

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

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы

Исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного уран - ториевого ядерного топлива

УДК 621.039.543:66.011:533.9

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Тихонов Алексей Евгеньевич		

Руководитель ВКР

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

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Е.С.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко С.Н.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Изотопные технологии и материалы	Дорофеева Л.И.	к.ф.-м.н		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий.
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели.
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия.
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия.
УК(У)-6	Способен определить и реализовать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.
<i>Общепрофессиональные компетенции</i>	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач,
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК(У)-3	Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ
<i>Профессиональные компетенции</i>	
ПК(У)-1	Способен использовать фундаментальные законы в объеме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза новых идей, творческого самовыражения
ПК(У)-2	Способен создавать новые методы расчета современных физических установок и устройств, разрабатывать методы и перспективные технологии
ПК(У)-3	Способен создавать математические и физические модели, описывающие процессы и явления в разделительных каскадах, установках разделения и тонкой очистки веществ, переработки и обезвреживания промышленных отходов
ПК(У)-4	Способен оценить перспективы развития ядерной отрасли, использовать её современные достижения и передовые технологии в научно-исследовательских работах
ПК(У)-5	Способен самостоятельно выполнять экспериментальные и теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современных приборов для научных исследований и математических методов расчета

ПК(У)-6	Способен провести расчет, концептуальную и проектную разработку современных физических установок и приборов
ПК(У)-7	Способен 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
ПК(У)-8	Способен к объективному анализу технических и расчетно-теоретических разработок, решений и проектов, учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности, другим нормативным актам на российском и международном уровне, подготовить экспертное заключение
ПК(У)-9	Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования и дополнительного профессионального образования (ДПО)
ПК(У)-10	Способен разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов, управлять программами освоения новой продукции и технологии

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

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

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Л.И. Дорофеева
 «___» _____ 2020 г.

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
ОАМ91	Тихонову Алексею Евгеньевичу

Тема работы:

Исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного уран - ториевого ядерного топлива	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	22.01.2021 № 22-70/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	12.06.2021
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Исследовать влияние органического компонента на показатели горючести водно-органических растворов на основе нитратов урана и тория. Определить режимы для плазмохимического синтеза порошков уран-ториевых оксидных композиций и исследовать их физико-химические свойства.
---------------------------------	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	При разработке магистерской диссертации должны быть рассмотрены следующие вопросы: 1. Обзор и анализ физических методов получения наноразмерных порошков 2. Определение оптимальных составов водно-органических нитратных растворов 3. Термодинамическое моделирование равновесных составов продуктов плазмохимического синтеза 4. Подготовка экспериментального плазменного стенда 5. Подготовка модельных прекурсоров и проведение экспериментов с получением опытной партии порошка 6. Исследование и анализ свойств полученного порошка, синтезированного в плазме ВЧФ-разряда 7. Экономическое обоснование проведения НИР 8. Выводы по работе. Заключение
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Е.С. Киселева
Социальная ответственность	С.Н. Тимченко

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	22.01.2021 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	А.Е. Тихонов		

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОАМ91	Тихонову Алексею Евгеньевичу

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

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

<i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	1. Стоимость расходных материалов; 2. Норматив заработной платы.
<i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Коэффициенты для расчета заработной платы.
<i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды (30,2%).

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	1. Потенциальные потребители результатов исследования; 2. Анализ конкурентных технических решений; 3. SWOT – анализ.
<i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	1. Цели и результат проекта. 2. Организационная структура проекта. 3. Ограничения и допущения проекта.
<i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	1. Структура работ в рамках научного исследования; 2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения научного исследования; 3. Расчет бюджета научно - технического исследования (НТИ).
<i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	1. Определение интегрального финансового показателя разработки; 2. Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; 3. Определение интегрального показателя эффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Матрица SWOT
5. Диаграмма Гантта
6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОАМ91	Тихонов Алексей Евгеньевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM91	Тихонову Алексею Евгеньевичу

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

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места на предмет возникновения:</p>	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеословия, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения); – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы);
<p>2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме</p>	<ul style="list-style-type: none"> – требования охраны труда при работе на ПЭВМ; – требования охраны труда при работе на ВЧФ-плазмотроне; – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность; – радиационная безопасность; – химическая безопасность.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p>	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</p>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (причины, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко С.Н.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Тихонов Алексей Евгеньевич		

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла
 Период выполнения Весенний семестр 2020 /2021 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	12.06.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
22.01.21	<i>Выдача задания</i>	
10.02.21	<i>Выбор конструктивной схемы</i>	
08.03.21	<i>Расчет характеристик реактора, многогрупповой нейтронно-физический расчет</i>	
19.03.21	<i>Расчет длительности кампании ядерного топлива</i>	
09.04.21	<i>Оценка изменения состава ядерного топлива</i>	
15.05.21	<i>Введение метода интерполяции в многогрупповой расчет</i>	
12.06.21	<i>Сдача работы</i>	

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

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

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

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

Реферат

Выпускная квалификационная работа 109 страниц, 21 рисунок, 14 таблиц, 42 источника.

Ключевые слова: высокочастотный факельный разряд, плазма, ВЧФ-плазмотрон, уран-ториевое топливо, дисперсионное ядерное топливо.

Объектом исследования является процесс плазмохимического синтеза оксидных композиций для ядерного топлива уран ториевого цикла.

Цель работы – исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного уран-ториевого ядерного топлива.

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

В работе были определены составы смешанных водно-органических нитратных растворов, включающие уран, торий и матричный материал (магний), а также режимы их переработки, обеспечивающие прямой синтез в воздушной плазме топливных композиций для уран-ториевого дисперсионного топлива.

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.

Плазмохимический синтез – химический метод получения высокодисперсных порошков нитридов, карбидов, боридов и оксидов, заключающийся в протекании реакции в низкотемпературной плазме вдали от равновесия при высокой скорости образования.

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 объемной (для газообразных) единицы вещества.

Обозначения и сокращения

ВЧФ–разряд – высокочастотный факельный разряд.

ВЧФ–плазмотрон – высокочастотный факельный плазмотрон.

ВЧГ – высокочастотный генератор. **ПЭМ** – просвечивающая электронная микроскопия.

ВОНР – водно-органический нитратный раствор.

ОК – оксидная композиция.

Оглавление

Реферат	9
Определения	10
Обозначения и сокращения.....	11
Введение.....	14
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	17
1.1 Высокотемпературное дисперсионное ядерное топливо	17
1.2 Топливо для энергетических реакторов дисперсионного вида	18
1.3 Типы композиций дисперсионного ядерного топлива.....	19
1.4 Матричные материалы дисперсионного топлива IMF	21
1.5 Матричные материалы на основе соединений тория	22
1.6 Двуокись тория и топливо на основе двуокиси тория.....	23
1.7 Получение двуокиси тория.....	25
1.8 Получение изделия из двуокиси тория	28
1.9 Физические свойства двуокиси тория	35
1.10 Химические свойства двуокиси тория	40
2 РАСЧЕТЫ И АНАЛИТИКА	45
2.1 Описание плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона	45
2.2 Плазмохимическая переработка модельных ВОНР	49
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	51
ВЫВОДЫ	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	58
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	58
4.2 Анализ конкурентных технических решений.....	60

4.3 SWOT-анализ.....	62
4.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	63
4.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	66
4.6 Инициация проекта.....	67
4.7 Планирование управления научно-исследовательского проекта.....	69
4.8 Бюджет научного исследования.....	72
4.9 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	76
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	79
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	80
5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ВЧФ-плазматроне и ПЭВМ.....	82
5.2.1 Организационные мероприятия.....	82
5.2.2 Технические мероприятия.....	82
5.2.3 Условия безопасности работы.....	85
5.3 Электробезопасность.....	88
5.4 Пожарная и взрывная безопасность.....	92
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	106

Введение

Существование и развитие современной цивилизации очень сильно зависит от энергетики, которая развивается быстрыми шагами и должна отвечать требованиям надежности и безопасности. На смену истощающемуся углеводородному топливу приходят различные стабильные источники энергии.

