расход плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон

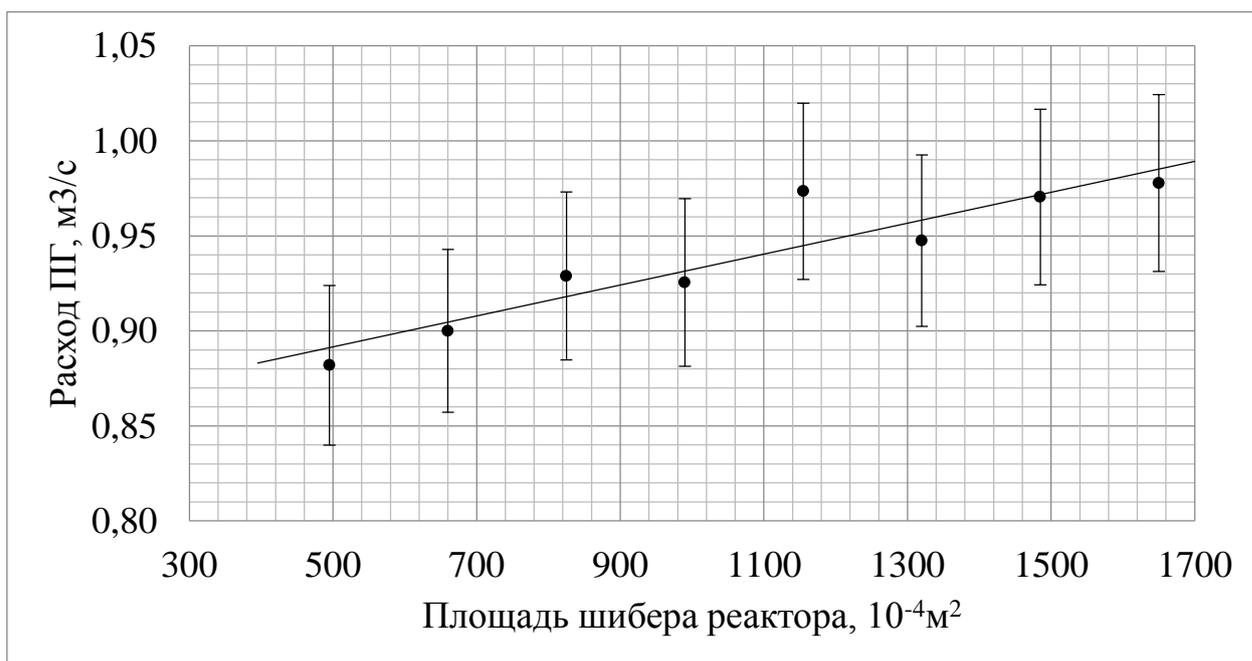


Рисунок 3.2 – Влияние входной площади импеллера реактора на объемный расход плазмообразующего газа через газоход

Данные таблиц и полученных графиков позволят в дальнейшем, судить о зависимости расхода плазмообразующего газа через реактор ВЧФ-

плазмотрона.

3.3 Определение расходов воздушного теплоносителя через реактор

Расход газа через реактор определялся косвенным образом. Для расчета расхода воздуха через реактор использовалось следующее выражение:

$$Q_p = Q_{\text{гхд}} - Q_{\text{птр}} \quad (3.2)$$

где Q_p – расход воздушного теплоносителя через реактор, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Q_{\text{гхд}}$ – расход воздушного теплоносителя через газоход, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Q_{\text{птр}}$ – расход плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон, $\text{м}^3/\text{с}$.

В результате расчетов получены зависимости расходов воздушного теплоносителя через реактор плазменного стенда в зависимости от входной площади импеллера реактора. Полученные зависимости представлены на рисунках 3.3 и 3.4.

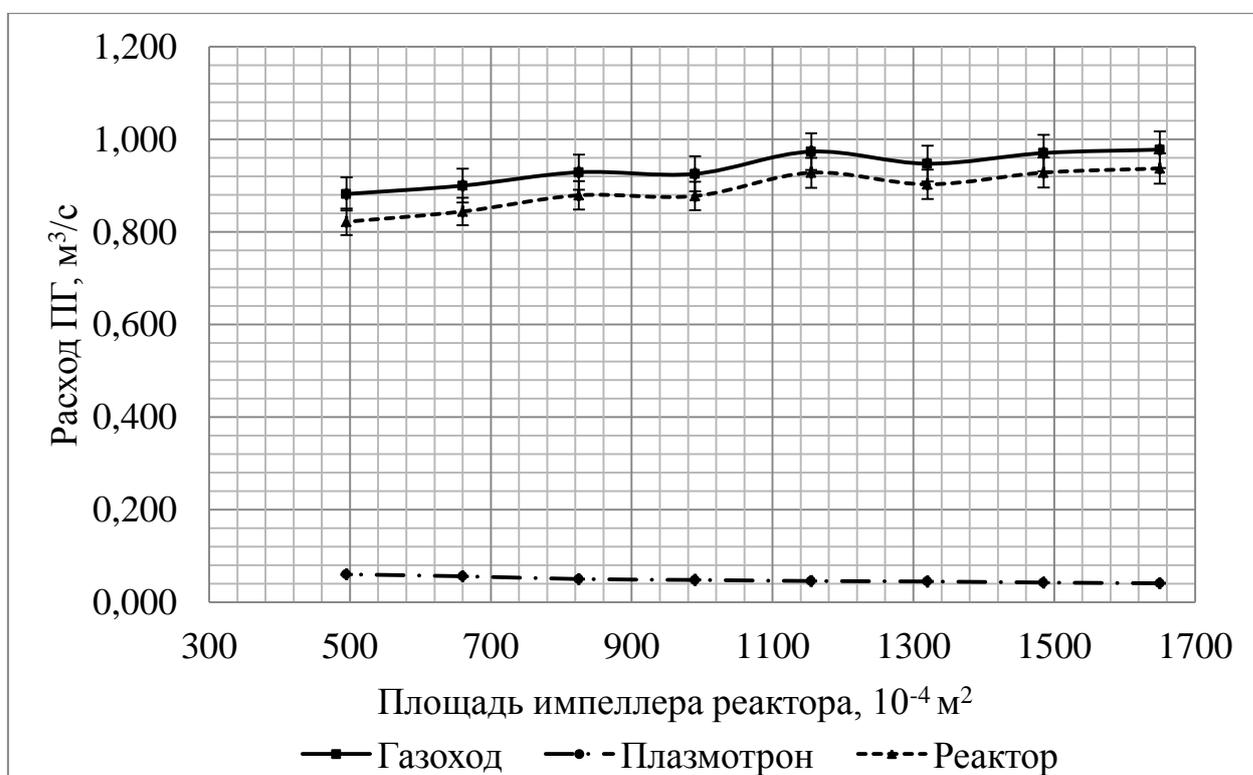


Рисунок 3.3 – Влияние входной площади импеллера реактора на объемный

расход воздушного теплоносителя через реактор

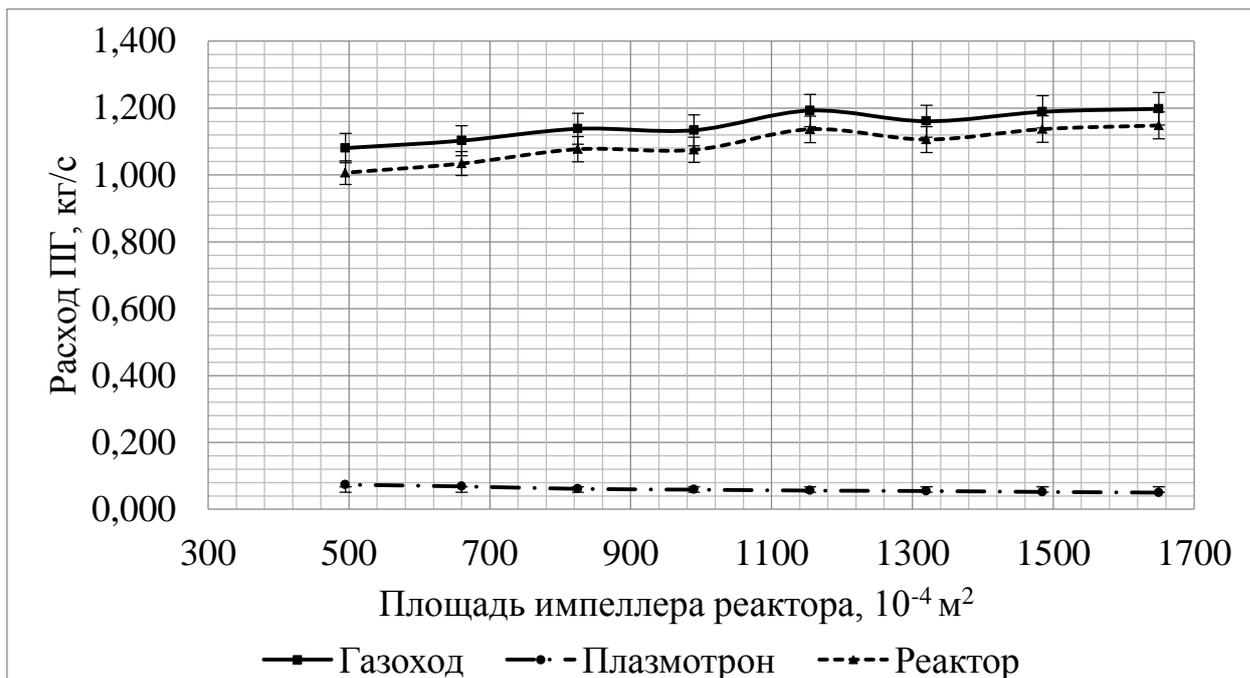


Рисунок 3.4 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход через реактор

Полученные зависимости позволяют за счет изменения шибером входной площади импеллера реактора осуществлять плавную регулировку расхода воздушного теплоносителя через реактор и плазмотрон.

3.4 Исследование режимов работы плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона

Исследования заключались в измерении потерь тепловой мощности на водоохлаждаемых теплонапряженных элементах ВЧ генератора (анод генераторной лампы, сеточная индуктивность) и ВЧФ-плазмотрона (электрод, корпус) и определении теплофизических параметров плазменного стенда (КПД, энтальпия и температура воздушной плазменной струи и др.).

Расчетные соотношения представлены ниже.

Электрическая мощность, потребляемая ВЧ генератором от сети:

$$P_o = I_a \cdot U_a, \text{ кВт}, \quad (3.3)$$

где I_a – ток анода А;

U_a – напряжение на аноде генераторной лампы, кВ.

Тепловая мощность, рассеиваемая на аноде генераторной лампы:

$$P_a = m_a \cdot C_p \cdot \Delta t_a \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (3.4)$$

где m_a – массовый расход воды, кг/с;

Δt_a – изменение температуры охлаждающей воды, °С;

C_p – теплоемкость воды, ккал/кг·°С.

Тепловая мощность, рассеиваемая на сеточной индуктивности:

$$P_c = m_c \cdot C_p \cdot \Delta t_c \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (3.5)$$

где m_c – массовый расход воды, кг/с;

Δt_c – изменение температуры охлаждающей воды, °С;

C_p – теплоемкость воды, ккал/кг·°С.

Тепловая мощность, рассеиваемая на электроде:

$$P_{эл} = m_{эл} \cdot C_p \cdot \Delta t_{эл} \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (3.6)$$

где $m_{эл}$ – массовый расход воды, кг/с;

$\Delta t_{эл}$ – изменение температуры охлаждающей воды, °С;

C_p – теплоемкость воды, ккал/кг·°С.

Тепловая мощность, рассеиваемая на корпусе плазмотрона:

$$P_{кп} = m_{кп} \cdot C_p \cdot \Delta t_{кп} \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (3.7)$$

где $m_{кп}$ – массовый расход воды, кг/с;

$\Delta t_{кп}$ – изменение температуры охлаждающей воды, °С;

C_p – теплоемкость воды, ккал/кг·°С.

Мощность ВЧФ-разряда рассчитывалась по формуле:

$$P_{разр} = P_0 - (P_a + P_c + P_{эл}), \text{ кВт} \quad (3.8)$$

Мощность плазменной струи определяется как разность между мощностью ВЧФ-разряда и мощностью, рассеиваемой на корпусе плазмотрона:

$$P_{стр} = P_{разр} - P_{кп}, \text{ кВт} \quad (3.9)$$

Энтальпия плазменной струи:

$$H_T = H_0 + \frac{P_{\text{разр}}}{Q_{\text{ПГ}}}, \text{ кДж/кг}, \quad (3.10)$$

где H_0 – энтальпия газовой смеси при температуре 300 К;

$Q_{\text{ПГ}}$ – массовый расход плазмообразующего газа, кг/с.

Коэффициент полезного действия ВЧФ-плазмотрона:

$$\eta_{\text{пд}} = \left(\frac{P_{\text{стр}}}{P_{\text{разр}}} \right) \cdot 100, \% \quad (3.11)$$

Установочный коэффициент полезного действия плазменного стенда:

$$\eta_{\text{уст}} = \left(\frac{P_{\text{стр}}}{P_0} \right) \cdot 100, \% \quad (3.12)$$

С помощью графической зависимости энтальпии воздуха от его температуры, представленной на рисунке Б3 приложения Б и расчетов вышеприведенных параметров, представленных в таблице Б16 приложения Б, определим температуру плазменной струи.

На рисунке 3.5 показано влияние входной площади импеллера реактора среднemasсовую температуру воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном (при анодных токах генератора $I_a=3,0$ А; 3,5 А; 4,0 А и ;4,5 А).

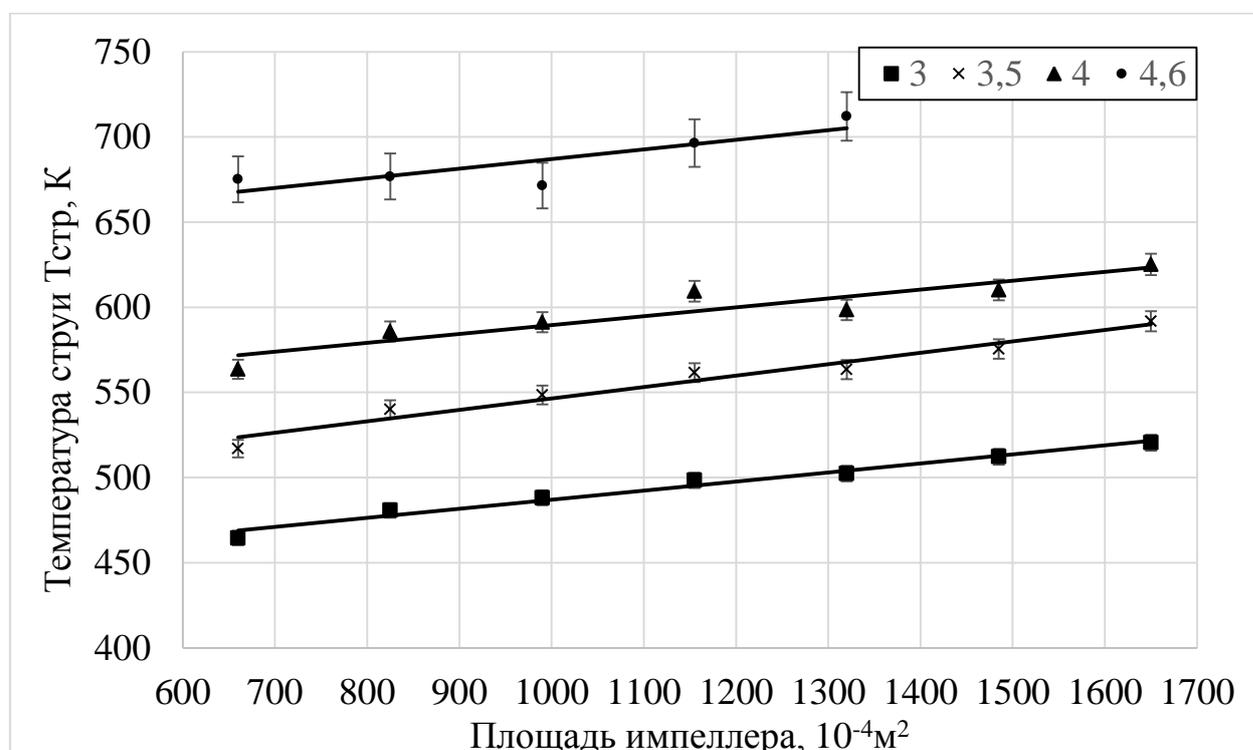


Рисунок 3.5 – Влияние входной площади импеллера реактора на

среднемассовую температуру воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном: ($I_a=3,0$ А; 3,5 А; 4,0 А и ;4,5 А)

Режим работы плазмотрона выбирается с таким расчетом, чтобы температура плазменной струи была не меньше температуры воспламенения горючего компонента перерабатываемой ВСОК.

3.5 Плазмохимическая переработка модельных ВСОК

Для подтверждения возможности прямого плазмохимического синтеза высокодисперсных порошков гомогенных оксидных композиций тория и урана в воздушно-плазменном потоке были проведены экспериментальные исследования на модельных смесевых нитратных растворах. Для подготовки модельных СНР были использованы соли цирконилнитрата $ZrO(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$ (аналог уранилнитрата) и нитрата иттрия $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ (аналог нитрата тория). Это обусловлено тем, что данные соединения, в растворах, формируют сложные ионы, сходные по свойствам. Нитрат иттрия выступает в роли заменителя тория, поскольку в силу своей принадлежности к редкоземельной группе, имеет схожие свойства.

В качестве горючего компонента решено было использовать ацетон, т.к. проведение исследований с использованием метанола, рекомендуемого нами для промышленного использования (по результатам расчетов), в стенах учебной лаборатории, является рискованным.

В таблице 3.1 представлен состав модельной ВСОК.

Таблица 3.1 – Соотношение компонентов перерабатываемой ВСОК

ВСК/ (Ацетон+ВСК)	Соль		H_2O	Ацетон
	$UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	$Th(NO_3)_4 \cdot 6H_2O$		
0,2	0,01	0,15	0,03	0,80

Общий объем модельной ВСОК составил 5л.

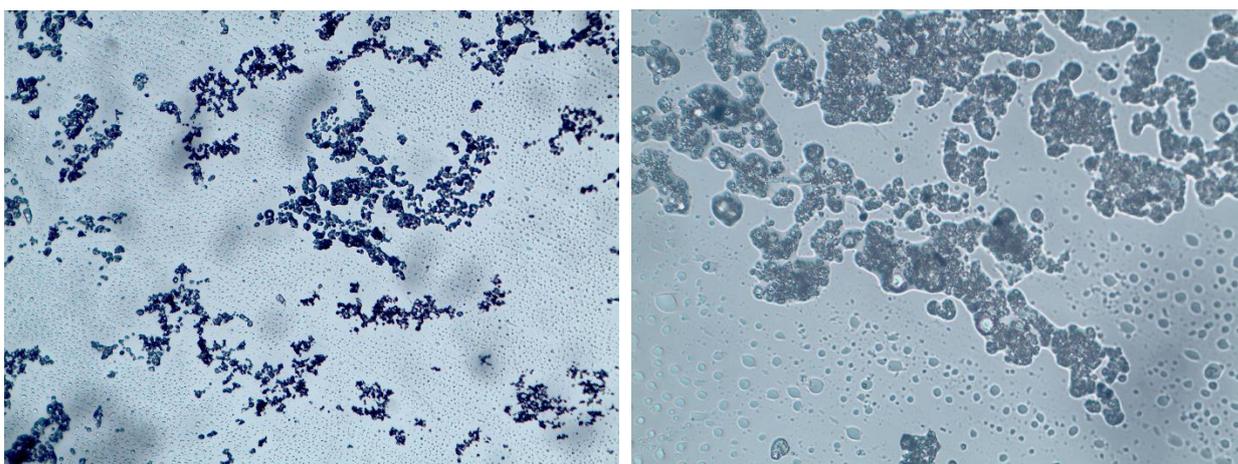
«Розжиг» реактора осуществлялся воздушной плазменной струей ($T_{стр} \approx 565^\circ K$), генерируемой ВЧФ-плазмотроном, на чистом горючем

компоненте – ацетоне, при анодном токе $I=3,5$ А и входной площади импеллера реактора $S_{\text{имп}}=1320$ см². По достижению необходимой температуры в реакторе (более 1200 °С) подача ацетона прекращалась и одновременно начиналась подача модельной ВСОК.

Полученные в реакторе высокодисперсные продукты плазменной переработки модельной ВСОК направлялись в узел «мокрой» очистки (УМО) плазменного стенда, где под действием оборотной технологической воды (объем 155 л) происходило резкое охлаждение (закалка) и отделение этих продуктов с образованием водной суспензии, а очищенные отходящие газы забирались вытяжным вентилятором и выбрасывались в атмосферу.

Сразу после завершения опыта полученная суспензия с высокодисперсными продуктами была перекачана в контейнер-отстойник из нержавеющей стали (объем 250 л). Через 2 часа на дно контейнера произошло выпадение порошков в виде осадка. Верхние слои воды были откачаны. Нижний слой воды, содержащий высокодисперсные продукты (порошок), был выпарен в печи сопротивления до достижения постоянства веса.

Микрофотографии полученных порошков, произведенные при помощи микроскопа Motis BA 310, представлены на рисунках 3.6 и 3.7.



а)

б)

Рисунок 3.6 – Микрофотографии порошка:

а) увеличение x10; б) увеличение x40

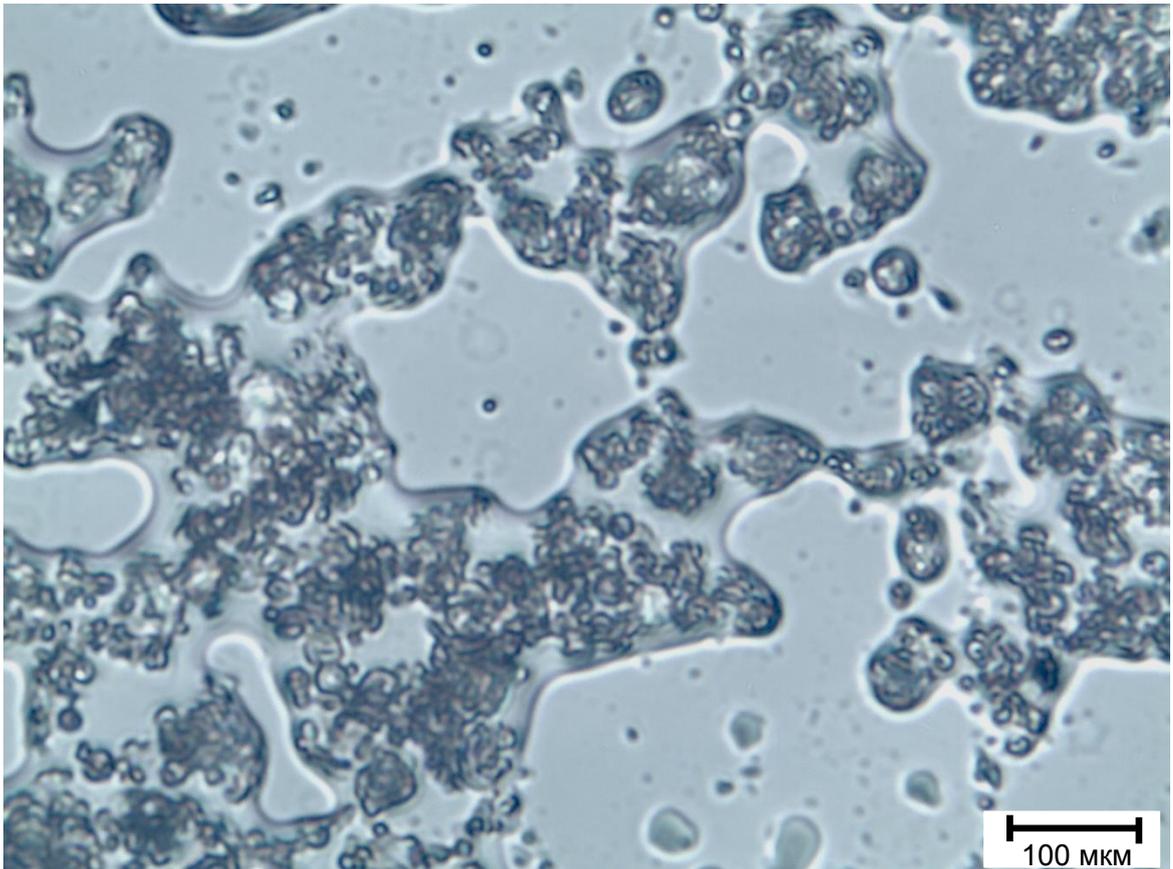


Рисунок 3.7 – Микрофотографии порошка (увеличение x100)

Из анализа данных фотографий хорошо видно, что полученные порошки обладают гомогенной структурой. Форма частиц одинакова, наблюдается образование рыхлых по структуре, объемных агломератов.

Размер частиц порошков определялся на приборе DeslaMax PRO. Диапазон изменения прибора 0,4-10000 нм.

На рисунке 3.8 представлено распределение частиц по размерам в полученных порошках

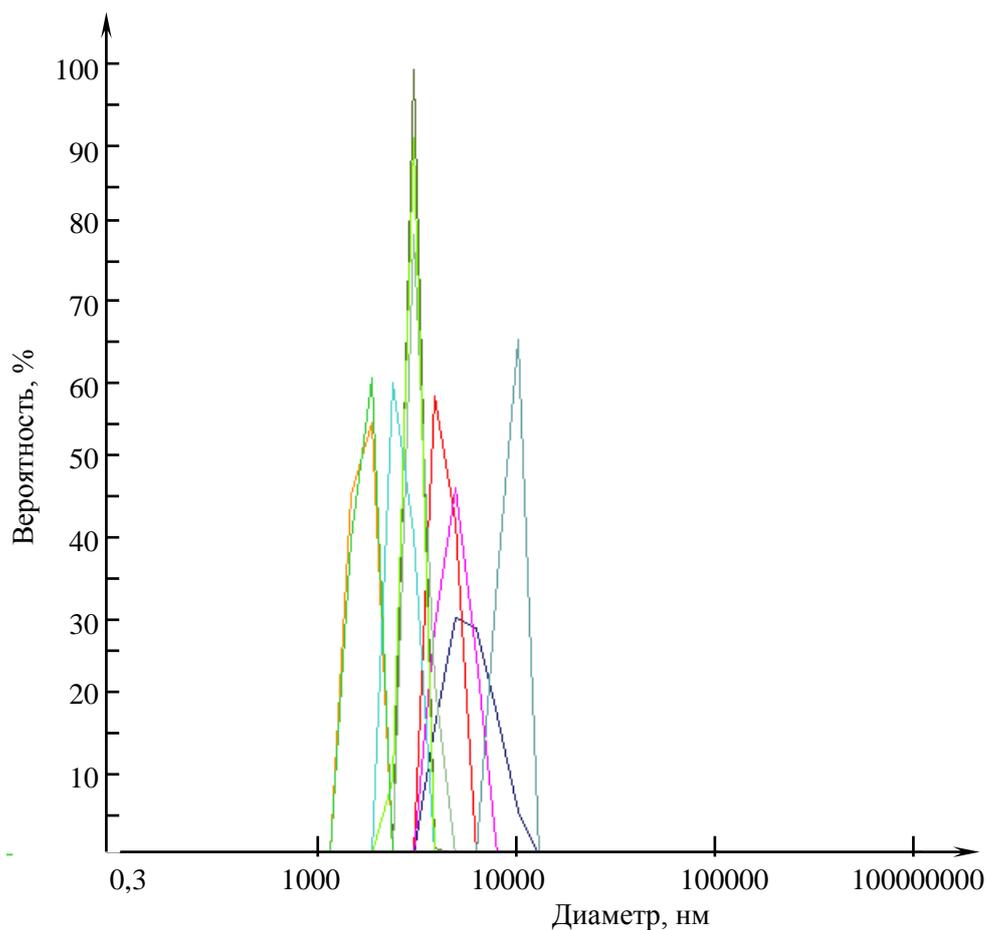


Рисунок 3.8 – Распределение частиц по размерам в полученных порошках

Из анализа данного рисунка и текстового выходного отчета прибора следует, что размер частиц в исследуемых порошках лежит строго в диапазоне 1-10 мкм. Размеры основной доли частиц в полученных порошках составляют (5 ± 3) мкм.

Элементный анализ полученных порошков проводился на рентгенофлуоресцентном спектрометре марки QUANT'X EDXRF ANALYZER с чувствительностью в диапазоне от <1 ppm до 100%. Спектрограмма представлена на рисунке 3.9.

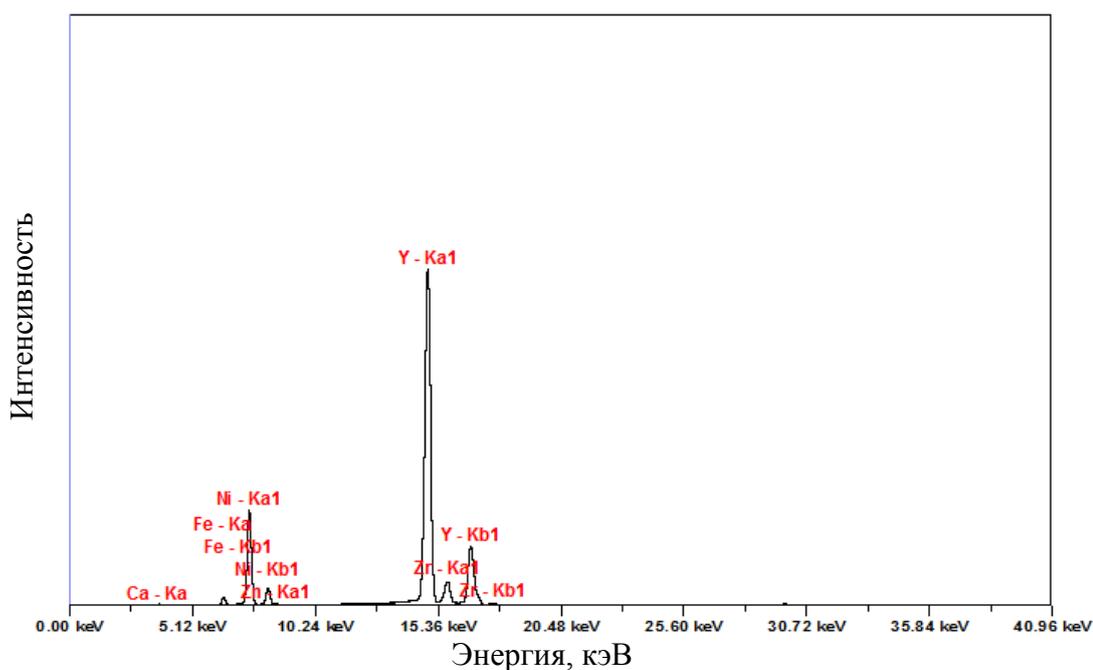


Рисунок 3.9 – Спектрограмма РФЛА

Согласно данным спектрограммы в исследуемой пробе содержатся Ca, Fe, Ni, Zr, Y.

Наличие кальция и железа объясняется тем, что в качестве ОТВ, в которой проходило осаждение порошков, использовали обычную водопроводную воду. Соответственно, содержащиеся в воде растворимые соединения кальция и железа после выпарки водной суспензии перешли в порошок.

Благодаря тому, что полученные порошки обладают гомогенной структурой во всем объеме, оценка отношения площадей пиков для иттрия и циркония может быть использована для косвенной оценки соотношения $Zr/(Y+Zr)$ в полученном порошке. Из оценки отношения площадей пиков $Zr/(Y+Zr) \approx 0,28$, можно сделать вывод о том, что массовое соотношение циркония и иттрия в полученных порошках и исходной модельной ВСОК (0,3) выдерживается.

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Для эффективного использования научного потенциала научно-исследовательской работы (НИР) необходимо прилагать усилия не только к непосредственно её разработке, но и к проведению её анализа с точки зрения экономических требований в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

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

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В данной диссертации проводится моделирование, исследование и оптимизация процессов плазмохимического синтеза и обработки гомогенных оксидных композиций для ториевого ядерного топлива.

Целевым рынком для результатов проводимых исследований будет являться Госкорпорация «Росатом» и принадлежащие ей промышленные предприятия по получению ядерного топлива, предприятия по производству ТВЭЛов, проектные институты.

		Моделирование, исследование и оптимизация процессов плазмохимического синтеза и обработки гомогенных оксидных композиций для ториевого ядерного топлива		
		Предприятия по получению Я	Предприятия по производству ТВЭЛов	Проектные институты
Потребность	Сильная			
	Слабая			

Рисунок 4.1 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию результатов исследований

4.1.1 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 [12].

SWOT – анализ проводится в три этапа. На первом этапе анализируются сильные и слабые стороны проекта (внутренняя среда), а также его возможности и угрозы (внешняя среда).

По результатам первого этапа работ составлена таблица 4.1.

Таблица 4.1 – Матрица SWOT

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность метода. При работе установки, выделение вредных веществ не превышает устанавливаемых пределов норм, не происходит загрязнения окружающей среды.	Сл1. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство промышленных установок под ключ. Сл2. Несвоевременное финансовое обеспечение.