На место углеводородам приходят возобновляемые источники энергии: гидроэнергетика, энергия ветра, биомасса, солнечная энергия, тепловая энергия, энергия приливов, ядерная энергия.

Подорвали доверие к ядерной энергетике чернобыльская и фукусимская катастрофа, поэтому предъявляемые требования к ядерной безопасности выросли.

В настоящее время главная проблема атомной энергетики является обеспечение безопасного технологического процесса. В связи с этим большое количество исследований и разработок ведутся в сфере ядерных реакторов и тепловыделяющих сборок нового типа. На помощь в решении данной проблемы приходит дисперсионное ядерное топливо с инертной матрицей. Тепловыделяющие элементы, созданные на основе дисперсионного топлива с инертной матрицей, способны обеспечивать высокий нейтронный поток, улучшить радиационные свойства топлива при длительной эксплуатации в активной зоне реактора, а также увеличить процент выгорания делящегося материала. Топливо на основе дисперсионного ядерного топлива обычно используется в исследовательских реакторах и ядерных установках кораблей. Они также доказали свою эффективность в высокотемпературных реакторах с газовым охлаждением (HTGR).

Дисперсионные топливные стержни обеспечивают высокую степень сохранения и локализации продуктов деления внутри самих элементов, особенно актинидов. Высокая теплопроводность твэлов на основе

дисперсионного топлива позволяет им работать при более высоких тепловых нагрузках.

Применение дисперсионного ядерного топлива в ядерных энергетических установках на атомных подводных лодках позволяет соблюсти особо важные требования, таких как повышенная надежность и безопасность.

При разработке высокотемпературных газовых реакторов в качестве ядерного топлива с самого начала использовалось дисперсионное топливо с использованием керамического делящегося материала и графитовой матрицы. Преимуществом дисперсионных твэлов является широкий диапазон технических возможностей, что дает возможность производить твэлы всевозможных видов: ленты, пластины, цилиндрические и крестообразные стержни, кольца и шары.

Из-за того, что в конце XX века Советский Союз и Соединенные Штаты договорились приостановить производство и использование в энергетическом секторе избыточного оружейного плутония, появился еще одна причина в использовании дисперсионного ядерного топлива.

Разработка IMF показала, что тугоплавкие соединения тория также могут использоваться в качестве матричных материалов. Использование ThC_2 в качестве топлива для высокотемпературных газовых реакторов оказалось очень успешным. Хорошие результаты были получены при использовании $(\text{Th,Pu})\text{O}_2$ и $(\text{Th,U})\text{O}_2$ в легководных реакторах (LWR).

Таким образом, с использованием соединений тория в топливе IMF возникает возможность включить в топливный цикл торий, что в свою очередь позволит снизить количество высокоактивных радиоактивных отходов, подлежащих захоронению. Это связано с тем, что использование тория снижает количество трансурановых изотопов (Pu, Am, Np, Cm) в отработанном ядерном топливе на 2-м порядке по сравнению с ОЯТ уранового цикла.

Несмотря на многочисленные публикации о дисперсном ядерном топливе, мало сведений о технологии его получения и свойствах дисперсных твэлов. Особенно недостаточно сведений о разработке ядерного топлива с инертной матрицей, предназначенного для «сжигания» оружейного и энергетического плутония.

Основной частью тепловыделяющего элемента (твэла) является ядерное топливо, которое может быть гомогенным в виде соединений делящегося изотопа или гетерогенным, в котором частицы вещества делящегося изотопа равномерно распределены в матрице из неделящегося материала.

Характерной особенностью дисперсионного ядерного топлива является его повышенная радиационная стойкость при длительной эксплуатации в реакторе. В связи с этим дисперсионное топливо нашло широкое применение в исследовательских и материаловедческих реакторах, а также в ядерных установках специального назначения, для которых характерны повышенные плотности делений, мощности энерговыделения и температуры.

В последнее время возник еще один стимул для разработки и применения топлива дисперсионного типа. Это связано с необходимостью снижения накопленных запасов оружейного и энергетического плутония. Для этого разрабатывается IMF-топливо (Inert Matrix Fuel), являющееся дисперсионной композицией, в которой плутоний равномерно распределен в безурановой матрице. IMF-топливо позволяет основательно снизить запасы плутония, значительно увеличить выгорание делящегося изотопа. Использование этого вида топлива обеспечивает прямое захоронение отработанного ядерного топлива.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Высокотемпературное дисперсионное ядерное топливо

Практически все ядерные реакторы, эксплуатируемые в научно-исследовательских целях, работают с использованием дисперсионного ядерного топлива на основе алюминиевой матрицы. Соединения урана являются делящейся составляющей такого типа топлива, это позволяет получить высокие значения нейтронных потоков, а также плотности энергии. ТВЭЛы данного типа ядерных реакторов чаще всего имеют алюминиевое покрытие, поэтому теплоноситель не должен перегреваться выше значения 100 °С.

Кроме металлического урана, делящимся составляющим в дисперсионном топливе может выступать также оксид урана (IV), а матричным материалом – бериллиевая окись или оксид тория (IV). Также имеются сведения, что в американском реакторе PRTR эксплуатировалась композиция из оксида плутония (IV) (делящаяся составляющая) и оксида урана (IV) (матричный материал).

В середине XX века начинается интенсивное строительство АЭС с энергетическими ядерными реакторами. В таких реакторах дисперсионное топливо состояло в подавляющем большинстве из оксида урана (IV), гомогенно размещенного в металлической матрице из нержавеющей стали. Теплоноситель в таких ядерных реакторах мог нагреваться практически до 300 °С [1].

В то время проводимые исследования эксплуатируемого уранового дисперсионного топлива со стальным материалом матрицы были катализатором в дальнейшем изучении различных других материалов матрицы, которые способны выдерживать высокие температуры. К таким материалам можно непосредственно отнести W, Mo, Ta, Nb и C в аллотропной модификации графита. Немногим позже начались изучения

матричных материалов на основе оксидов (керамика) бериллия, циркония, алюминия, кремния, урана и тория [2].

Помимо оксидных материалов, в качестве делящегося компонента были изучены карбид и дикарбид урана, а также нитрид урана [2].

С наступлением космической эры началось создание ядерных энергетических установок, работающих на топливе из диоксида, карбида и нитрида урана, а в качестве матричного материала выступали тугоплавкие металлы. Топливная композиция из диоксида урана и молибдена эксплуатировалась в первом в мире реакторе-преобразователе «Топаз». Высокотемпературные реакторы, использующиеся на транспортных установках эксплуатировали топливо с матричным материалом из Мо или W. Энергетические установки «Фобос» комплектовались твэлами с дисперсионным ядерным топливом, способным выдерживать температуры выше 2000 °С (высокотемпературное дисперсионное ядерное топливо) [3].

1.2 Топливо для энергетических реакторов дисперсионного вида

Сегодня, когда большинство атомных станций работает на легководных ядерных реакторах, особое внимание приковано к разработке топливных композиций именно для такого типа реакторов. Большинство разработок так или иначе подразумевает внедрение дисперсионного ядерного топлива. Часть разработок подразумевают внедрение плотное топливо, если рассматривать его с точки зрения урана. В качестве компонентов предлагаются силицида урана, а также сплавы урана с молибденом и ниобием-цирконием. Данные соединения исследовались для эксплуатации на атомных субмаринах и атомных ледоколах [3].

Следует отметить, что такие важные параметры, как концентрация урана (9–13 г/см³), температурная нагрузка на топливо (<550 °С), а также величина выгорания (100 МВт·сут/кг U) являются более предпочтительными в сравнении с классическим керамическим урановым топливом. Топливные

элементы на основе дисперсионных композиций продемонстрировали хорошую работоспособность в зависимости от различных нагрузок. В связи с эти упомянутое выше значительно улучшит рентабельность и сделает себестоимость электрической энергии значительно ниже.

1.3 Типы композиций дисперсионного ядерного топлива

Основной задачей при получении топлива с инертной матрицей стоит изучение композиций с различными структурами, такие как гомогенные и гетерогенные, т.к. каждая из них обладает рядом положительных и отрицательных моментов [4].

Матрица, в которой делящиеся частицы вещества равномерно расположены в структуре матрицы IMF, называется гомогенной (рис. 1).

Из-за малых размеров частиц делящегося материала осколки деления в большей мере покидают делящийся материал и повреждают материал матрицы (рис. 2).

Так как частицы делящегося материала в этой системе имеют мелкодисперсную структуру, осколки деления этого материала повреждают материал матрицы, вследствие большого количества осколков, покидающих делящийся материал.

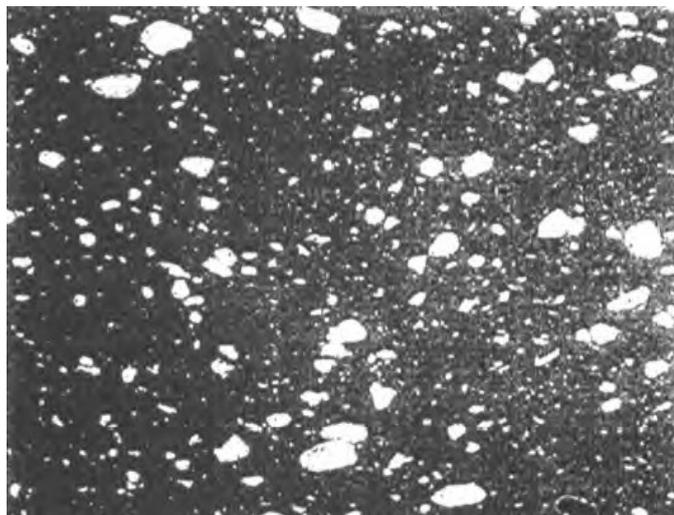


Рисунок 1 – Микроструктура композиции $UO_2-MgAl_2O_4$



Рисунок 2 – Влияние размера частиц топливного материала на количество осколков деления, покидающих частицу

Также к гомогенным материалам относят оксиды, карбиды нитриды и металлы, такие как $(Th, Pu)O_2$, $(Th, Pu)C$ и т.д [4].

Топливо IMF с гетерогенной структурой включает в себя топливный материал в виде сфер с малым диаметром, которые находятся в инертной матрице материала (рис. 3).

Несмотря на то, что повреждение инертной матрицы продуктами деления в гетерогенной структуре IMF меньше, чем в гомогенной структуре, в ней трудно равномерно распределить делящийся материал из-за сегрегации при изготовлении. Кроме того, при спекании из-за различия в усадках микросфер и материалах матрицы зачастую наблюдается выпучивание микросфер на поверхность спеченного изделия до 60 мкм.

Даже при том, что продукты деления повреждают неактивную матрицу в гетерогенной структуре IMF меньше, чем в гомогенной структуре, равномерное диспергирование материала деления затруднено из-за сегрегации во время производства. Также во время спекания из-за разницы в усадке микросфер и материала матрицы на поверхности спеченного продукта часто наблюдается вздутие микросфер размером до 60 мкм [5].

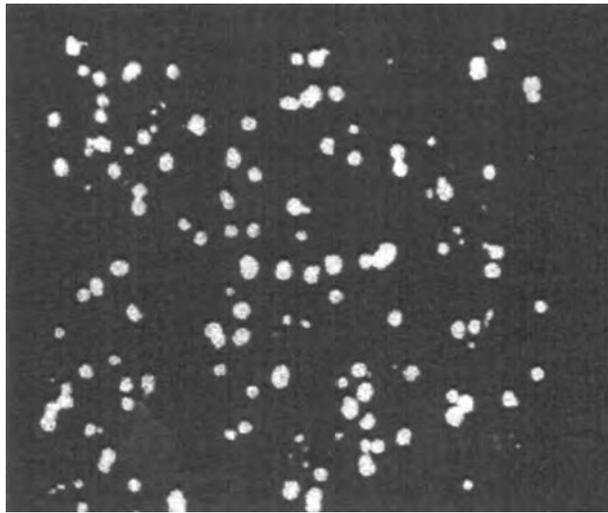


Рисунок 3 – Микроструктура топлива из композиции $MgAl_2O_4-UO_2$

Неравномерно распределенное по структуре топливо IMF имеет тенденцию быть многофазным. Для смешанных фаз этим топливом является керамика, встроенная в другую керамику или керамика, встроенная в металл. Однако неоднородные виды топлива менее подвержены радиационному повреждению при воздействии продуктов деления, а также альфа- и бета-лучей.

Поэтому ядерное топливо в виде дисперсных композиций является важнейшим топливом для исследовательских реакторов и морских атомных электростанций. Этот вид топлива может использоваться в космических реакторах и атомных электростанциях. Использование топлива в виде IMF на основе неактивной матрицы может быть успешно использовано для увеличения выгорания и «сжигания» плутония.

1.4 Матричные материалы дисперсионного топлива IMF

Систематические исследования ядерного топлива с инертной матрицей (IMF) были начаты в 90-е годы прошлого века. В этих исследованиях активное участие принял институт Paul Scherrer (Швейцария, г. Виллиген).

Огромный опыт, накопленный при разработке и эксплуатации дисперсионного ядерного топлива в исследовательских реакторах, корабельных ЯЭУ, реакторах HTGR и энергетических реакторах, а также сведения, полученные при разработке топлива IMF позволили сформулировать требования к топливу IMF, и в частности требования к материалу инертной матрицы [6].

Первое и основное требование к материалу матрицы – незначительное поглощение нейтронов. Также материал матрицы должен удовлетворять следующим требованиям:

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

Кроме того, материал матрицы должен сохранять свои свойства в условиях длительного захоронения при открытом топливном цикле и хорошо растворяться в азотной кислоте при замкнутом топливном цикле.