Продолжение таблицы 4.1 – Матрица SWOT

С3. Более низкая стоимость получения оксидных композиций по сравнению с другими технологиями.	Сл3. Отсутствие собственной сырьевой базы (водно-органических композиций).
С4. Не имеющая аналогов технология.	
С5. Получение дополнительной тепловой энергии (до 2МВт*ч/т) на бытовые технологические нужды	
С6. Наличие необходимого оборудования для проведения опытных испытаний	
Возможности	Угрозы
В1. Монополизация рынка по получению гомогенных оксидных композиций для ториевого топлива.	У1. Недоверие к новой технологии производства обусловленное ее уникальностью.
В2. Вовлечение в ЯТЦ тория в качестве сырьевого нуклида.	У2. Ограниченность средств на проведение НИОКР на предприятиях.
	У3. Отсутствие опыта промышленной эксплуатации разрабатываемой технологии.

Второй этап заключается в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды, это должно помочь судить о необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа построили интерактивную матрицу проекта (таблица 4.2). Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 4.2 – Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны проекта					
		С1.	С2.	С3.	С4.	С5.	С6.
Возможности проекта.	В1.	+	+	+	+	0	+
	В2.	+	+	+	+	0	0
Угрозы проекта.	У1.	0	+	+	-	0	+
	У2.	+	0	+	-	0	+
	У3.	0	+	+	-	0	+

Продолжение таблицы 4.2 – Интерактивная матрица проекта

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта.		Сл1.	Сл2.	Сл3.
		В1	0	+
	В2.	+	+	-
Угрозы проекта.	У1.	-	-	0
	У2.	-	-	0
	У3.	-	-	-

Третий этап заключается в составлении итоговой матрицы SWOT – анализа, заполняемой на основании анализа таблицы 4.1 и 4.2. Итоговая матрица представлена в таблице В1 приложения В.

По результатам SWOT-анализа делаем вывод о том, что на преимущества разрабатываемой технологии преобладают над её недостатками. Сильные стороны проекта могут понизить процент угроз исследования.

4.2 Планирование управления научно-техническим проектом

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Таблица 4.3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей.

Категория	Этап	Содержание работ		Должность исполнителя
Разработка ТЗ на ВКР	1	Составление и утверждение технического задания		руководитель
Выбор направления исследования	2	Изучение проблемы и подбор литературы		инженер
	3	Изучение литературы и выбор методов решения проблемы		инженер
	4	Календарное планирование работ по теме		инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Моделирование технологического процесса на компьютере	Расчет показателей горения ВСОК на основе водно-органических композиций из смесевых нитратных растворов. Выбор оптимальных составов горючих ВОК.	руководитель, инженер

Продолжение таблицы 4.3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Теоретические и экспериментальные исследования	6	Моделирование технологического процесса на компьютере	ТД расчет процесса плазменной утилизации горючих оптимальных ВОК с применением программы	руководитель, инженер
	7		Оценка энергозатрат на процесс плазменной обработки смесевых нитратных растворов.	
	8	Планирование и проведение экспериментальных исследований	Исследования режимов работы плазменного стенда на базе ВЧФ – плазмотрона. Определение оптимальных режимов плазменного стенда.	руководитель, инженер
	9		Планирование экспериментов. Определение оптимальных составов ВСОК и режимов их переработки в воздушной плазме ВЧФ – разряда.	
10	Экспериментальные исследования процесса плазменной обработки смесевых нитратных растворов в виде диспергированных ВСОК.			
Обобщение и оценка результатов	11	Анализ и обработка полученных результатов		инженер
	12	Оценка эффективности полученных результатов		руководитель, инженер
Оформление отчета по НИР	13	Составление пояснительной записки		инженер
	14	Проверка правильности оформления пояснительной записки согласно ГОСТу		руководитель, инженер
	15	Подготовка к защите		инженер

4.2.2 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Составление и утверждение технического задания	4.02.2016	Приказ № 791/с об утверждении руководителей и тем выпускных квалификационных работ студентов ФТИ
2	Изучение проблемы и подбор литературы	14.03.2016- 19.03.2016	Список литературы
3	Изучение литературы и выбор методов решения проблемы	21.03.2016- 9.04.2016	Отчёт
4	Календарное планирование работ	11.04.2016	План работ
5	Моделирование технологического процесса на компьютере	11.04.2016- 30.04.2016	Отчёт
6	Планирование и проведение экспериментальных исследований	2.05.2016- 21.05.2016	Отчёт
7	Анализ и обработка полученных результатов	23.05.2016- 1.06.2016	Отчёт
8	Оценка эффективности полученных результатов	3.06.2016- 5.06.2016	Отчёт
9	Составление пояснительной записки	6.06.2016- 16.06.2016	Пояснительная записка
10	Проверка правильности оформления пояснительной записки согласно ГОСТу	17.06.2016- 18.06.2016	
11	Подготовка к защите	20.06.2016	

4.2.3 План проекта

Календарный план-график проведения научного исследования представлен в таблице В1 приложении В.

4.3 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

В процессе формирования бюджета 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);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

4.3.1 Расчет материальных затрат

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

К категории материалов относят:

- сырьё, основные и вспомогательные материалы;
- покупные полуфабрикаты и комплектующие изделия;
- электроэнергия и вода на технологические цели.

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию и водоснабжение.

Используемое оборудование и материалы: ВЧ-генератор, масла и реагенты являются собственностью кафедры Технической физики, поэтому в расчет показателей затрат не берутся.

Эксперименты проводились в течении 16 часов, мощность установки 100 кВт/час и расход охлаждающей воды (не менее) 1,8 м³/час

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} \quad (4.1)$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (2,7 руб за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

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

$$C_{эл} = 2,7 \cdot 100 \cdot 16 = 4320 \text{ руб.}$$

Затраты на водоснабжение рассчитываются по формуле:

$$C_{вод} = C_{вод} \cdot Q \cdot F_{об} \quad (4.2)$$

где $C_{вод}$ – тариф на промышленное водоснабжение (8 руб за 1 м³);

Q – расход воды, м³;

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

$$C_{вод} = 8 \cdot 1,8 \cdot 16 = 230,4 \text{ руб.}$$

Материальные затраты находятся по формуле:

$$C_m = C_{эл} + C_{вод} \quad (4.3)$$

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi} \quad (4.4)$$

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

$N_{расxi}$ – 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.

$$Z_m = 4320 + 230,4 = 4550,4 \text{ руб.}$$

Транспортно – заготовительные расходы не учитывались, поэтому не

было умножения на коэффициент k_T .

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

Данная статья включает все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимых для проведения исследовательских работ.

При проведении научно-технических исследований в рамках данного проекта использовался портативный газоанализатор Kane Quintox KM9106, проведем расчет затрат на амортизацию используя метод уменьшаемого остатка.

При использовании *способа уменьшаемого остатка* годовая сумма амортизационных отчислений определяется исходя из остаточной стоимости объекта основных средств на начало отчетного года и нормы амортизации, исчисленной на основании срока полезного использования этого объекта:

$$A = C_{\text{ост.}} \times \frac{k \times H_a}{100} \quad (4.5)$$

где $C_{\text{ост}}$ – остаточная стоимость объекта; k – коэффициент ускорения; H_a – норма амортизации для данного объекта.

Стоимость портативного газоанализатор Kane Quintox KM9106 составляет 542800 рублей. Заявленный срок службы составляет 6 лет. Коэффициент ускорения примем равным 2. Годовая доля амортизации составляет: $H_a = 100 : 6 \cdot 2 = 33,33\%$

Расчет амортизации представлен в таблице 3.7.

Таблица 4.5 – Расчет амортизации

Год	Остаточная стоимость на начало года (руб.)	Норма амортизации, %	Сумма годовой амортизации (руб.)	Остаточная стоимость на конец года (руб.)
1	542800	33,33	361866,67	180933,33
2	180933,33	33,33	120622,22	60311,11

Продолжение таблицы 4.5

3	60311,11	33,33	40207,41	20103,70
4	20103,70	33,33	13402,47	6701,23
5	6701,23	33,33	4467,49	2233,74
6	2233,74	33,33	1489,16	744,58

Расчет амортизации для нашей работы, отсюда будет рассчитываться так: $542800/365 \cdot 120 = 178455$ руб.

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

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

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.6)$$

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

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (4.7)$$

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{дн} = (Z_m \cdot M) / F_d, \quad (4.8)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

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

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-

технического персонала, раб. дн. (таблица 2.3.3).

Таблица 4.6 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер-исследователь
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
– выходные дни;	52	104
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	48	24
– невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	223

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{ТС}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (4.9)$$

где $Z_{\text{ТС}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб. (для доцента $Z_{\text{ТС}}$ составляет 22300 руб., для инженера исследователя 10223 руб.);

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.4.

Таблица 4.7 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Разряд	$Z_{\text{ТС}}$, руб.	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$, руб.	$Z_{\text{дн}}$, руб.	$T_{\text{р}}$, раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Руководитель		22300	1,3	28990	1201	10	12010
Инженер		10223,32	1,3	13290,316	477	96	42912
Итого $Z_{\text{осн}}$							54922

4.3.4 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из 10-15 % от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \times Z_{\text{осн}} \quad (4.10)$$

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

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты ($k_{\text{доп}}=0,1$);

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

В таблице 4.5 приведен расчёт основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.8 – Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата, руб	12010	42912
Дополнительная зарплата, руб	1201	4291
Зарплата исполнителя, руб	13211	47203
Итого по статье $C_{\text{зн}}$, руб	60414	

4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.11)$$

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

Таким образом, выплаты в страховые фонды составят:

$$Z_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot 60414 = 16373 \text{ руб.}$$

4.3.6 Накладные расходы

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

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}}(Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.12)$$

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

Накладные расходы в ТПУ составляют 25-35 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы.

Примем $k_{\text{накл}} = 30 \%$.

Накладные расходы составляют:

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot 60414 = 18124,2 \text{ руб.}$$

4.3.7 Контрагентные расходы

Контрагентные расходы включают затраты, связанные с выполнением каких-либо работ по теме сторонними организациями.

Расчет величины этой группы расходов зависит от планируемого объема работ и определяется из условий договоров с контрагентами или субподрядчиками.

Так как при проведении научно-технических исследований все подготовительно-отладочные работы, технологические операции и расчеты были осуществлены на базе кафедры № 23 ФТИ ТПУ с имеющимся оборудованием и расходными материалами только научным руководителем и дипломником без привлечения сторонних организаций, то в данном случае можно говорить, что контрагентные расходы отсутствуют.

4.3.8 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

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

продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 3.11.

Таблица 4.9 – Расчёт бюджета затрат исследовательского проекта

Наименование статьи	Сумма, руб
1. Материальные затраты исследования	4550,4
2. Затраты на специальное оборудование	178455
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	54922
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	5492
5. Отчисления во внебюджетные фонды	16373
6. Накладные расходы	18124,2
7. Контрагентные расходы	0
Бюджет затрат исследования	277916,6

4.4 Организационная структура проекта

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

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

Организационная структура научного проекта представлена на рисунке 3.2.



Рисунок 4.2 – Организационная структура научного проекта

4.5 Матрица ответственности

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице В3 приложения В.

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

— ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход;

— исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта. Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение);

— согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

4.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Эффективность планируемого исследования можно оценить на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Данный показатель определяется из двух средневзвешенных величин:

- финансовой эффективности;
- ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}}, \quad (4.13)$$

где I_{Φ}^p – интегральный финансовый показатель разработки;

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

Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

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

Представим расчет в виде таблицы.

Таблица 4.10 – Интегральный финансовый показатель

	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
I_{Φ}^p	1	0,8	0,9

Интегральный показатель ресурсоэффективности определяется следующим образом:

$$I_m^a = \sum_i^n a_i \cdot b_i^a, \quad I_m^p = \sum_i^n a_i \cdot b_i^p, \quad (4.14)$$

где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го

варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения аналога и разработки, устанавливаемая экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представим в виде таблицы 4.13.

Таблица 4.11 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

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

$$I_{p-исп1} = 5*0,2 + 3*0,5 + 4*0,2 + 4*0,1 = 3,8;$$

$$I_{p-исп2} = 4*0,2 + 4*0,5 + 4*0,2 + 3*0,1 = 3,9;$$

$$I_{p-исп3} = 3*0,2 + 5*0,5 + 5*0,2 + 3*0,1 = 4,4.$$

Полученные результаты, позволяют сделать вывод о том, что научно-техническое исследование обладает наибольшей ресурсоэффективностью при III варианте исполнения проекта, т.е. при небольшой производительности, высокой надежности и повышенном энергосбережении.

Интегральный показатель эффективности разработки и аналога определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_M^p}{I_\Phi^p}, I_{финр}^a = \frac{I_M^a}{I_\Phi^a} \quad (4.15)$$

Таблица 4.12 – Интегральный показатель эффективности разработки и ее аналогов

	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
$I_{\text{финр}}^p$	3,8	4,88	4,89

Сравнительная эффективность проекта:

$$Э_{\text{ср}} = I_{\text{финр}}^p / I_{\text{финр}}^a \quad (4.16)$$

$Э_{\text{ср}}$ – сравнительная эффективность проекта; $I_{\text{финр}}^p$ - интегральный показатель разработки; $I_{\text{финр}}^a$ - интегральный показатель аналога;

Таблица 4.13 – Сводная таблица параметров

№	Показатель	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3 (разработка)
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,8	0,9
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,8	3,9	4,4
3	Интегральный показатель эффективности	3,8	4,88	4,89
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,77	0,99	1

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет делать вывод о том, что разрабатываемый вариант технологии является наиболее эффективным.

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Работы по дипломному проекту проводились в лаборатории кафедры ТФ, работа велась с использованием химических реактивов, источников питания (в т.ч. высокочастотных), электронно-вычислительной и измерительной аппаратуры. Поэтому организация безопасной и безаварийной работы требует соблюдения производственной дисциплины, уверенности знаний правил эксплуатации и техники безопасности, а также ясного представления об опасностях, которые могут появиться при выполнении работ.

Данный раздел включает в себя: законодательные основы охраны труда, общие требования безопасности труда, требования безопасности работы для работников лаборатории, допуск к работе и требования безопасности при работе с вредными химическими веществами, поведение работников в случае возникновения аварийных ситуаций, меры оказания первой помощи при несчастных случаях.

При составлении раздела, использовались нормативно-правовые документы по охране труда и окружающей среды Российской Федерации, устанавливающие правила, процедуры, критерии и нормативы, направленные на сохранение жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности.

5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Опасным производственным фактором, согласно [25], называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводит к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего, в

определенных условиях, приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

Специфика проводимых работ сопряжена с воздействием опасных и вредных факторов, представленных в таблице 5.1

Таблица 5.1. Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Приготовление растворов азотнокислых солей церия и циркония в ацетоне	Химические токсические	–	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества
Работа на высокочастотном факельном плазмотроне; работа с ЭВМ	Воздействие радиации (ВЧ,УВЧ,СВЧ и т.д.)	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
		–	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»

На работника лаборатории, проводящего экспериментальные исследования и расчеты на ПЭВМ, могут воздействовать следующие факторы:

Физические:

- температура и влажность воздуха;
- шум;
- статическое электричество;
- высокочастотное электромагнитное поле;
- освещённость;
- наличие ионизирующего излучения.

Химические: вредные вещества (оксиды азота и углерода).

Психофизиологические:

- физические перегрузка (статическая, динамическая);

— нервно-психические перегрузки (умственные перегрузки, перегрузки анализаторов, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

5.2 Требования безопасности при выполнении работ с использованием персональных электронно-вычислительных машин

5.2.1 Организационные мероприятия

Организация и охрана труда при работе на ПЭВМ, регулируется документами: СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»;

Общие требования. Продолжительность и организация рабочего дня для сотрудников, работающих с ПЭВМ определяются Правилами внутреннего распорядка университета. В особых случаях продолжительность рабочего дня может быть изменена решением администрации в установленном порядке, при этом ежедневная работа высокой интенсивности и с нервно–эмоциональным напряжением по 12 и более часов не допускается.

5.2.2 Условия труда

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии со [26] и приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23 – 25	40 – 60	0,1
Тёплый	23 – 25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в

производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20..25 °С, зимой – 13..15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основным недостатком такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

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

Плотность магнитного потока должна быть не более:

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

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 МкБэр/час. По нормам конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более $7,7 \cdot 10^{-8}$ А/кг, что соответствует эквивалентной дозе, равной 100 мкР/час. Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

5.2.3 Технические мероприятия

Организация рабочего места. Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства. Графическое представление зон легкой досягаемости рук изображено на рисунке 5.1.

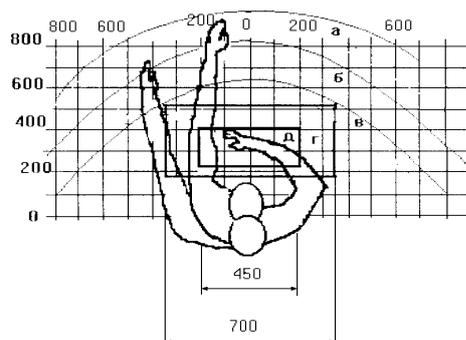


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости
 а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони;
 г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура - в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация: в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

Рабочие места с персональными компьютерами по отношению к световым проемам должны располагаться так, чтобы естественный свет падал сбоку, преимущественно слева.

Оконные проемы в помещениях, где используются персональные компьютеры, должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа: жалюзи, занавесей, внешних козырьков и др.

5.3 Требования безопасности при выполнении работ в химических лабораториях

5.3.1 Общие требования

Под "использованием химических веществ" в соответствии с [27] следует понимать любую трудовую деятельность, при которой работник

может подвергнуться воздействию химического вещества, включая:

- производство химических веществ;
- обращение с химическими веществами;
- хранение химических веществ;
- транспортировку химических веществ;
- удаление и обработку отходов химических веществ;
- выброс химических веществ в результате производственной деятельности;
- эксплуатацию, ремонт и очистку химического оборудования и контейнеров.

При использовании химических веществ следует учитывать их потенциальную опасность, возможность воздействия физических, химических и психофизиологических опасных и вредных производственных факторов по [28], их суммирующего и потенцирующего эффекта.

Приготовление рабочих химических растворов должно осуществляться на специальных установках при работе вентиляции с использованием средств индивидуальной защиты.

Очистка воздуха, загрязненного аэрозолями, газами и парами химических веществ и условия выброса его в атмосферу из систем местных отсосов и общеобменной вентиляции должны соответствовать требованиям [29].

Отходы химических веществ, переработка которых невозможна или нецелесообразна, подлежат обезвреживанию и утилизации с учетом класса их опасности.

5.3.2 Характеристика вредных веществ

Вредным веществом называется вещество, которое при контакте с организмом человека, в случае нарушения требований безопасности, может вызвать производственные травмы, профессиональные заболевания или

отклонения в состоянии здоровья, обнаруживаемые современными методами, как в процессе работы, так и в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколений.

По степени воздействия на организм человека вредные вещества делятся на четыре класса опасности:

- вещества чрезвычайно опасные;
- вещества высокоопасные;
- вещества умеренно опасные;
- вещества мало опасные.

При эксплуатации ВЧФ плазмотрона в окружающую среду выбрасываются вредные газообразные вещества, такие как оксиды азота и углерода, с концентрацией.

В таблице 5.3 приведены предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ и их класс опасности.

Таблица 5.3 – Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ и их класс опасности

№	Вещество	ПДК, мг/м ³	Класс опасности
1	Оксид азота	5,0	2
2	Диоксид азота	2,0	2
3	Оксид углерода	20,0	4
4	Диоксид серы	10,0	3
5	Сумма углеводородов	300,0	4

Действие данных вредных веществ на организм человека весьма разнообразно.

При контакте диоксида азота с влажной поверхностью (слизистые оболочки глаз, носа, бронхов) образуются азотная и азотистая кислоты, раздражающие слизистые оболочки и поражающие альвеолярную ткань легких. При высоких концентрациях оксидов азота возникают астматические проявления и отек легких. Вдыхая воздух, содержащий оксиды азота в высоких концентрациях, человек не имеет неприятных ощущений и не предполагает отрицательных последствий. При длительном воздействии

оксидов азота в концентрациях, превышающих норму, люди заболевают хроническим бронхитом, воспалением слизистой желудочно-кишечного тракта, страдают сердечной слабостью, а также нервными расстройствами.

Оксид углерода опасен тем, что не имеет запаха; поэтому отравление им может произойти незаметно. Ядовитое действие оксида углерода, известное под названием угара, объясняется тем, что СО легко соединяется с гемоглобином крови и делает его неспособным переносить кислород от легких к тканям. При вдыхании свежего воздуха образовавшееся соединение (карбоксигемоглобин) постепенно разрушается, и гемоглобин восстанавливает способность поглощать кислород.

Симптомы при отравлении сернистым газом — насморк, кашель, охриплость, першение в горле. При вдыхании сернистого газа более высокой концентрации — удушье, расстройство речи, затруднение глотания, рвота, возможен острый отёк лёгких. Может вызывать фатальные аллергические реакции у астматиков, разрушает витамин В1, повреждение органов пищеварения.

В процессе эксплуатации плазмотрона, превышения ПДК вредных веществ не происходит.

5.3.3 Действия работников при аварийных ситуациях

Разлитый водный раствор кислоты или щелочи следует засыпать сухим песком при помощи совка, перемесить адсорбент от краев разлива к середине, собрать в полиэтиленовый мешочек и плотно завязать. Место разлива обработать нейтрализующим раствором, а затем промыть водой.

Для удаления осколков разбитой лабораторной посуды следует пользоваться щеткой и совком, запрещается собирать осколки незащищенными руками.

В случаях перерыва в подаче электроэнергии следует отключить все электроприборы.

Обо всех обнаруженных неисправностях электрооборудования, приборов, приспособлений, инвентаря следует немедленно сообщить преподавателю и не приступать к выполнению работы до их устранения.

5.3.4 Оказание первой доврачебной помощи

Работник должен знать следующие правила оказания первой доврачебной помощи:

— при порезах рук стеклом удалить из раны видимые осколки стекла пинцетом, обработанным спиртом, промыть рану 2 % раствором перманганата калия и, смазав рану 5 % раствором йода, забинтовать;

— при химических ожогах кожи следует удалить вызвавшее ожог вещество соответствующим раствором, затем пораженный участок кожи обработать этиловым спиртом;

— при ожогах кислотами обожженное место обильно промывать проточной водой;

— при ожогах щелочами после обильной промывки раны проточной водой следует обработать обожженное место 2 % раствором уксусной или борной кислоты;

— при попадании на кожу агрессивных органических веществ пораженный участок быстро промыть 96 % этиловым спиртом, а затем смазать мазью от ожогов;

— при химических ожогах глаз срочно промыть глаза большим объемом воды, затем 2 % раствором пищевой соды (при попадании кислоты) или 2 % раствором борной кислоты (при попадании щелочи). После этого срочно отправить пострадавшего в медпункт;

— при ингаляционных поражениях пострадавшего немедленно вывести (вынести) на свежий воздух, освободить грудную клетку от стягивающей одежды, создать ему покой, положив на спину и тепло укрыв. Вызвать врача [30].

5.4 Электробезопасность

Электробезопасность — система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Анализ опасности электрических сетей практически сводится к определению значения тока, протекающего через тело человека в различных условиях, в которых может оказаться человек при эксплуатации электрических сетей.

При прохождении электрического тока через тело человека могут возникнуть повреждения организма. Действие тока на организм человека может быть местным и общим. Общее (рефлекторное) поражение — электрический удар, представляет для человека наибольшую опасность: нарушается работа центральной нервной и сердечнососудистой систем, что приводит к фибрилляции и параличу сердца, а также к остановке дыхания.

Характер и последствия поражения зависят от величины, частоты и пути прохождения тока; продолжительности воздействия.

Безопасной для человека является величина переменного тока — 10мА, постоянного — 50мА, безопасное напряжение 12В.

Во избежание травматизма следует, соблюдать следующие правила:

- должна быть изучена инструкция по эксплуатации аппаратуры, а перед каждым включением производился осмотр рабочего места;
- обращать особое внимание на последовательность включений и выключения питания отдельных узлов;
- Все узлы комплекса должны быть заземлены через контур заземления;
- Контур заземления периодически проверяется на электрическое сопротивление.

При выполнении данной ВКР, использовался ВЧФ-плазменный стенд

с использованием высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13. Данный генератор питается от сети с промышленным напряжением 380 В, с анодным напряжением 10,4÷10,5 кВ и номинальной потребляемой мощностью 100 кВт.

Работы на лабораторном оборудовании, в процессе проведения экспериментальных исследований, выполнялись в строгом соответствии требованиям по электробезопасности, все операции выполнялись руководителем, имеющим допуск до работ с напряжениями свыше 1000 В.

5.4.1 Оказание первой доврачебной помощи

Меры первой помощи зависят от состояния пострадавшего, которые определяются путём проведения следующих мероприятий:

- уложить пострадавшего спиной на твёрдую поверхность;
- проверить наличие дыхания и пульса;
- выяснить состояние зрачка.

При легких поражениях пострадавшего следует вынести на свежий воздух. Если дыхание очень резкое и судорожное, необходимо сделать искусственное дыхание.

Если пострадавший находится в сознании, но до этого был в состоянии обморока - обеспечить ему условия для полного покоя, следить за дыханием и пульсом, вызвать врача.

Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но дышит и прощупывается пульс, необходимо привести его в сознание, дать понюхать нашатырный спирт и обрызгивать водой.

При остановке дыхания и отсутствии пульса делают искусственное дыхание и непрямой массаж сердца. Затем необходима госпитализация.

5.5 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [31] правила пожарной безопасности в Российской Федерации, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для

предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

— исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

— применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;

— правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

— правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

— обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

— издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

— соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;

— правильное размещение оборудования;

— своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

— Сообщить руководству (дежурному).

— Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС.

— Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

ВЫВОДЫ

1. Предложен способ получения гомогенных нанодисперсных смешанных порошков урана и тория из смесевых нитратных растворов в составе горючих водно-солеорганических композиций.
2. Проведены расчеты показателей горения таких композиций и рекомендованы оптимальные составы, обеспечивающие их энергоэффективную переработку.
3. Проведены исследования возможностей лабораторного стенда на базе ВЧФ-плазмотроне для переработки таких растворов.
4. Проведены экспериментальные исследования по получению гомогенных оксидных композиций на основе модельных смесей. Показана возможность получения гомогенных нанодисперсных порошков.
5. Для полученных порошков проведен рентгенофлуоресцентный анализ, определены размеры и форма частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных расчетов и экспериментальных исследований позволяют говорить о возможности реализации энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза гомогенных нанодисперсных смешанных оксидных композиций урана и тория на базе ВЧФ-плазмотрона.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Перминов С. В. , Зубов В. В. , Кадочников С. С. , Каренгин А. Г. Плазмохимический синтез и исследование гомогенных оксидных композиций для ториевого ядерного топлива // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий: материалы конференции в рамках Научной сессии НИЯУ МИФИ, Северск, 21-25 Марта 2016. - Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2016 - С. 43
2. Перминов С. В., Чуфистов С. А. Создание экспериментальной установки по облучению образцов в условиях криогенных температур // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине : сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции, г. Томск, 3-6 июня 2015 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; под ред. А. Н. Дьяченко [и др.] . — Томск; : Изд-во ТПУ , 2015 . — [С. 234-235] .
3. Перминов С. В. , Давыдов Е. Ю. , Мышкин В. Ф. Разработка инженерных основ технологии очистки воды, сточных растворов, селективного извлечения ионов // Известия вузов. Физика. - 2015 - Т. 58 - №. 2/2. - С. 88-94
4. Перминов С. В. Изучение физики воздействия магнитного поля на физико-химические процессы в электродиализной ячейке // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 20-24 Октября 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - С. 120-122
5. Перминов С. В. Электродиализ водных растворов в магнитном поле // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 20-24 Октября 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - С. 116-118

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Максаковский В.П. Географическая картина мира. В 2 кн. Кн. I : Общая характеристика мира / В.П.Максаковский. – 4-е изд., испр. — М.: Дрофа, 2008. — 55 с.
2. Алексеев С.В., Зайцев В.А. Торий в ядерной энергетике. — М.: Техносфера, 2014. — 288 с.
3. Ма Б.М. Материалы ядерных энергетических установок. Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 408 с.
4. Туманов Ю. Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. — М.: Физматлит, 2003. — 760 с.
5. Волков, А.И., Жарский, И.М. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. - Мн.: Современная школа, 2005. - 608 с.
6. Бойко В.И. Топливные материалы в ядерной энергетике: учебное пособие / В.И. Бойко, Г.Н. Колпаков, О.В. Селиванникова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 186 с.
7. Локтев И.И., Александров А.Б. и др. Подготовка порошков диоксида урана к сухому прессованию топливных таблеток. ч. 2. Известия ТПУ 2004 Т.307. №6.
8. Локтев И.И., Александров А.Б. и др. Подготовка порошков диоксида урана к сухому прессованию топливных таблеток ч. 1. Известия ТПУ 2004 Т.307. №6.
9. Андреев Г.Г. Введение в химическую технологию ядерного топлива: учебное пособие / Г.Г. Андреев, А.Н. Дьяченко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 165 с.
10. Subramanian M.S. e.a. Reaction kinetics of some actinide oxalates by differential thermal analysis // J. Inorg. Nucl. Chem. V. 31. No 12. 1969. – P.3789
11. Бойко В.И., Власов В.А., Жерин И.И. и др. Торий в ядерном топливном цикле.– М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2006. – 360 с.

12. Matthews R.B., Davis N.C. Fabrication of ThO₂ and ThO₂-UO₂ Pellets for Proliferation Resistant Fuels. Technical Report PNL – 3210/UC-78, Battelle Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, USA, 1979.
13. Pope J.M., Radford K.C. Physical properties of some thoria powders and their influence on sinterability // J. Nucl. Mater. V. 52. 1974. – P. 241.
14. White G.D. e.a. Optimization of thorium oxalate precipitation conditions relative to derived oxide sinterability // J. Nucl. Mater. V. 96. 1981. – P. 305.
15. Riley F.L. // In Vincezini P.P., Babini G.N. (Ed.) Ceramics Today-Tomorrow's Ceramic's Elsevier Science Publishers, 1991. – P.255
16. Janney M.A. e.a. Microwave processing of ceramics: Guidelines used at Oak Ridge Laboratory // MRS Symp. Pros. V. 269. 1992. – P. 173
17. Chandramouli V. e.a. Microwave synthesis of solid solutions of Urania and thoria – a comparative study // J. Nucl. Mater. V. 254. No 1. 1998. – P. 55.
18. Kutty T.R.G. e.a. Characterization and densification studies of ThO₂-UO₂ pellet derived from ThO₂ and U₃O₈ powders // J.Nucl. Mater. V. 335. No 3. 2004. – P. 462
19. Tiwari R.H., Sinha D.H. // Indian Chem. J., V. 14. 1980. – P. 25
20. Antonysamy S. e.a. Combustion synthesis at Urania – thoria solid solutions // J. Nucl. Mater. V. 278. No 2-3. 2000. – P. – 346.
21. Weissert L.R., Schileo G. Fabrication of thorium fuel elements. – Publ. American Nuclear Society, 1968.
22. Simnad M.T. Fuel element experience in nuclear power reactor. – Gordon and Breach Sci. Pub. New York, London, Paris, 1971.
23. Писаренко В.В. Справочник лаборанта-химика. Справ. пособие для проф.-техн. учебн. заведений. — М.: Высшая школа, 1970. — 192 с.
24. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. — М.: Химия, 1979. — 416 с.
25. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.
26. ГОСТ12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к

воздуху рабочей зоны.

27. Конвенция Международной Организации Труда №170 о безопасности при использовании химических веществ на производстве.

28. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы.

29. СНиП 2.04.05. Отопление, вентиляция и кондиционирование.

30. ПОТ РМ-004-97. Межотраслевые правила по охране труда при использовании химических веществ.

31. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности РФ.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

**PLASMOCHEMICAL SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF
HOMOGENEOUS OXIDE COMPOSITIONS
FOR THORIUM NUCLEAR FUEL**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM4Б	Перминов Сергей Викторович		

Консультант кафедры ТФ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Видяев Дмитрий Геннадьевич	д. т. н.		

Консультант – лингвист кафедры ИЯФТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Ермакова Янина Викторовна			

ABSTRACT

In this paper, the literature review on the thorium nuclear fuel technology was made. Thorium calcining method, microwave and plasma-chemical technique of thorium oxide powders obtaining are described. Also the laboratory high frequency torch plasmatron facility, used in our experimental research, is described.

The results may be used in nuclear fuel fabrication plants and research institutions.

CONTENTS

Introduction.

A1. Thorium calcining method.

A2. Microwave technology of uranium-thorium compositions production.....

A3. Plasma-chemical technique

A4. The laboratory plasmatron facility description.

Conclusion...

References ...