Выполненные в 90-х годах XX столетия исследования позволили предложить для проработки инертные матрицы из оксидных материалов, в меньшей степени из карбидов, нитридов и металлов, в отдельных случаях – из диоксида тория [6].

Топливо IMF должно быть подходящим для использования в легководных реакторах (LWR).

1.5 Матричные материалы на основе соединений тория

В 40–50 гг. XX столетия ученые исследовали возможности использования тория в ядерной энергетике. В нашей стране впервые в мире освоение ториевого топливного цикла в промышленном масштабе было осуществлено в реакторе ОК-180. В США изучение применимости тория в виде топливной композиции $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$ проводилось в реакторах АЭС Indian Point (1962 – 1974).

Уже к концу 60-х годов прошлого столетия проведенные исследования показали перспективность использования тория в ядерных реакторах [7].

Однако из-за того что техническая целесообразность и экономическая рентабельность использования тория в производстве энергии не были доказаны, работы по ториевому циклу были прекращены.

В 90-х годах интерес к торию возник вновь в связи со специфической возможностью применения тория для «сжигания» избыточного оружейного плутония [8]. По данным работ, при использовании ториевого цикла запасы накопленного плутония могут быть быстро снижены.

Исследования возможности сжигания плутония в ториевом цикле проводились в России, США, Канаде, Германии, Японии и в ряде других стран.

1.6 Двоокись тория и топливо на основе двоокиси тория

В системе Th–O, кроме ThO_2 , какие-либо другие окисные фазы в твердом состоянии не найдены. Однако при диссоциации ThO_2 образуется моноокись ThO в виде паров [9], которая при охлаждении, по-видимому, диспропорционирует на ThO и металлический торий. На рисунке 4 приведена фазовая диаграмма Th–O [10]. Эвтектика между торием и ThO_2 соответствует составу с отношением $\text{O/Th} = 0,016 \pm 0,005$. При температуре монотектики составу жидкости соответствуют $\text{O/Th}=0,40$ и $1,5 \pm 0,2$ [10].

Предельный состав твердых растворов ThO_{2-x} (солидус) при эвтектической температуре определяется отношением $\text{O}/\text{Th} = 1,985 \pm 0,01$, при монотектике – $1,87 \pm 0,04$ и в точке плавления – $1,997 + 0,01$.

При высоких температурах в вакууме ThO_2 может частично терять кислород, при этом цвет ее из белого становится коричнево-серым и затем черным. Соответственно изменяются и некоторые другие ее свойства, например электропроводность. При повышении температуры область нестехиометрической окиси тория ThO_{2-x} расширяется вплоть до 2740 К [11].

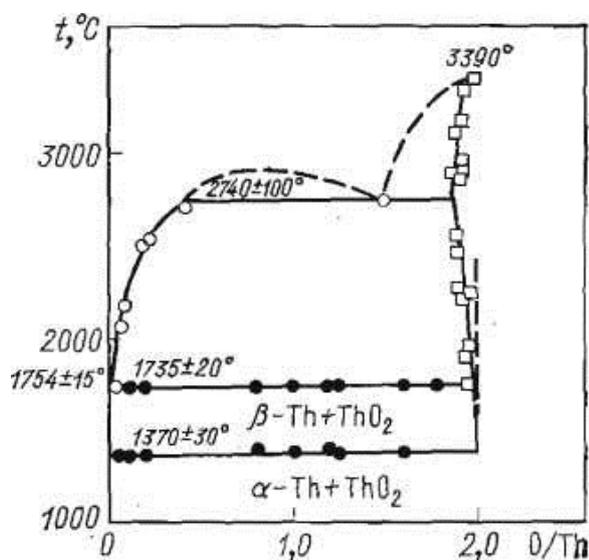


Рисунок 4 – Фазовая диаграмма Th–O

ThO_2 имеет одну кубическую кристаллическую структуру типа, флюорита CaF_2 с пространственной группой O_h^5 . В элементарной ячейке 4 молекулы [12]. Химическая связь в ThO_2 типично ионная. Период кристаллической решетки ThO_2 равен 5,5974 Å при 26 °C и 5,6448 Å при 942 °C. Прецизионные измерения показали, что период решетки ThO_2 может изменяться в зависимости от степени кристалличности препарата. Для ThO_2 высокой чистоты, спеченной в азоте при 1700 °C в течение 72 ч, получены значения a_0 равные 5,5958 и 5,5957 Å (препарат имел размер кристаллов от 20 до 200 мкм). Межатомное расстояние Th–O равно 2,424 Å, расстояние между ионами тория 3,958 Å и между ионами кислорода 2,799 Å.

Теоретическая плотность ThO_2 , рассчитанная из данных периода решетки, составляет $10,13 \text{ г/см}^3$, по другим данным – $9,99 \text{ г/см}^3$ и $10,01 \text{ г/см}^3$. Объем элементарной ячейки стехиометрической ThO_2 $175,3 \text{ \AA}^3$. Для нестехиометрической ThO_{2-x} период решетки и соответственно объем элементарной ячейки уменьшаются. Так, для окисла состава $\text{ThO}_{1,997}$ период решетки при комнатной температуре составляет $5,588 \text{ \AA}$. При добавлении $0,5\% \text{ CaO}$, растворяющейся в двуокиси тория, теоретическая расчетная плотность материала понижается с $10,0$ до $9,82 \text{ г/см}^3$ [13].

Период кристаллической решетки ThO_2 при растворении в ней UO_2 уменьшается.

1.7 Получение двуокиси тория

Исходными материалами для приготовления хорошо спекающейся ThO_2 обычно служат соли тория: нитрат $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 - 4\text{H}_2\text{O}$, оксалат $\text{Th}(\text{C}_2\text{O}_4)_2 - 6\text{H}_2\text{O}$, сульфат или оксикарбонат, подвергаемые термическому разложению, или гидроокись, которую получают осаждением аммиаком из водных растворов.

На дисперсность и другие свойства порошков ThO_2 большое влияние оказывают условия синтеза исходного соединения и температура его прокаливания [14]. Так, при получении ThO_2 из гидроокиси удельная поверхность порошка ThO_2 возростала от $3-6$ до $35 \text{ м}^2/\text{г}$ при повышении концентрации раствора нитрата от $0,001$ до $0,1$ моль/л и снова падала при дальнейшем росте концентрации. Кроме того, дисперсность порошка ThO_2 находится в прямой зависимости от степени отмывки гидроокиси от иона NO_3^- . Максимальная удельная поверхность достигается, когда отмывка ведется до pH немного выше 7. При прокаливании гидроокиси в вакууме удельная поверхность порошка на $5-10 \text{ м}^2/\text{г}$ выше, чем при прокаливании на воздухе или в парах воды (время прокаливания 4 ч). При увеличении времени прокаливания от 4 до 12 ч удельная поверхность постепенно уменьшается.

Размер зерен ThO₂, полученной из гидроокиси при оптимальных условиях растёт от 60 А при 400 °С до 200 А при 700 °С [15]. При осаждении гидроокиси тория аммиаком предложено пропускать в раствор газообразную СО₂ или добавлять к раствору карбонат аммония для лучшего отделения осадка от маточного раствора. Для получения хорошо фильтрующихся осадков гидроокиси тория в процессе непрерывного производства ThO₂ проводят осаждение аммиаком при 82–93 °С, поддерживая рН = (5,0–6,5) (при 25 °С). Стекловидную гелеобразную ThO₂ получают пептизацией с небольшим количеством азотной кислоты, нагреванием до 40–80 °С и последующей сушкой. При хранении свежевыпавшей гидроокиси тория ее частицы укрупняются, отделяя воду и становятся кристаллическими. Происходит частичная дегидратация по схеме $2\text{Th}(\text{OH})_4 - \text{Th}_2\text{O}_2(\text{OH})_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ [16].

При получении ThO₂ пиролизом нитрата тория наилучшие результаты были получены денитрацией в водяном паре при температурах 185–475 °С [17]. Получающийся при этом продукт легко превращается в коллоидный раствор ThO₂.

Влияние температуры прокаливания исходного соединения на дисперсность порошка ThO₂ показано в табл. 1. Наилучшие результаты по спеканию были получены при использовании окси- карбонатного порошка (95–98% теоретической плотности при температуре спекания 1500 °С в течение 24 ч) [18]. Для других порошков спекание ухудшалось в направлении хлорид–оксалат–нитрат.

Таблица 1 – Зависимость удельной поверхности и среднего размера кристаллов ThO₂ от температуры прокаливания

Исходное соединение	Размер кристаллов D, (Å) и удельная поверхность S (м ³ /г)	Температура прокаливания, °С				
		400	600	800	1000	1200
Оксикарбонат ThO(CO ₃)	D	60	90	220	400	2500
	S	128	79,4	25,6	7,0	1,0

Хлорид $\text{ThCl}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	D	50	110	280	600	740
	S	32,6	53,5	15,8	9,4	7,3
Нитрат $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	D	70	150	460	1900	2260
	S	54,8	24,8	1,1	0,1	0,1
Оксалат $\text{Th}(\text{C}_2\text{O}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	D	65	120	380	1500	3000
	S	38,6	27,8	3,6	1,9	1,2

Влияние температуры прокаливания исходного соединения на дисперсность порошка ThO_2 показано в табл. 1. Наилучшие результаты по спеканию были получены при использовании окси- карбонатного порошка (95–98% теоретической плотности при температуре спекания 1500 °С в течение 24 ч). Для других порошков спекание ухудшалось в направлении хлорид–оксалат–нитрат.

ThO_2 высокой плотности (97%) можно получить из порошка, приготовленного разложением оксалата. Использованная для этой цели двуокись имела насыпной вес 1,7–1,9 г/см³ и удельную поверхность 10–13 м²/г. Достоинством этого способа является высокая чистота исходного материала и спеченных изделий (99,9%). Дисперсность и спекаемость оксалатной ThO_2 сильно зависят от условий осаждения оксалата. Так, при добавлении твердой щавелевой кислоты к раствору нитрата тория полученная после прокаливания окись имеет удельную поверхность 2–6 м²/г, а при добавлении раствора нитрата в раствор щавелевой кислоты 10–13 м²/г. Отмечалось влияние температуры осаждения оксалата на размер частиц и удельную поверхность порошка ThO_2 . Удельная поверхность при этом изменялась в зависимости от температуры прокаливания от 37–48 м²/г при 500 °С до 4–9 м²/г при 900 °С. Наблюдалась обратная линейная зависимость между удельной поверхностью порошка и средним размером кристаллов двуокиси тория, рассчитанным по уширению линий на рентгенограммах. Время прокаливания порошка и температура (К) прокаливания связаны с размером кристаллов следующим эмпирическим соотношением:

$$D = t^{0,14} \exp(10,3515 - 5482/T)$$

Оксалатное соосаждение используется также для получения смешанных окислов $\text{ThO}_2 - \text{UO}_2$. Пиролиз смешанных оксалатов в восстановительной атмосфере дает непосредственно твердые растворы $\text{ThO}_2 - \text{UO}_2$ при температуре прокаливания выше $700\text{ }^\circ\text{C}$ [19].

1.8 Получение изделия из двуокиси тория

В твэлах ThO_2 (обычно в виде смеси с небольшим количеством UO_2) применяют в виде таблеток, стержней, пластин и других форм, а также микросфер, покрытых плотными оболочками из других материалов (Al_2O_3 , пироуглерода, SiC , молибдена).

В чистой ThO_2 область гомогенности очень узка. Поэтому в отличие от UO_2 , спекание которой осуществляется главным образом за счет высокой подвижности кислорода в анионной подрешетке и широкой области гомогенности фазы UO_{2+x} , основным направлением для получения плотных изделий из ThO_2 является использование порошков, обладающих высокой концентрацией неравновесных дефектов в кристаллической решетке и имеющих высокую удельную поверхность. Спекание ThO_2 может быть улучшено добавками окислов, дающих твердые растворы с ThO_2 с образованием анионных вакансий – CaO , Y_2O_3 или окислов редкоземельных элементов в количестве от 0,5 до 5% [20].

Заготовки для изделий из ThO_2 могут быть получены несколькими методами.

Прессование. Подготовка порошков перед прессованием, введение связки и грануляция ThO_2 аналогичны операциям, разработанным для изготовления твэлов из UO_2 . При производстве керамического топлива для реактора BORAX-IV использовалась следующая технологическая схема: прокаливание ThO_2 ($1000\text{ }^\circ\text{C}$), смешивание ThO_2 , U_3O_8 (6,35%) и поливинилового спирта (2,5%) в шаровой мельнице (3 ч), грануляция с добавлением воды, сушка ($80\text{ }^\circ\text{C}$, 4 ч), прессование таблеток на

автоматическом прессе (диаметр 6,7 мм, усилие прессования 900–1100 кгс/см², 80 шт./мин), контроль, загрузка в тигли из Al₂O₃, удаление связки (260 °С), спекание в газовой печи (на воздухе, подъем температуры до 1700–1750 °С, в течение 16 ч, выдержка 2 ч), контроль (плотность 97% теоретической). В качестве связующих веществ при прессовании применяют поливиниловый спирт, этиленгликоль, парафин, водорастворимую метилцеллюлозу. Используемое при полусухом прессовании ThO₂ оборудование и пресс-инструмент аналогичны таковым при производстве изделий из UO₂ [21].

Для получения сердечников из оксалатного порошка (Th,U)O₂ изучены два процесса: прессование и холодное мундштучное выдавливание, – оба метода дали хорошие результаты. Метод получения таблеток состоял из предварительного уплотнения, прессования при давлении 4000 кгс/см² (использовалось связующее) гранулированного порошка и спекания в среде водорода при 1750 °С. Так было приготовлено 200 кг таблеток для реактора «Холден» (США). Метод выдавливания в 4–5 раз более трудоемок по сравнению с прессованием.

Большой опыт по производству таблеток из (U,Th)O₂ был накоплен в 1963 г. при изготовлении первой зоны реактора «Индиан Пойнт» (США). Было переработано 20 т продукта, из которого изготовлено 3 млн. таблеток диаметром 6,4 мм, высотой 19,5 мм. При этом была использована следующая технологическая схема: перемешивание ThO₂ и UO₂, размол смеси с бракованными таблетками в шаровой мельнице, отделение от шаров, добавка связующего карбовакса, агломерация, грануляция, сушка, прессование таблеток, спекание (1200 °С), бесцентровое шлифование, контроль.