INTRODUCTION

Thorium oxide (ThO_2) has recently attracted much attention as a nuclear fuel since it is resistant to proliferation and the amount of uranium oxide is limited [1]. Thorium is not fissile but can be converted into U-233 which is a fissionable isotope.

ThO_2 pellets can be fabricated, like UO_2 pellets, through ceramic powder processing; powder preparation, mixing, pressing and sintering. It is generally agreed that powder properties such as surface area and particle size influence greatly the methods of mixing and sintering. The surface area of UO_2 powder ranges from 2 to 5 m^2/g , and the green pellet of UO_2 powder can be sintered at about 1700°C . It should be noted that the melting point of ThO_2 is 3300°C and is higher by 500°C than that of the UO_2 . This implies that the sintering of ThO_2 requires a higher temperature than that of UO_2 . However, it is very difficult and uneconomical to raise the sintering temperature of ThO_2 above 1800°C . So it is very important in ThO_2 pellet fabrication to prepare ThO_2 powder which can be sintered at comparatively low temperatures.

The sintering activity of ThO_2 powder generally increases by increasing the surface area of the powder, and the surface area is dependent on the preparation methods. Thorium oxide powder is commonly prepared by the calcining thorium oxalate [2] or sol-gel method [3,4]. Thorium oxalate is precipitated by adding oxalic acid to a thorium nitrate solution, and then ThO_2 powder is produced by the calcination of thorium oxalate. The sol-gel method consists of the preparation of a sol, conversion of the sol into a dried gel and calcination of the gel into high density microspheres. The surface area of ThO_2 powder is between 1 and 50 m^2/g [2]. These values are much larger than the surface area of UO_2 powder.

Mixed oxide pellets - $(\text{Th,U})\text{O}_2$ pellets- can be fabricated by sintering the mixture of ThO_2 and UO_2 powders. Other mixed oxide pellets - $(\text{U,Pu})\text{O}_2$ and $(\text{U,Gd})\text{O}_2$ pellets- have also been fabricated in a similar way. Mixed oxide pellets are generally more difficult to fabricate than single oxide pellets since it is difficult

to get a homogeneous mixture of two different powders by mechanical mixing or milling. Moreover, the sintering of two powders should include not only densification but also the formation of a solid solution. For example, the densification of mixed UO_2 and Gd_2O_3 powders is retarded by the formation of a $(\text{U,Gd})\text{O}_2$ solid solution when $(\text{U,Gd})\text{O}_2$ pellets are sintered [5].

Thermal conductivity is one of the most important properties of nuclear fuel. It is well known that the thermal conductivity of ThO_2 is high compared to that of UO_2 [4]. However, the thermal conductivity of $(\text{Th,U})\text{O}_2$ is relatively unknown.

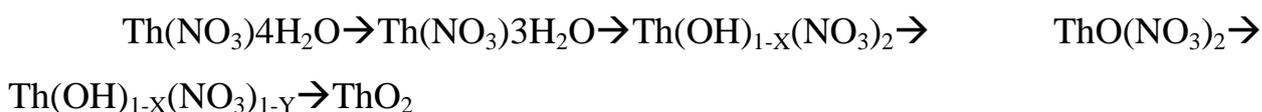
In this paper thorium oxide and uranium oxide synthesis methods are studied. This work investigates a unique plasmachemical method of homogenous $(\text{Th,U})\text{O}_2$ powders synthesis.

A1. Thorium calcining method

Well sintering ThO₂ is obtained by calcining of thorium salts: hydroxide [Th(OH)₄], nitrate [Th(NO₃)₄·4H₂O], oxalate [Th(C₂O₄)₂·6H₂O], sulphate [Th(SO₄)₂·9H₂O], carbonate [Th(CO₃)₂]. Thorium nitrate or thorium oxalate is most frequently precipitated from nitrate solution.

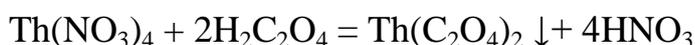
The kinetics of thorium nitrate heat treatment process and the mechanism of its transformation into thorium dioxide were studied in [6].

Source powders Th(NO₃)₂·5H₂O particles were 5-15 microns. The powders subjected to heat treatment (calcination) at a temperature of from 300 to 1200 C. The temperature rise rate 6 K/min. Calcination is carried out in a resistance furnace. Mass spectral, X-ray diffraction and thermogravimetric analysis methods were used to determine calcination stages of the thorium nitrate to ThO₂ process:



The process of producing thorium oxide from oxalate usually begins with the preparation of thorium nitrate solution. Thorium nitrate dissolved in a nitric acid with concentration 0.5 mol/l, achieving concentration of thorium nitrate solution ~ 240 g/l.

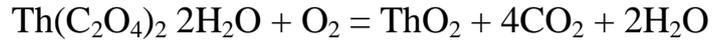
After heating a solution to 50°C it is added crystal oxalic acid in a 5% excess relative to stoichiometry, 15 minutes left thorium oxalate falls out as a residue:



The residue powder separates from dissolved salts by filtration on a vacuum drum filter. The residue powder from the filter may contain up to about 50% moisture and 0.5% of nitrate. On the next stage sludge pre-drying process and baking is carried out. Drying is carried out in the screw dryer with a temperature of about 120°C, to a 10% of residual moisture content.

After drying, the calcination is carried out in a rotary furnace at a temperature of 540-560°C, where thorium oxide from oxalate decomposes to

oxides:



A2. Microwave technology of uranium-thorium compositions production

The microwave radiation at frequencies of 915 MHz and 2450 is well absorbed by moisture. This property is used to remove the last of the various condensed systems. Microwave radiation is also used for heating dielectrics, so by microwave treatment of uranium nitrate solution, plutonium, thorium were studied. Also were studied mixed nitrate solutions of the active elements, used for the production of mixed oxides nuclear fuel (so-called MOX-fuel): UO₂-PuO₂, UO₂-ThO₂ [7-8].

Nitrate solutions of uranium, plutonium and thorium efficiently absorb microwave radiation. Water evaporates rapidly, salt residue is being heated and decomposed and the oxide or oxides composition is obtained.

The process of obtaining mixed oxide uranium-plutonium fuel by microwave heating of U-Pu-Th solution and interim salt residue is realized on various microwave power level settings.

Figure 1 shows a diagram of the experimental microwave facility [7].

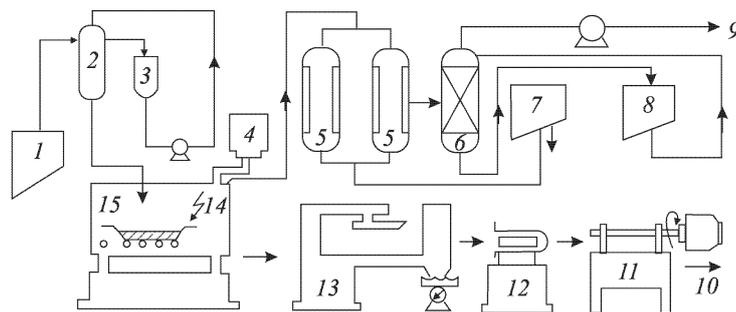


Figure 1. Experimental microwave facility

The mixed uranium and plutonium nitrate solution with a concentration 0.28 kg (U + Pu)/l was supplied from tank 1 to tank 2 with a fixed volume 7.2 liters, and then transported into a flat vessel 14 (internal diameter 0.55 m height 0.05 m) inside the microwave chamber 15. The flow of microwave energy was

directed from the generator 4 through the waveguide fiber to the solution in the vessel 14; generator power - 16 kW frequency - 2450 MHz.

After evaporation of water, nitrates would be decomposed to oxides. The remaining symbols in the figure are as follows: 3 - receiver; 5- capacitor; 6 - scrubber; 7 - collector of nitric acid; 8 - water scrubber; 9 - the exhaust gases; 10 - products (mixtures of U and Pu oxides); 11 - Ball Mill; 12 - calcination oven; 13 - device for extraction of obtained mixed oxides.

The process of distilling and solution concentration of nitric acid under microwave irradiation proceeded approximately 20 minutes at a temperature of about 383 K. After distillation liquid phase temperature was increased to 670 K or higher. In these conditions the process of nitrate decomposition proceeded. Then, the product composition $P_{11}O_2UO_3$ was reloaded into the oven of calcination-recovery, where it was adjusted to $P_{11}O_2UO_3$ composition.

This product is suitable for producing of tableted oxide (U-Pu) - fuel. The molar ratio Pu / U in oxide composition was 0, 1, 2, ∞ . A pilot batch of tableted oxide uranium-plutonium fuel was obtained; Such technology gave good results for homogeneity and distribution of plutonium in tablets.

Similar method was used to treat solution mixtures of Th (NO₃)₄-UO₂ (NO₃) with microwave radiation [14]. The resulting product was calcined in air at 1323÷ 1573 K, was milled in a ball mill, dried in air, forced through a sieve with a mesh size of 850 microns and pressed into pellets under pressure of 345 MPa, using zinc stearate as binder. Tablets with a diameter of 14.2 mm were sintered in hydrogen atmosphere at 1973 K with a heating and cooling rate of 250 ° C / h. The density of tablets was more than 96% of the theoretical.

A3. Plasma-chemical technique

Plasma-chemical technique involves mixing of the basic gas with dispersed aqueous solution of thorium nitrate. As the basic gas nitrogen or argon, heated to low temperature plasma, are used.

Mixing of a high temperature heat carrier gas with dispersed aqueous thorium nitrate solution leads to heating processes and evaporation of the solution droplets followed by thermal decomposition of salt particles, accompanied by enrichment of the gas phase with steam and synthesis of oxide particles.

Cooling of the reaction products, so-called tempering, is performed by mixing plasma products with sprayed liquid with high latent vaporization heat. As a liquid could be used deionized water, liquid nitrogen or liquid carbon monoxide which is fed at a pressure of 2 MPa to a region of the reaction zone.

The input rates to reactor conversion zone of gas mixture and dispersed aqueous solution usually differ significantly. Due to the injection area, a reciprocating motion of the gas with contained therein aerosol particles forms in the reactor bulk. Agglomeration of particles and their enlargement occurs in the circulation areas.

The growth and agglomeration of particles in the conversion zone promote subsequent separation of dust-gas mixture and reduces the amount of reverse reactions of ThO₂ particles with nitric acid vapor.

Aqueous thorium nitrate solution concentration range value and mass flow rate value are determined by producing conditions for thorium oxide powder composition with the desired concentration of contained metal.

Fig. 2 shows a schematic diagram of the plasmachemical process facility.

Basic gas (nitrogen, argon or a mixture thereof) is heated to a low temperature plasma state (5000 ÷ 6000K) with a high frequency induction discharge in a plasmatron HFI-2 and fed into the reaction zone 4 of the plasma reactor.

An aqueous thorium nitrate solution from the tank 10 is pumped into the

plasma reactor.

Injection of a solution into the mixing chamber of the reactor is carried out by pneumatic nozzles, providing an average dispersion of the spray liquid is not more than $(50\div 70)\cdot 10^{-6}$ m, in addition the injectors are supplied with pressurized gas (nitrogen).

After mixing heat-gas carrier temperature is reduced to $2000 \div 3000$ K.

Solution injection to the reforming zone is conducted at an angle to the heat carrier gas motion direction. During the process, pressure in the plasma reactor conversion zone is maintained at $10\div 50$ kPa below atmospheric pressure.

As a result, of thermal decomposition of the dispersed aqueous salt solution is formed in the conversion zone thorium oxide aerosol with a particular molar ratio O/Th depending on the reduction potential of the gas phase.

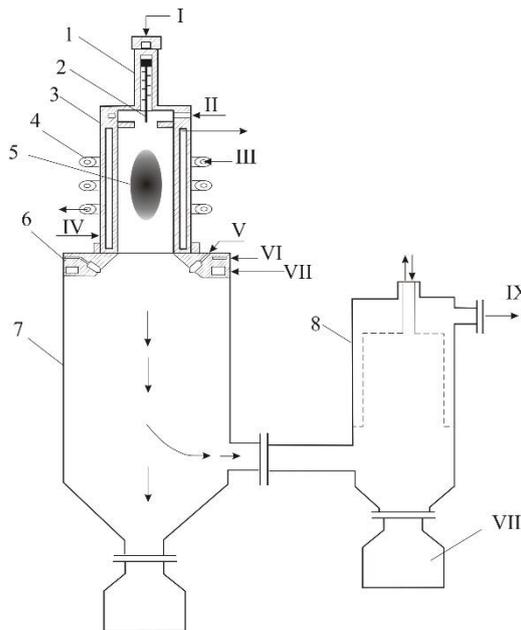


Fig. 2. 1-igniter; 2- electrode; 3- plasma torch; 4- inductor; 5- plasma discharge; 6- spraying device; 7- plasma chemical reactor; 8- filter; I- gas to ignite the discharge; II-gas for plasma formation; III- water to cool the inductor; IV- water to cool the plasma torch; V- processed inorganic metal compounds; VI- air for spraying; VII-Cooling water for nozzle; VIII- resulting product; IX- gas cleaning.

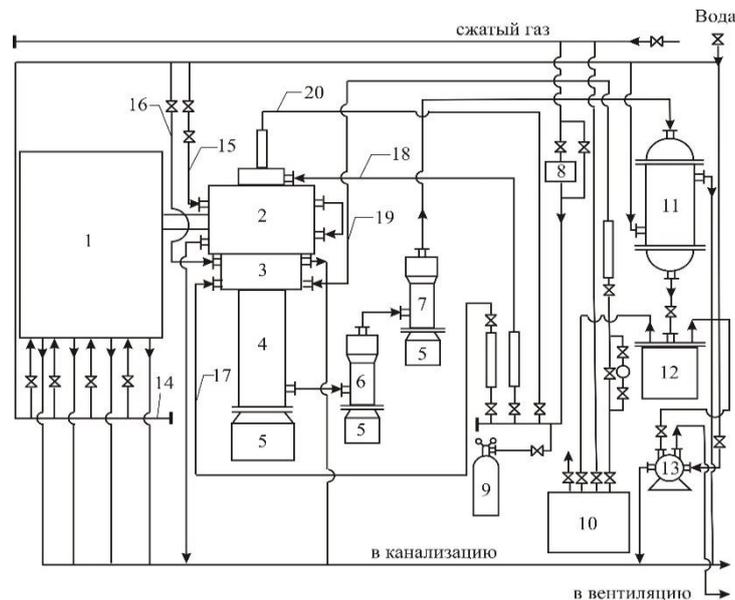


Fig. 3. 1- HF generator, 2- the plasma torch, 3- nozzle; 4- plasmachemical reactor, 5- reception bunker, 6- the first vortex dust collector, 7- second vortex dust collector, 8- filter, 9- plasma gas bottle; 10- feed solution container, 11- condensate container, 12- condensate tank, 13- vacuum pump, 14- cooling water for generator, 15- cooling water for plasma torch, 16- cooling water for nozzle, 17- gas for solution spraying, 18- gas for plasma formation, 19- the solution, 20- gas for ignition.

The size of the aerosol particles is about $(2\div 5)\cdot 10^{-6}$ m. Separation of oxide particles from dust and gas flow is carried in the separation system 6, 7 and 8 which consist of a cyclone filter and ceramic filter, worked at a temperatures of $500\div 600^{\circ}\text{C}$ and $200\div 300^{\circ}\text{C}$ respectively. Powder is collected in a container 5.

The purified gas consisting of residual vapor water, nitric acid vapors, nitrogen and hydrogen is sent to the joint condensation of water vapor and nitric acid to a refrigerator condenser 11 proposed to collect in a collector 12 various concentrations of nitric acid. Nitrogen (argon) is thrown in to the gas cleaning unit.

Thorium oxide aerosol also concentrates in distillation residue and could be recycled in the plasma reactor as a solution by adding thorium salts. Then oxide powder is heat-treated in a reducing atmosphere to remove residual nitrogen and adjusting the molar ratio O/Th to $2.06\div 2.18$.

This technology provides the outlet of the plasma unit homogenous mixture

of thorium oxide in a single step with utilization of circulating solution.

A3. The laboratory plasmatron facility description

Laboratory plasma stand based on a high-frequency plasma torch and designed to investigate the processes of the plasma combustion of various flammable compositions under a high-frequency discharge in air plasma (Fig. 4).

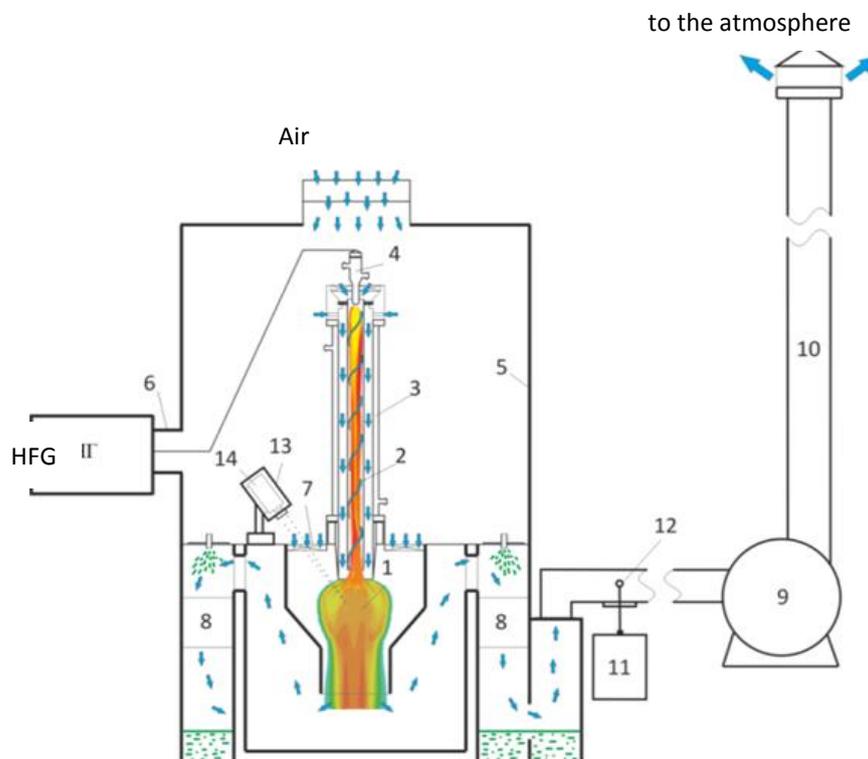


Figure 4. Scheme of the Plasma facility based on the high-frequency plasma torch:

1 - disperser 2 - HFT discharge, 3 - high-frequency plasma torch; 4 - copper electrode, 5 - case; 6 - coaxial output; 7 - reactor impeller; 8 - "wet" flue gas cleaning unit; 9 - exhaust fan (BP 12-26, №4), 10 - duct, 11 - gas analyzer «Quintox» KM 9106, 12 - sampler; 13 - a protective casing of the pyrometer, 14 - pyrometer IPE 140/45, ICH - VCHG8-60 / 13-01 high-frequency generator.

The plasma facility includes a high frequency generator HFG 8-60 / 13-01 (oscillating power up to 60 kW, operating frequency of 13.56 MHz), which through a coaxial pin 6 RF energy is supplied to the water-cooled copper electrode 4 of a high-frequency plasma torch -3, intended to generate air jets with a weight average plasma temperature to 4000 K. The discharge chamber of a high-frequency plasma torch plasmatron is made of quartz 860 mm length tube with 50

mm diameter.

High-pressure exhaust fan 9 provides pumping of a plasma gas (air) through the plasma torch of a high-frequency torch plasmotron-3, as well as air pumping through the reactor.

The input unit plasma gas, installed at the entrance of the HFT plasmatron is equipped with an impeller which swirl the incoming plasma gas (air) into the discharge chamber of a high-frequency torch plasmatron.

The impeller of a reactor 7 installed at the inlet of it is designed to swirl the incoming air and allow to adjust a chute inlet area of the impeller.

The gas analyzer 11 with a sampling device 12 for determining the content in the flue of the reactor gases pollutants (CO, NO, NO₂, SO₂, C_xH_y)

The gas analyzer 11 with a sampling device 12 is used for determination of the content in exhaust reactor gas fumes (CO, NO, NO₂, SO₂, C_xH_y) and measurements with a Pitot tube of the reactor air flow rate in the gas duct 250 mm diameter as well as measurements of the plasma gas (air) velocity through the HFT-plasmatron.

Pyrometer 14 is designed for contactless measurement of the plasma reactor temperature, based on carbon dioxide absorption lines.

CONCLUSION

A literature review on the thorium nuclear fuel technology processes was made. Calcining method, microwave and plasma-chemical technologies of uranium-thorium compositions production are described. Each method is effective, but the most perspective one is plasma-chemical.

In our research work, we use a special modelling soft Terra and plasma-chemical facility to study the plasma processes. Configuration and construction of our facility was described. Also, the scheme of the facility is shown.

REFERENCES

- 1 M. Kanno, S. Kokubo and H. Furuyal., "Preparation of thorium-uranium mixed oxide pellets", Journal of Nuclear Science and Technology, 19(11), 956-958(1982).
6. J.M. Pope and K.C. Radford, "Physical properties of some thoria powders and their influence on sinterability", Journal of Nuclear Materials, 52, 241-254 (1974).
7. S. Anthonysamy, K.Ananthasivan, V. Chandramouli, I. Kaliappan, and P.R. Vasudeva Rao, "Combustion synthesis of Urania-thoria solid solutions", Journal of Nuclear Materials, 278, 346-357(2000)
8. P. Rodriguez and C.V. Sundaram, "Nuclear and materials aspects of thorium fuel cycle", Journal of Nuclear Materials, 100, 227-249 (1981).
9. K.W. Kang, S.K. Kim, K.W. Song, J.H. Yang and Y.H. Jung, "Effect of TiO₂ and Al(OH)₃ on sintering behavior of UO₂-Gd₂O₃ fuel pellets", Journal of the Korean Nuclear Society", 32, 559-565(2000).
10. Dash S. e.a. "Temperature programmed decomposition of thorium nitrate pentahydrate", J. Nucl. Mater. V. 278. No 2-3. 2000.- P. 173.
11. Development of the Co-Conversion Process of Pu-U Nitrate Mixed Solution to Mixed Oxide Powder using a Microwave Heating Method / Koizumi M., Otsuka K., Isagava H., et, al.// Trans. Amer. Nucl. Soc. 1981. V. 38. P. 203-204
12. Process to Produce Starting Material for Fuel fabrication Outline of the Co-Conversion Facility of Pu-U Nitrate Solution to Mixed Oxide Powder using a Microwave Heating Method / Oshima H., Tamura T., Koizumi M. // Trans. Amer. Nucl. Soc. 1982. V. 40. P. 48-50

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(справочное)

Таблица Б1 – Расчет показателей горения жидких горючих композиций ВСОК-1

ВСК/(Спирт+ВСК)	Состав ВСОК						Q _{нр.}				
	Соль		H ₂ O	Спирт	А	W	Метанол	Этанол	Пропанол	Бутанол	Ацетон
	UO ₂ (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ ·6H ₂ O									
1,000	0,055	0,595	0,350	0,000	0,650	0,350	-0,875	-0,875	-0,875	-0,875	-0,875
0,900	0,049	0,536	0,315	0,100	0,585	0,315	1,208	1,893	2,351	2,560	2,367
0,800	0,044	0,476	0,280	0,200	0,520	0,280	3,290	4,660	5,576	5,994	5,608
0,730	0,040	0,434	0,256	0,270	0,475	0,256	4,748	6,597	7,834	8,399	7,877
0,720	0,040	0,428	0,252	0,280	0,468	0,252	4,956	6,874	8,156	8,742	8,201
0,710	0,039	0,423	0,249	0,290	0,462	0,249	5,164	7,151	8,479	9,086	8,525
0,700	0,038	0,417	0,245	0,300	0,455	0,245	5,373	7,428	8,802	9,429	8,850
0,670	0,037	0,399	0,235	0,330	0,436	0,235	5,997	8,258	9,769	10,460	9,822
0,660	0,036	0,393	0,231	0,340	0,429	0,231	6,206	8,535	10,092	10,803	10,146
0,600	0,033	0,357	0,210	0,400	0,390	0,210	7,455	10,195	12,027	12,864	12,091
0,560	0,031	0,333	0,196	0,440	0,364	0,196	8,288	11,302	13,317	14,238	13,388
0,550	0,030	0,327	0,193	0,450	0,358	0,193	8,496	11,579	13,640	14,581	13,712
0,540	0,030	0,321	0,189	0,460	0,351	0,189	8,705	11,856	13,962	14,925	14,036
0,500	0,027	0,298	0,175	0,500	0,325	0,175	9,538	12,963	15,253	16,299	15,333
0,400	0,022	0,238	0,140	0,600	0,260	0,140	11,620	15,730	18,478	19,733	18,574
0,300	0,016	0,179	0,105	0,700	0,195	0,105	13,703	18,498	21,704	23,168	21,816
0,200	0,011	0,119	0,070	0,800	0,130	0,070	15,785	21,265	24,929	26,603	25,057
0,100	0,005	0,060	0,035	0,900	0,065	0,035	17,868	24,033	28,155	30,037	28,299

Таблица Б2 – Расчет показателей горения жидких горючих композиций ВСОК-3

ВСК/(Спирт+ВСК)	Состав ВСОК						Q _{нр.}				
	Соль		H ₂ O	Спирт	А	W	Метанол	Этанол	Пропанол	Бутанол	Ацетон
	UO ₂ (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ ·6H ₂ O									
1,000	0,171	0,479	0,350	0,000	0,650	0,350	-0,875	-0,875	-0,875	-0,875	-0,875
0,900	0,153	0,432	0,315	0,100	0,585	0,315	1,208	1,893	2,351	2,560	2,367
0,800	0,136	0,384	0,280	0,200	0,520	0,280	3,290	4,660	5,576	5,994	5,608
0,730	0,124	0,350	0,256	0,270	0,475	0,256	4,748	6,597	7,834	8,399	7,877
0,720	0,123	0,345	0,252	0,280	0,468	0,252	4,956	6,874	8,156	8,742	8,201
0,710	0,121	0,340	0,249	0,290	0,462	0,249	5,164	7,151	8,479	9,086	8,525
0,700	0,119	0,336	0,245	0,300	0,455	0,245	5,373	7,428	8,802	9,429	8,850
0,670	0,114	0,321	0,235	0,330	0,436	0,235	5,997	8,258	9,769	10,460	9,822
0,660	0,113	0,316	0,231	0,340	0,429	0,231	6,206	8,535	10,092	10,803	10,146
0,600	0,102	0,288	0,210	0,400	0,390	0,210	7,455	10,195	12,027	12,864	12,091
0,560	0,095	0,269	0,196	0,440	0,364	0,196	8,288	11,302	13,317	14,238	13,388
0,550	0,094	0,264	0,193	0,450	0,358	0,193	8,496	11,579	13,640	14,581	13,712
0,540	0,092	0,259	0,189	0,460	0,351	0,189	8,705	11,856	13,962	14,925	14,036
0,500	0,085	0,240	0,175	0,500	0,325	0,175	9,538	12,963	15,253	16,299	15,333
0,400	0,068	0,192	0,140	0,600	0,260	0,140	11,620	15,730	18,478	19,733	18,574
0,300	0,051	0,144	0,105	0,700	0,195	0,105	13,703	18,498	21,704	23,168	21,816
0,200	0,034	0,096	0,070	0,800	0,130	0,070	15,785	21,265	24,929	26,603	25,057
0,100	0,017	0,048	0,035	0,900	0,065	0,035	17,868	24,033	28,155	30,037	28,299

Таблица Б3 – Расчет показателей горения жидких горючих композиций ВСОК1.1

ВСОК/ (ВОЗДУХ+ ВСОК)	ВСОК1.1				Воздух	ц _{уд}	с _{уд}	Тад
	Соль		Н ₂ О	Метанол				
	UO ₂ (NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ · 6H ₂ O						
1	0,030	0,327	0,193	0,450	0,000			
0,90	0,027	0,295	0,173	0,405	0,100			
0,80	0,024	0,262	0,154	0,360	0,200			
0,70	0,021	0,229	0,135	0,315	0,300			
0,60	0,018	0,196	0,116	0,270	0,400			
0,50	0,015	0,164	0,096	0,225	0,500			
0,40	0,012	0,131	0,077	0,180	0,600			
0,35	0,011	0,115	0,067	0,158	0,650	4,732	0,002	1180,582
0,30	0,009	0,098	0,058	0,135	0,700	4,546	0,002	1269,097
0,20	0,006	0,065	0,039	0,090	0,800			
0,10	0,003	0,033	0,019	0,045	0,900			

Таблица Б4 – Расчет показателей горения жидких горючих композиций ВСОК3.1

ВСОК/ (ВОЗДУХ+ ВСОК)	ВСОК3.1				Воздух	ц _{уд}	с _{уд}	Тад
	Соль		Н ₂ О	Метанол				
	UO ₂ (NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ · 6H ₂ O						
1	0,094	0,264	0,193	0,450	0,000			
0,90	0,084	0,237	0,173	0,405	0,100			
0,80	0,075	0,211	0,154	0,360	0,200			
0,70	0,066	0,185	0,135	0,315	0,300			
0,60	0,056	0,158	0,116	0,270	0,400			
0,50	0,047	0,132	0,096	0,225	0,500			
0,40	0,038	0,105	0,077	0,180	0,600			
0,35	0,033	0,092	0,067	0,158	0,650	4,741	0,0016	1177,596
0,30	0,028	0,079	0,058	0,135	0,700	4,549	0,0015	1268,647
0,20	0,019	0,053	0,039	0,090	0,800			
0,10	0,009	0,026	0,019	0,045	0,900			

Таблица Б5 – Расчет показателей горения жидких горючих композиций ВСОК1.2

ВСОК/ (ВОЗДУХ+ ВСОК)	ВСОК1.2				Воздух	ц _{уд}	с _{уд}	Тад
	Соль		Н ₂ О	Этанол				
	UO ₂ (NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ · 6H ₂ O						
1,00	0,036	0,393	0,231	0,340	0,000			
0,90	0,027	0,295	0,173	0,405	0,100			
0,80	0,024	0,262	0,154	0,360	0,200			
0,70	0,021	0,229	0,135	0,315	0,300			
0,60	0,018	0,196	0,116	0,270	0,400			
0,50	0,015	0,164	0,096	0,225	0,500			
0,35	0,011	0,115	0,067	0,158	0,650	5,027	0,002	1097,713
0,30	0,009	0,098	0,058	0,135	0,700	4,797	0,002	1191,701
0,20	0,006	0,065	0,039	0,090	0,800			
0,10	0,003	0,033	0,019	0,045	0,900			

Таблица Б6 – Расчет показателей горения жидких горючих композиций ВСОК3.2

ВСОК/ (ВОЗДУХ+ ВСОК)	ВСОК3.2				Воздух	ц _{уд}	с _{уд}	Тад
	Соль		Н ₂ О	Этанол				
	UO ₂ (NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ · 6H ₂ O						
1	0,113	0,316	0,231	0,340	0,000			
0,90	0,084	0,237	0,173	0,405	0,100			
0,80	0,075	0,211	0,154	0,360	0,200			
0,70	0,066	0,185	0,135	0,315	0,300			
0,60	0,056	0,158	0,116	0,270	0,400			
0,50	0,047	0,132	0,096	0,225	0,500			
0,40	0,038	0,105	0,077	0,180	0,600	5,262	0,0017	1013,023
0,30	0,028	0,079	0,058	0,135	0,700	4,800	0,0016	1191,263
0,20	0,019	0,053	0,039	0,090	0,800			
0,10	0,009	0,026	0,019	0,045	0,900			

Таблица Б7 – Расчет показателей горения жидких горючих композиций ВСОК1.3

ВСОК/ (ВОЗДУХ+ ВСОК)	ВСОК1.3				Воз дух	ц _{уд}	с _{уд}	Тад
	Соль		Н ₂ О	Пропан- нол				
	UO ₂ (NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ · 6H ₂ O						
1	0,039	0,423	0,249	0,290	0,00			
0,9	0,027	0,295	0,173	0,405	0,10			
0,8	0,024	0,262	0,154	0,360	0,20			
0,7	0,021	0,229	0,135	0,315	0,30			
0,6	0,018	0,196	0,116	0,270	0,40			
0,5	0,015	0,164	0,096	0,225	0,50			
0,45	0,014	0,147	0,087	0,203	0,55			
0,4	0,012	0,131	0,077	0,180	0,60			
0,3	0,009	0,098	0,058	0,135	0,70	4,930	0,0015	1144,057
0,25	0,008	0,082	0,048	0,113	0,75	4,678	0,0015	1251,483
0,2	0,006	0,065	0,039	0,090	0,80			
0,1	0,003	0,033	0,019	0,045	0,90			