ThO₂ высокой чистоты из оксалатного порошка спекается до плотности 97% теоретической после изостатического прессования при 1500 кгс/см² и обжига при 1700 °С в течение 12 ч. Изостатическим прессованием окиси тория с добавкой 0,5 мас.% СаО при удельном давлении 7000 кгс/см² и с применением 5% связующего получали стержни диаметром

2,5 см. Их сначала обжигали на воздухе при 1400 °С, шлифовали и окончательно спекали при 1800 °С в течение 2 ч [22]. После окончательного спекания плотность стержней составила 99,5% теоретической.

Шликерное литье. Изделия из ThO₂ могут быть изготовлены по обычной керамической технологии: размол прокаленного порошка в стальных шаровых мельницах до размера частиц менее 10 мкм, отмывка пульпы от железа соляной кислотой и литье шликера в гипсовые формы. Плотность изделий после спекания при 1800 °С достигает 96%. Для устранения операции отмывки от железа помол ThO₂ проводят в полиэтиленовых контейнерах шарами из ThO₂. Далее полученную пульпу обезвоживают фильтрованием до 95% твердой фазы, добавляют к ней дефлокулянт (раствор алгината аммония) до нейтральной или щелочной реакции среды и производят шликерное литье, сушку и спекание изделий. Недостатком этого метода формования является невысокая стойкость шликеров и их расслаивание из-за высокой плотности ThO₂. Метод шликерного литья применяют главным образом при производстве тиглей и труб из чистой ThO₂ и аналогичных полых изделий [23].

Выдавливание. Дисперсные порошки ThO₂ могут быть легко превращены в пластичные массы и отформованы мундштучным выдавливанием. Для этого порошок ThO₂ смешивают со слабой HNO₃ для образования коллоидной суспензии, которую затем концентрируют для получения золя, имеющего пластичные свойства. Золь выдавливают через мундштук, сушат и спекают при 1150 °С до плотности 99% теоретической. Для уменьшения усадки изделий к коллоидному золю добавляют полностью высушенный порошок ThO₂. При этом не требуется никаких органических пластификаторов [24].

При переработке порошков ThO₂, полученных из различных соединений (гидроокиси, пероксида и оксалата), в массу для мундштучного выдавливания, содержащую 4% UO₂, было установлено, что наилучшую плотность обеспечивает оксалатная ThO₂ – 97,6% при 1700 °С (для

гидроокиси и пероксида соответственно 73,9 и 76,2%). Обжиг соосажденных оксалатов тория и урана (в четырехвалентной форме) проводили при 900 °С. Исходный порошок имел удельную поверхность 10 м²/г. Экструзию производили на пластификаторе, состоявшем из 1%-го раствора поливинилового спирта в воде или 1%-ной стеариновой кислоты в эфире, однако более воспроизводимые результаты дало выдавливание пасты, приготовленной на связующем из 0,5% метилцеллюлозы и 0,5% полиакриламида, растворенных в воде. Давление выдавливания изменялось от 2000 до 6000 кгс/см²; сушка экструдированных изделий проводилась при 55 °С в течение 15 ч; спекание при 1700–1800 °С в течение 3 ч давало плотность стержней 95–97% теоретической.

Спекание. Спекание изделий из ThO₂ осуществляют в вакууме, в нейтральных, восстановительных средах и на воздухе. В последнем случае малые добавки урана в виде U₃O₈ или твердого раствора окислов не препятствуют получению компактного топлива.

Начальная стадия спекания ThO₂ осуществляется в зависимости от дисперсности частиц в широких температурных пределах – от 600 до 1300 °С. Наиболее активное спекание отмечено у гелей ThO₂, полученных, например, денитрацией раствора азотнокислого тория перегретым паром. При исследовании изотермического спекания геля было показано, что при 1000 °С усадка его прекращается через 200 мин и достигает 14% (плотность 98,2%), из которых 10% приходится на собственно спекание и 4% – на удаление влаги. Плотность, близкая к теоретической, при этой температуре достигается за 17 ч. Энергия активации спекания геля ThO₂ на воздухе составляет 163,0 кДж/моль [25].

Оксалатная ThO₂, спрессованная под давлением 60 кгс/мм², начинает спекаться при температуре выше 750 °С. Энергия активации спекания составляет 92 кДж/моль. Механизмом спекания ThO₂ при температурах ниже 1000 °С, очевидно, является поверхностная диффузия.

Таблетки смешанного топлива из ThO_2 и UO_2 целесообразно спекать в атмосфере H_2 или смесей H_2+N_2 и H_2+Ar . Сердечники для реактора «Сирена» (Италия), изготовленные из оксалатного соосажденного порошка, содержащего 2,4% UO_2 , получали спеканием в водороде при 1750 °С, причем средняя плотность образцов составила 9,57 г/см³.

Значительное влияние на спекание ThO_2 оказывает предварительное уплотнение порошка путем обработки в шаровой мельнице. При такой обработке разрушаются рыхлые кристаллические сростки, препятствующие спеканию, и значительно возрастает насыпной вес порошка. Так, если исходная оксалатная ThO_2 , спрессованная под давлением 28 кгс/мм², спекается при 1540 °С за 3 ч до плотности 88% теоретической, то после обработки в шаровой мельнице в течение 15 ч при тех же условиях спекания ее плотность возрастает до 96% [26].

Рост зерен в процессе изотермического спекания изделий из ThO_2 в интервале 1300–1600 °С был изучен в одной из работ. Параллельно исследовалось влияние на спекание ThO_2 добавок CaO в количестве 2,3–8,8 мол.%. Установлено, что на стадии ликвидации открытой пористости добавки CaO замедляют рост зерен ThO_2 , но способствуют уплотнению брикетов, причем это влияние тем сильнее, чем выше содержание CaO .

Коэффициент диффузии иона Th^{4+} в ThO_2 , рассчитанный с использованием модели объемного спекания, можно выразить уравнением

$$D = 1,3 \cdot 10^{-1} \exp(-389/RT).$$

Для ThO_2 с добавкой CaO энергия активации диффузии уменьшается; так, для образцов с 2,3% CaO получена зависимость

$$D = 4,02 \cdot 10^{-6} \exp(-234/RT).$$

Добавка окиси кальция к ThO_2 в количестве от 0,5 до 2 мол.%, повышая концентрацию подвижных кислородных вакансий в решетке, способствует миграции пор к границам зерен и повышению плотности. Материал, полученный при спекании в интервале 2000–2300 °С, характеризуется оптической прозрачностью. Добавка Y_2O_3 в количестве 5–

15 мол.% также способствует спеканию двуокиси тория до теоретической плотности (99,9%). Прозрачную керамику, содержащую 5–15% Y_2O_3 , получали спеканием в водороде при 2380 °С в течение 20 ч.

Из других добавок, способствующих спеканию ThO_2 , следует упомянуть CaF_2 некоторые фосфаты, например $AlPO_4$, $CaHPO_4$, $MgNH_4PO_4$, которые позволяют проводить спекание изделий на воздухе в интервале 1400–1500 °С. Значительное активирование спекания происходит также при добавлении к ThO_2 закиси никеля и окиси стронция. Отмечалось слабое влияние на уплотнение ThO_2 добавок Al_2O_3 , BeO , MgO , SiO_2 , PbO , а добавки ZrO_2 , ZnO и Na_2O почти не оказывали влияния.