Таблица Б8 – Расчет показателей горения жидких горючих композиций ВСОК3.3

ВСОК/ (ВОЗДУХ+ ВСОК)	ВСОК3.3				Воз дух	ц _{уд}	с _{уд}	Тад
	Соль		Н ₂ О	Пропан- нол				
	UO ₂ (NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ · 6H ₂ O						
1	0,121	0,340	0,249	0,290	0,00			
0,9	0,084	0,237	0,173	0,405	0,10			
0,8	0,075	0,211	0,154	0,360	0,20			
0,7	0,066	0,185	0,135	0,315	0,30			
0,6	0,056	0,158	0,116	0,270	0,40			
0,5	0,047	0,132	0,096	0,225	0,50			
0,45	0,042	0,119	0,087	0,203	0,55			
0,4	0,038	0,105	0,077	0,180	0,60			
0,3	0,028	0,079	0,058	0,135	0,70	4,934	0,0016	1143,654
0,25	0,023	0,066	0,048	0,113	0,75	4,683	0,0015	1249,957
0,2	0,019	0,053	0,039	0,090	0,80			
0,1	0,009	0,026	0,019	0,045	0,90			

Таблица Б9 – Расчет показателей горения жидких горючих композиций ВСОК1.4

ВСОК/ (ВОЗДУХ+ ВСОК)	ВСОК1.4				Воз дух	ц _{уд}	с _{уд}	Тад
	Соль		Н ₂ О	Бута- нол				
	UO ₂ (NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ · 6H ₂ O						
1	0,040	0,434	0,256	0,270	0,00			
0,9	0,027	0,295	0,173	0,405	0,10			
0,8	0,024	0,262	0,154	0,360	0,20			
0,7	0,021	0,229	0,135	0,315	0,30			
0,6	0,018	0,196	0,116	0,270	0,40			
0,5	0,015	0,163	0,096	0,225	0,5			
0,45	0,014	0,147	0,087	0,203	0,55			
0,4	0,012	0,130	0,077	0,18	0,6			
0,3	0,009	0,098	0,058	0,135	0,70	5,013	0,0016	1110,061
0,25	0,008	0,082	0,048	0,113	0,75	4,746	0,0015	1219,068
0,2	0,006	0,065	0,039	0,090	0,80			
0,1	0,003	0,033	0,019	0,045	0,90			

Таблица Б10 – Расчет показателей горения жидких горючих композиций ВСОК3.4

ВСОК/ (ВОЗДУХ+ ВСОК)	ВСОК3.4				Воз дух	ц _{уд}	с _{уд}	Тад
	Соль		Н ₂ О	Бута- нол				
	UO ₂ (NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ · 6H ₂ O						
1	0,124	0,350	0,256	0,270	0,00			
0,9	0,084	0,237	0,173	0,405	0,10			
0,8	0,075	0,211	0,154	0,360	0,20			
0,7	0,066	0,185	0,135	0,315	0,30			
0,6	0,056	0,158	0,116	0,270	0,40			
0,5	0,047	0,132	0,096	0,225	0,5			
0,45	0,042	0,119	0,087	0,203	0,55			
0,4	0,037	0,105	0,077	0,18	0,6			
0,3	0,028	0,079	0,058	0,135	0,70	5,017	0,0016	1109,61
0,25	0,023	0,066	0,048	0,113	0,75	4,751	0,0015	1217,576
0,2	0,019	0,053	0,039	0,090	0,80			
0,1	0,009	0,026	0,019	0,045	0,90			

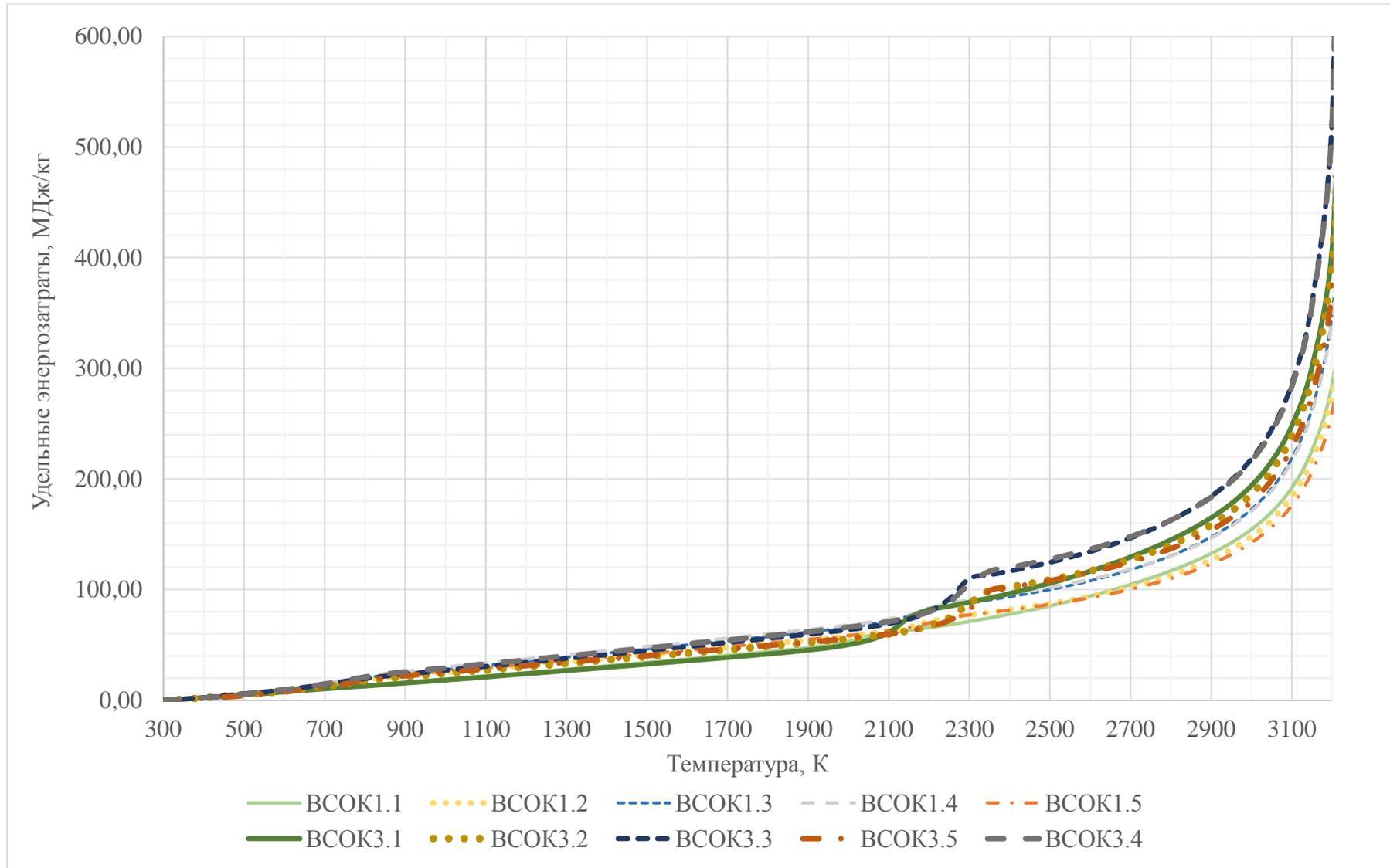
Таблица Б11 – Расчет показателей горения жидких горючих композиций ВСОК1.5

ВСОК/ (ВОЗДУХ+ ВСОК)	ВСОК1.5				Воз дух	ц _{уд}	с _{уд}	Тад
	Соль		Н ₂ О	Ацетон				
	UO ₂ (NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ · 6H ₂ O						
1,000	0,039	0,423	0,249	0,290	0,00			
0,900	0,027	0,295	0,173	0,405	0,10			
0,800	0,024	0,262	0,154	0,360	0,20			
0,700	0,021	0,229	0,135	0,315	0,30			
0,600	0,018	0,196	0,116	0,270	0,40			
0,500	0,015	0,164	0,096	0,225	0,50			
0,450	0,014	0,147	0,087	0,203	0,55			
0,400	0,012	0,131	0,077	0,180	0,60			
0,350	0,011	0,115	0,067	0,158	0,65	4,925	0,0015	1156,718
0,300	0,009	0,098	0,058	0,135	0,70	4,709	0,002	1247,631
0,200	0,006	0,065	0,039	0,090	0,80			
0,100	0,003	0,033	0,019	0,045	0,90			

Таблица Б12 – Расчет показателей горения жидких горючих композиций ВСОК3.5

ВСОК/ (ВОЗДУХ+ ВСОК)	ВСОК3.5				Воз дух	ц _{уд}	с _{уд}	Тад
	Соль		Н ₂ О	Ацетон				
	UO ₂ (NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ · 6H ₂ O						
1	0,121	0,340	0,249	0,290	0,00			
0,9	0,084	0,237	0,173	0,405	0,10			
0,8	0,075	0,211	0,154	0,360	0,20			
0,7	0,066	0,185	0,135	0,315	0,30			
0,6	0,056	0,158	0,116	0,270	0,40			
0,5	0,047	0,132	0,096	0,225	0,50			
0,45	0,042	0,119	0,087	0,203	0,55			
0,4	0,038	0,105	0,077	0,180	0,60			
0,35	0,033	0,092	0,067	0,158	0,65	4,931	0,0016	1155,073
0,3	0,028	0,079	0,058	0,135	0,70	4,712	0,0015	1247,167
0,2	0,019	0,053	0,039	0,090	0,80			
0,1	0,009	0,026	0,019	0,045	0,90			

Рисунок Б1 –График зависимости удельных энергозатрат от температуры



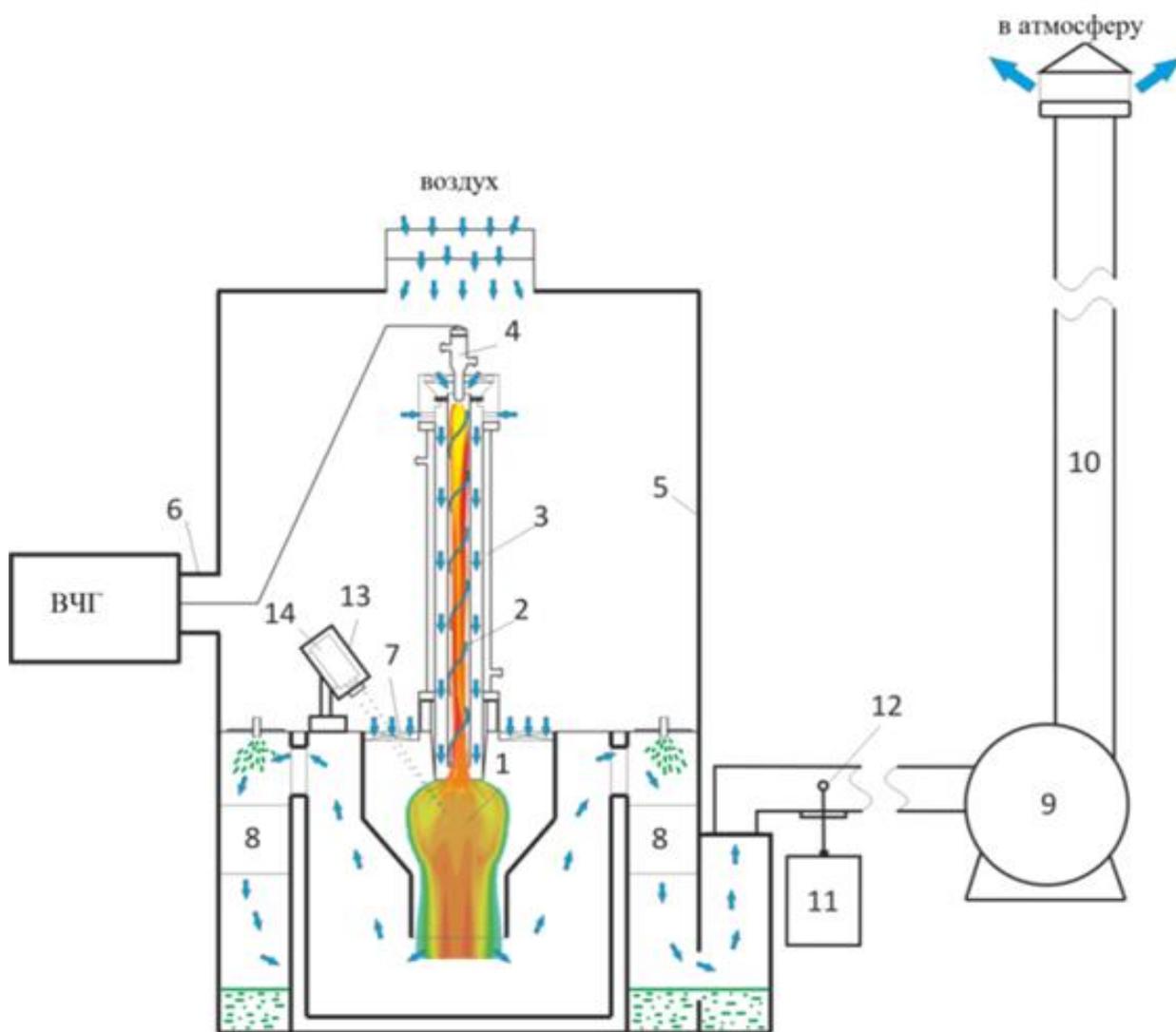


Рисунок Б2 – Схема плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона:
 1 – диспергатор, 2 – ВЧФ-разряд, 3 – ВЧФ-плазмотрон; 4 – медный электрод, 5 – корпус; 6 – коаксиальный вывод; 7 – импеллер реактора; 8 – узел «мокрой» очистки отходящих газов; 9 – вытяжной вентилятор (ВР 12-26, №4), 10 – воздуховод, 11 – газоанализатор «Quintox» КМ 9106, 12 – пробоотборник; 13 – защитный кожух пирометра, 14 – пирометр IPE 140/45, ВЧГ – высокочастотный генератор ВЧГ8-60/13-01.

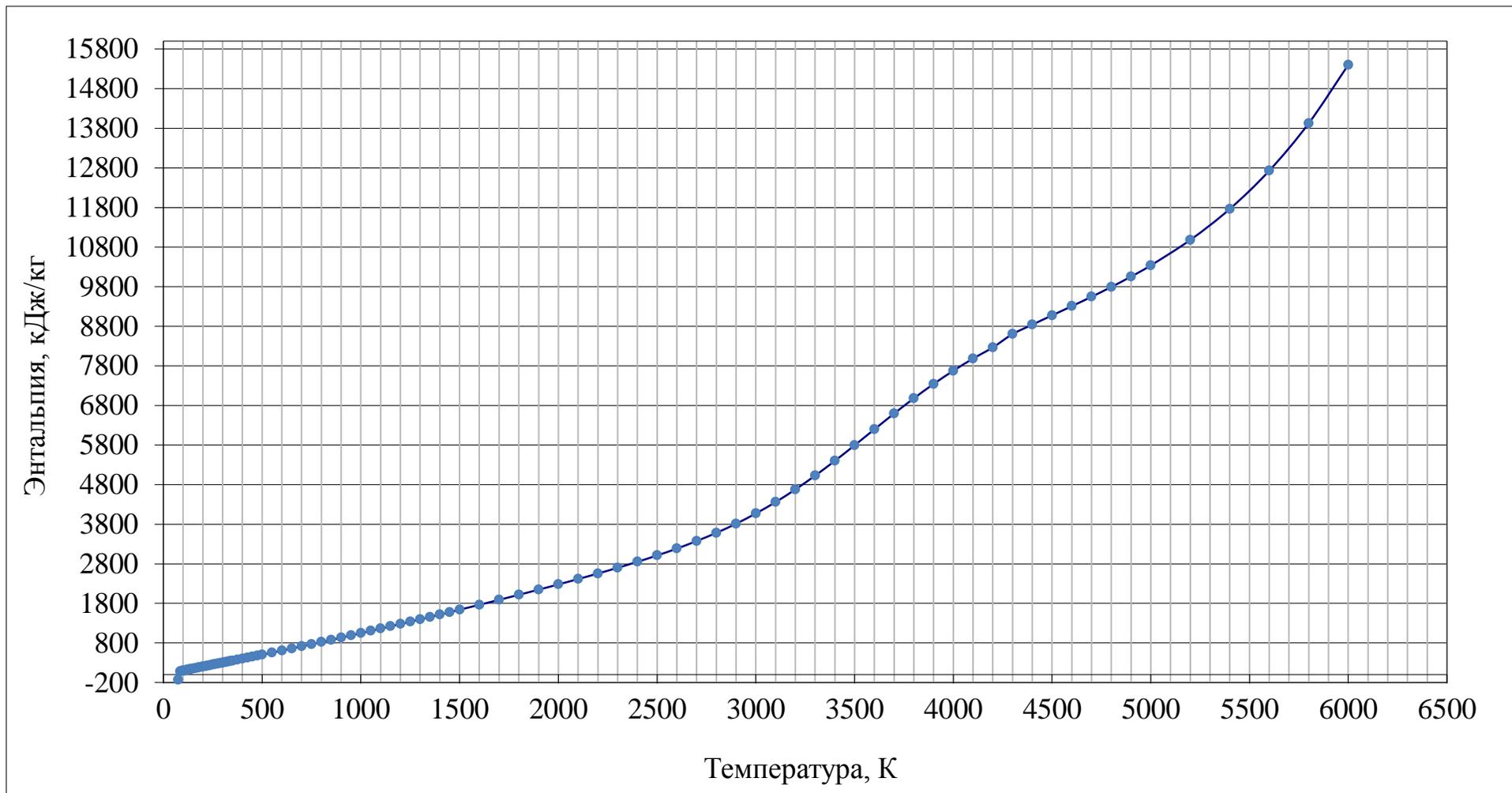


Рисунок Б3 – Зависимость энтальпии воздуха от его температуры

Таблица Б13 – Результаты расчетов расхода воздуха через газоход

Симп	$\langle f_{гхд} \rangle$	$\Delta f_{гхд}$	$\varepsilon f_{гхд}$	$\langle V_{гхд} \rangle$	$\Delta V_{гхд}$	$\varepsilon V_{гхд}$	$\langle Q_{гхд} \rangle$	$\langle Q_{гхд} \rangle$	$\Delta Q_{гхд}$	$\varepsilon Q_{гхд}$
см ²	Па	Па	%	м/с	м/с	%	м ³ /с	кг/с	кг/с	%
1650	235,29	30,99	13,17	19,56	1,29	6,59	0,98	1,20	0,08	6,59
1485	231,14	19,01	8,22	19,41	0,80	4,11	0,97	1,19	0,05	4,11
1320	221,00	30,88	13,97	18,95	1,32	6,99	0,95	1,16	0,08	6,99
1155	232,43	14,95	6,43	19,47	0,63	3,22	0,97	1,19	0,04	3,22
990	210,14	15,74	7,49	18,51	0,69	3,75	0,93	1,13	0,04	3,75
825	212,00	22,48	10,60	18,58	0,98	5,30	0,93	1,14	0,06	5,30
660	199,00	21,11	10,61	18,00	0,95	5,30	0,90	1,10	0,06	5,30
495	190,71	10,87	5,70	17,64	0,50	2,85	0,88	1,08	0,03	2,85
СР.ЗН.	216,46	20,75	9,53	18,76	0,90	4,76	0,94	1,15	0,05	4,76