При спекании смесей ThO_2 и UO_2 уплотнение сопровождается образованием твердого раствора. Показано, что образование твердого раствора в смеси начинается при 1400 °С и заканчивается при 1550 °С. В порошках с несовершенной кристаллической структурой спекание при температурах ниже 1400 °С не обеспечивает достаточно полного взаимодействия UO_2 и ThO_2 . Процесс активации образования твердого раствора UO_2 – ThO_2 в смеси порошков имеет различный характер в разных температурных зонах. При 1200–1300 °С энергия активации взаимной диффузии найдена равной 318 кДж/моль.

Золь-гель-процессы. Общие принципы технологии и аппаратного оформления этих процессов аналогичны описанным для UO_2 . Дисперсность получаемой в этих процессах ThO_2 достигает десятков ангстрем, вследствие чего спекание ее происходит уже при 1000 – 1200 °С [27].

Была описана следующая технологическая схема получения ThO_2 + 3% UO_2 (изотоп ^{233}U) в форме крупки для виброуплотненных твэлов с использованием золь-гель-процесса: денитрация раствора нитрата тория паром (200–475 °С, 6 ч), приготовление гидрозоля с добавкой раствора уранилнитрата (80 °С, 0,5 ч), корректирование pH добавкой NH_4OH (80 °С, 0,5 ч), сушка (до 135 °С, 12–24 ч), прокаливание в аргоне (1150 °С, 4 ч), размол в шаровой мельнице.

По способу гелеобразования процессы можно разбить на четыре типа: процессы с внешней нейтрализацией капле золя (например, за счет диффузии аммиака), процессы с внутренней нейтрализацией (например, за счет разложения при нагреве гексаметилентетрамина, вводимого в золь), экстракционные процессы (например, экстракция воды 2-этилгексанолом), дегидратация капле в вакууме в замороженном состоянии.

Для формирования микросфер разработаны непрерывные процессы, различающиеся по принципу диспергирования золя в гелеобразующей среде (органическая жидкость, нерастворимая в воде): истечение золя из вибрирующего капилляра, свободное истечение капле через перфорированную насадку, истечение в двухструйное сопло [28].

Наиболее однородные по размеру сферы формируются через капилляры, приводимые в колебания электрическим вибратором с частотой 20–200 Гц. Производительность такого способа формирования 0,25 кг сфер в 1 ч на один капилляр. Формование микросфер диаметром менее 400 мкм осуществляют также в обычных эмульгаторах.

В последние годы большое внимание уделялось разработке экстракционных золь – гель-процессов, в частности экстракции аминами, которые используются не только для гелеобразования, но и для удаления кислоты из исходных нитратных растворов, что позволяет сразу получить золь, минуя стадию термического разложения нитрата тория. Экстрагент представляет собой раствор первичного амина с длинной углеродной цепью в углеводороде, например в парафине. Метод экстракции аминами позволяет сделать процесс получения топливных микросфер непрерывным и дистанционно контролируемым.

1.9 Физические свойства двуокиси тория

Термодинамические свойства. Изменение теплоемкости и других термодинамических свойств ThO_2 в зависимости от температуры до 3000 К приведено в табл. 2.

Таблица 2 – Термодинамические данные для двуокиси тория

Температура	$c_p^0, \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$	$H_T^0 - H_{298}^0, \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$	$S_T^0, \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$	$\frac{-(F_T^0 - H_{298}^0)}{T}, \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$
298,15	61,76	0	65,23	65,23
600	72,34	20,635	112,63	78,24
1000	77,74	50,735	150,96	100,21
1400	81,92	82,676	177,78	118,74
1800	85,81	116,231	198,82	134,26
2200	89,66	151,331	216,44	147,65
2600	93,47	187,954	231,71	159,41
3000	97,24	226,087	245,35	170,00

Теплота плавления ThO_2 равна $\Delta H_{\text{пл}} = 61,5 \pm 9,2$ кДж/моль.

Упругость пара. Парциальное давление ThO_2 (г), Th (г) и O (г) над конгруэнтно испаряющейся твердой ThO_2 выражается уравнениями [29]:

$$P(\text{ThO}) = - 36\,860/T + 8,15 \text{ атм (2400 - 2800 К);}$$

$$P(\text{O}) = - 36\,860/T + 7,56 \text{ атм (2400 - 2800 К);}$$

$$P(\text{ThO}_2) = - 35\,070/T + 7,96 \text{ атм (2400 - 2800 К).}$$

Эти зависимости изображены на рис. 5. Измерения выполнены в вакууме эффузионным методом в сочетании с масс-спектроскопическими измерениями. Суммарное эффективное давление продуктов испарения над твердой ThO_2 можно выразить уравнением

$$\lg P_e = -35\,520/T + 8,26.$$

Установлено, что состав конгруэнтно испаряющейся двуокиси тория соответствует формуле $\text{ThO}_{1,994 \pm 0,002}$ при 2810 К. Свободная энергия образования паров ThO_2 (г) и ThO (г) являются линейной функцией температуры.

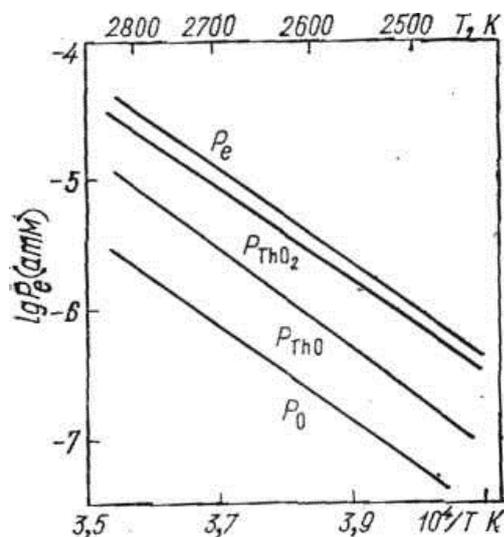


Рисунок 5 – Температурная зависимость парциального давления продуктов испарения и суммарного давления над твердой ThO_2

Теплота сублимации ThO_2 равна $664,0 \pm 10$ кДж/моль для интервала 2000–3000 К.

Если ThO_2 находится в равновесии с металлическим торием, то в составе паров над ней преобладающим компонентом становится моноокись ThO .

Температура плавления. По-видимому, наиболее точно температура плавления чистой ThO_2 с учетом влияния состава определена значением в 3390 °С. В более ранних источниках для температуры плавления ThO_2 даются более низкие значения - чаще всего 3300 ± 100 °С.

Термическое расширение. Данные различных авторов об относительном линейном термическом расширении окиси тория хорошо согласуются между собой. Средние коэффициенты расширения ThO_2 , измеренные с помощью катетометра до 2500 °С. Для ThO_2 высокой чистоты

предложена следующая эмпирическая формула, показывающая изменение в зависимости от температуры среднего коэффициента линейного расширения:

$$a = 8,1950 \cdot 10^{-6} + 1,121 \cdot 10^{-9}t,$$

где t – температура, °С.