Таблица Б14 – Результаты расчетов расхода воздуха через ВЧФ-плазмотрон

Симп	$\langle f_{птр} \rangle$	$\Delta f_{птр}$	$\varepsilon f_{птр}$	$\langle V_{птр} \rangle$	$\Delta V_{птр}$	$\varepsilon V_{птр}$	$\langle Q_{птр} \rangle$	$\langle Q_{птр} \rangle$	$\Delta Q_{птр}$	$\varepsilon Q_{птр}$
см ²	Па	Па	%	м/с	м/с	%	м ³ /с	кг/с	кг/с	%
1650	173,43	10,53	6,07	16,82	0,51	3,04	0,04	0,05	0,0015	3,04
1485	187,43	5,01	2,67	17,49	0,23	1,34	0,04	0,05	0,0007	1,34
1320	208,43	15,50	7,44	18,43	0,69	3,72	0,04	0,05	0,0020	3,72
1155	217,71	6,40	2,94	18,85	0,28	1,47	0,05	0,06	0,0008	1,47
990	240,14	6,26	2,61	19,80	0,26	1,30	0,05	0,06	0,0008	1,30
825	260,29	9,84	3,78	20,61	0,39	1,89	0,05	0,06	0,0012	1,89
660	326,71	17,58	5,38	23,09	0,62	2,69	0,06	0,07	0,0018	2,69
495	377,29	24,46	6,48	24,81	0,80	3,24	0,06	0,07	0,0024	3,24
СР.ЗН.	248,93	11,95	4,67	19,99	0,47	2,34	0,05	0,06	0,0014	2,34

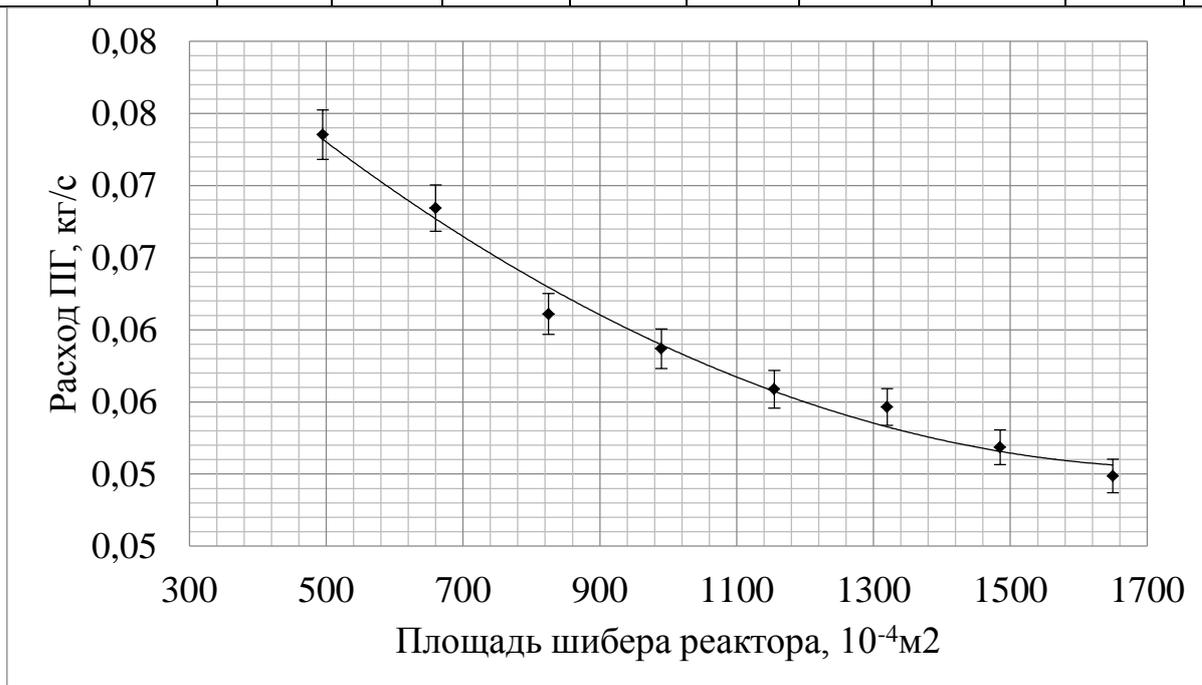


Рисунок 3.1 – Массовый расход плазмообразующего газа через плазмотрон

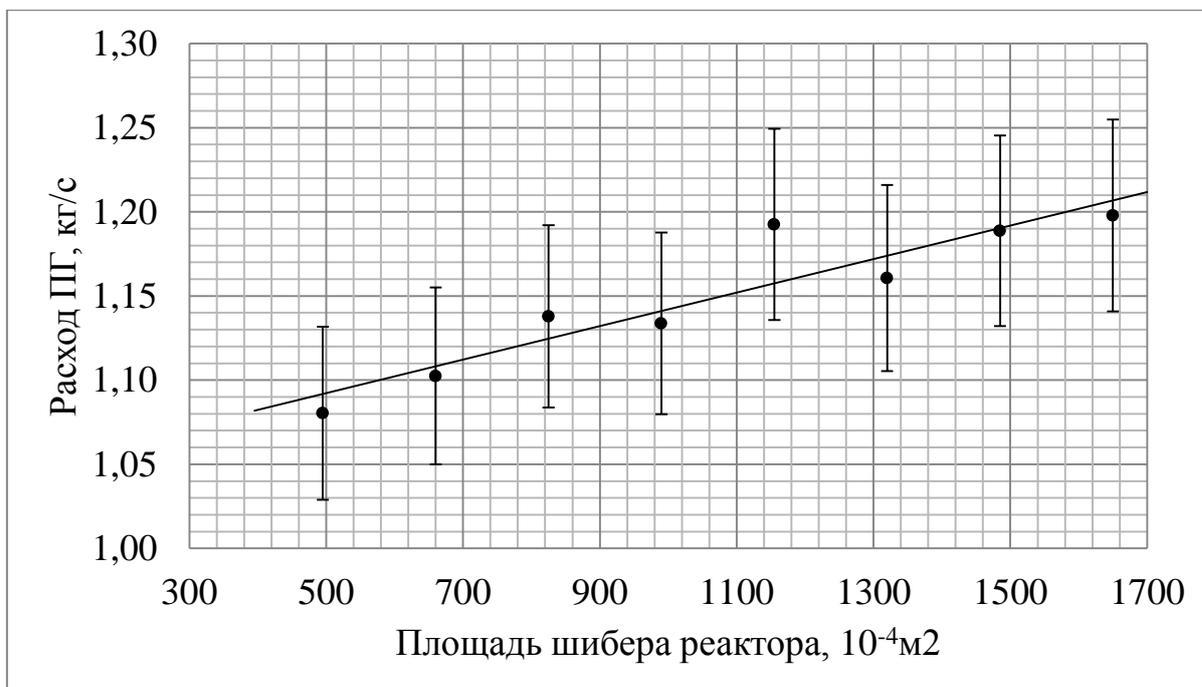


Рисунок 3.2 – Массовый расход плазмообразующего газа через газоход

Таблица Б15 – Результаты расчетов расхода воздуха через реактор

Симп	$\langle Q_p \rangle$	$\langle Q_p \rangle$	ΔQ_p	εQ_p
см^2	$\text{м}^3/\text{с}$	$\text{кг}/\text{с}$	$\text{кг}/\text{с}$	%
1650	0,937	1,148	0,081	7,092
1485	0,928	1,137	0,052	4,590
1320	0,903	1,106	0,081	7,347
1155	0,928	1,137	0,041	3,621
990	0,878	1,075	0,044	4,080
825	0,879	1,077	0,065	6,079
660	0,844	1,034	0,060	5,793
495	0,822	1,007	0,040	3,949
СР. ЗН.	0,890	1,090	0,058	5,319

Таблица Б16 – Результаты расчетов

Ua, кВ	Ia, А	Симп, м ²	Iс,А	P0, кВт	Pa, кВт	Pс, кВт	Pэ, кВт	Pк, кВт	Pp, кВт	Pстр, кВт	Нт, кДж/кг	Tстр, К	η уст, %
5,8	3	0,165	1,2	17,40	4,086	0,277	1,707	0,066	11,330	11,264	525,584	520,559	64,737
		0,149			4,086	0,277	1,707	0,066	11,330	11,264	516,920	512,236	64,737
		0,132			3,999	0,277	1,707	0,066	11,417	11,351	506,685	502,404	65,237
		0,116			3,999	0,302	1,707	0,066	11,391	11,326	502,549	498,432	65,092
		0,099			3,999	0,328	1,707	0,066	11,366	11,301	491,838	488,144	64,947
		0,083			4,086	0,328	1,707	0,066	11,279	11,214	484,133	480,742	64,447
		0,066			3,999	0,328	1,654	0,066	11,420	11,354	467,272	464,546	65,253
6,5	3,5	0,165	1,2	22,75	5,129	0,428	2,134	0,082	15,059	14,977	599,833	591,878	65,831
		0,149			5,390	0,403	2,187	0,082	14,770	14,688	582,755	575,475	64,561
		0,132			5,303	0,403	2,134	0,066	14,910	14,844	570,197	563,412	65,250
		0,116			5,216	0,378	2,080	0,066	15,075	15,010	568,333	561,621	65,977
		0,099			5,216	0,378	2,080	0,066	15,075	15,010	554,704	548,529	65,977
		0,083			5,216	0,353	2,134	0,066	15,047	14,982	545,901	540,074	65,854
		0,066			5,129	0,353	2,134	0,066	15,134	15,069	521,897	517,017	66,236
6,5	4	0,165	1,2	26,00	5,999	0,832	2,347	0,115	16,823	16,708	634,458	625,138	64,261
6,5		0,149		26,00	6,086	0,832	2,400	0,115	16,682	16,568	618,908	610,202	63,722
6,6		0,132		26,40	6,173	0,806	2,454	0,115	16,967	16,853	606,710	598,485	63,835
6,9		0,116		27,60	6,434	0,806	2,454	0,115	17,906	17,792	618,010	609,338	64,463
7		0,099		28,00	6,781	0,806	2,667	0,115	17,745	17,631	599,124	591,198	62,967
7		0,083		28,00	6,607	0,781	2,614	0,115	17,998	17,883	593,465	585,761	63,868
7,1		0,066		28,40	6,521	0,781	2,614	0,115	18,485	18,370	570,447	563,651	64,683
7	4,6	0,132	1,2	32,20	7,129	0,932	2,774	0,131	21,365	21,234	724,976	712,086	65,943
7		0,116		32,20	7,129	0,932	2,774	0,131	21,365	21,234	708,642	696,396	65,943
7		0,099		32,20	7,303	0,907	2,827	0,131	21,163	21,032	682,696	671,473	65,316
7,2		0,083		33,12	7,477	0,907	2,880	0,131	21,856	21,725	688,239	676,797	65,593
7,5		0,066		34,50	7,738	0,907	2,934	0,131	22,921	22,790	686,578	675,202	66,059

ПРИЛОЖЕНИЕ В (справочное)

Таблица В1 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ													
				Март			Апрель			Май			Июнь				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2			
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2	▨													
2	Изучение проблемы и подбор литературы	Руководитель, студент	5	▨	■												
3	Изучение литературы и выбор методов решения проблемы	Студент	18		■	■											
4	Календарное планирование работ	Руководитель, студент	1				▨	■									
5	Моделирование технологического процесса на компьютере	Студент	18					■	■	■							
6	Планирование и проведение экспериментальных исследований	Руководитель, студент	18							▨	■						
7	Анализ и обработка полученных результатов	Студент	12									■	■				
8	Оценка эффективности полученных результатов	Студент	2													■	
9	Составление пояснительной записки	Студент	18														■
10	Проверка правильности оформления пояснительной записки согласно ГОСТу	Руководитель, студент	1														▨
11	Подготовка к защите	Студент	3														■

▨ – Руководитель ■ – Студент

Таблица В2 – Итоговая SWOT матрица

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Экономичность и энергоэффективность технологии С2. Экологичность технологии. С3. Более низкая стоимость получения оксидных композиций по сравнению с другими технологиями. С4. Не имеющая аналогов технология</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство промышленных установок под ключ. Сл2. Несвоевременное финансовое обеспечение. Сл3. Отсутствие собственной сырьевой базы (водно-органических композиций).</p>
	<p>С5. Получение дополнительной тепловой энергии (до 2МВт*ч/т) на бытовые технологические нужды С6. Наличие необходимого оборудования для проведения испытаний.</p>	
<p>Возможности: В1. Монополизация рынка по получению гомогенных оксидных композиций для ториевого топлива. В2. Вовлечение в ЯТЦ тория в качестве сырьевого нуклида.</p>	<p>В1С1С2С3С4С6, В2С1С2С3С4. Из данной комбинации видим, что вышеперечисленные сильные стороны благотворно влияют на возможность создания рынка по получению гомогенных оксидных композиций для ториевого топлива и появление дополнительного спроса на продукты, которые появляются после переработки, например, азотная кислота для лакокрасочной промышленности.</p>	<p>В1Сл2Сл3, В2Сл1Сл2. Анализ показывает, что такие возможности как В1 и В2 положительно влияют на слабые стороны проекта, т.к создание рынка появление дополнительного спроса могут существенно улучшить сложное финансовое положение и повысить интерес компаний, оказывающих инжиниринговые услуги..</p>
<p>Угрозы: У1. Недоверие к новой технологии производства обусловленное ее уникальностью. У2. Ограниченность средств на проведение НИОКР на предприятиях. У3. Отсутствие опыта промышленной эксплуатации разрабатываемой технологии.</p>	<p>У1С2С3С6, У2С1С3С6, У3С2С3С6. Проведя анализ сильных сторон и угроз, видно, что вышеуказанные сильные стороны проекта могут существенно понизить процент угроз исследования</p>	<p>-</p>

Таблица В3 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соответственность»	Консультант по языковому разделу	Студент
Составление и утверждение технического задания	О				
Изучение проблемы и подбор литературы					И
Изучение литературы и выбор методов решения проблемы	С				И
Календарное планирование работ по теме	О				И
Моделирование технологического процесса на компьютере					И
Планирование и проведение экспериментальных исследований	С				И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			И
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	И
Анализ и обработка полученных результатов					И
Оценка эффективности полученных результатов	С				И
Составление пояснительной записки	С				И
Проверка правильности оформления пояснительной записки согласно ГОСТу	С				И
Подготовка к защите	О				И