При растворении UO_2 в решетке ThO_2 в количестве 30 мол.% ее средний коэффициент расширения в интервале 0–900°С возрастает от $9,0 \cdot 10^{-6}$ до $9,6 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ (измерено в вакууме). Для нестехиометрических растворов состава $(U_{1,02}, Th_{1,00})O_{2,10}$ средний коэффициент расширения в интервале 26–1000°С подчиняется уравнению:

$$a = 8,8553 \cdot 10^{-6} + 1,329 \cdot 10^{-9}t.$$

Истинный коэффициент термического расширения при данной температуре для образцов того же состава следует уравнению [30]:

$$A_t = (4,882 \cdot 10^{-5} + 14,71 \cdot 10^{-9}t)/5,5342$$

где t – температура в интервале 26–1000°С.

Теплопроводность. Теплопроводность ThO_2 , как и прочих окисных керамических материалов, понижается с ростом температуры вплоть до 1400 °С. Абсолютные значения коэффициента теплопроводности ThO_2 при температуре близкой к комнатной в 1,5–2 раза выше, чем у стехиометрической UO_2 , но с повышением температуры разница уменьшается (см. рис. 6).

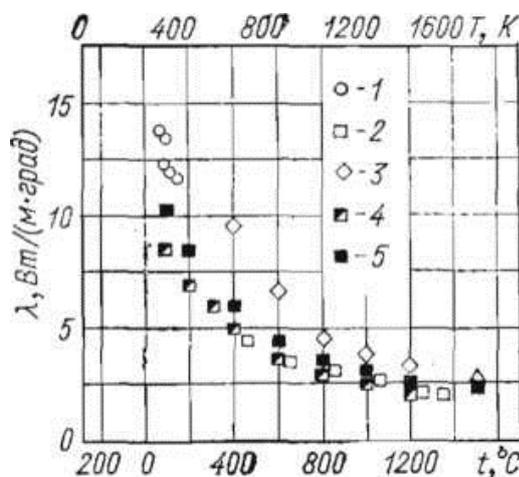


Рисунок 6 – Изменение коэффициента теплопроводности ThO_2 в зависимости от температуры

Теплопроводность ThO_2 сильно зависит от пористости образцов и технологии их получения (рис. 6). Наиболее высокие значения коэффициента теплопроводности были получены для образцов, изготовленных горячим прессованием [31].

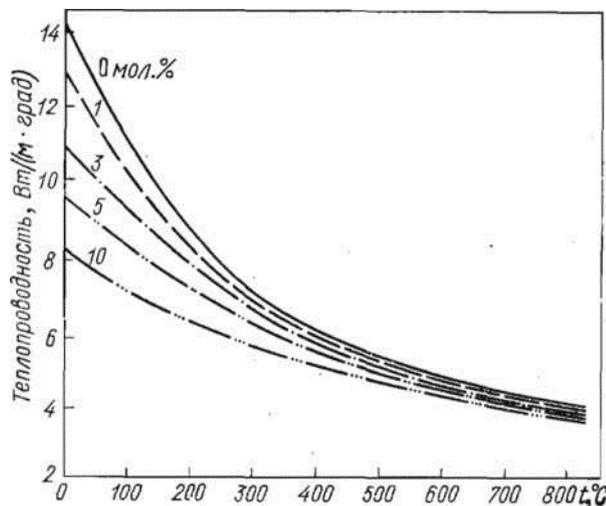


Рисунок 7 – Изменение коэффициента теплопроводности образцов в системе $\text{ThO}_2\text{—UO}_2$ в зависимости от температуры (на кривых указано содержание UO_2 в образцах)

Теплопроводность системы $\text{UO}_2\text{—ThO}_2$ была экспериментально измерена на образцах в виде спеченных таблеток с плотностью $94,0\pm 0,5\%$ теоретической. В диапазоне $25\text{—}800$ °C обнаружено значительное уменьшение теплопроводности с ростом температуры (рис. 7). Зависимость теплопроводности от состава смеси имеет минимум в интервале $0,4\text{—}0,8$ молярных долей UO_2 (рис. 8). Зависимость коэффициента теплопроводности ThO_2 , содержащей 2 и 10% UO_2 , от температуры в интервале $200\text{—}3000$ °C выражается уравнением:

$$K = 38,0/(128+t) + 0,817 \cdot 10^{-12}t^3 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot \text{град}).$$

У окисленных твердых растворов $\text{UO}_{2+x}\text{—ThO}_2$, например полученных спеканием на воздухе, теплопроводность существенно ниже, чем у стехиометрических образцов.

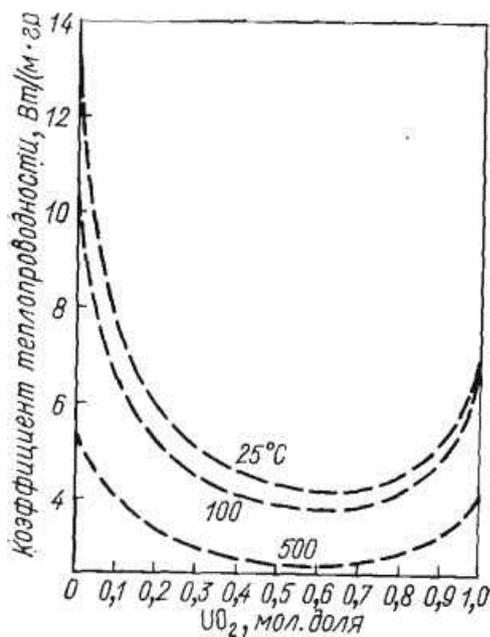


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента теплопроводности от состава твердых растворов $\text{ThO}_2\text{--UO}_2$

Облучение сердечников состава $\text{ThO}_2 - 1,3 \text{ мас. \% UO}_2$ при низкой температуре (менее 156°C) понижает теплопроводность материала вплоть до 50% начальной, причем при выгорании $2 \cdot 10^{16}$ делен./ см^3 достигается насыщением.

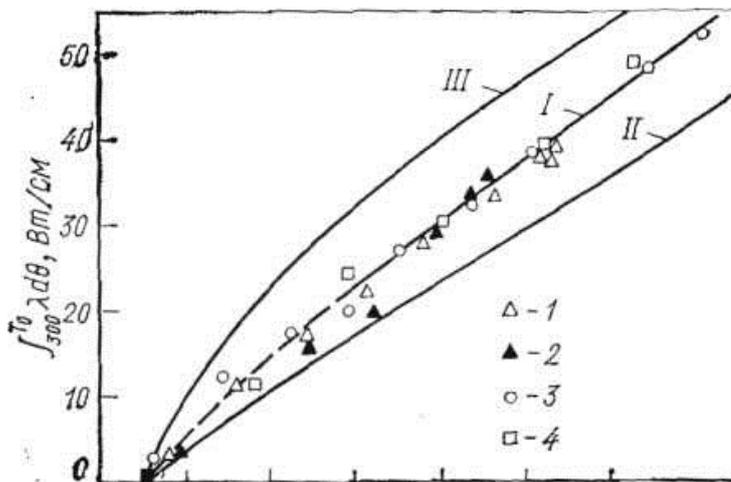


Рисунок 9 – Изменение интегральной теплопроводности $\text{ThO}_2\text{--PuO}_2$ в зависимости от температуры в центре сердечника.

Была измерена интегральная теплопроводность тепловыделяющих сердечников $\text{ThO}_2\text{--PuO}_2$ с плотностью 96,5% теоретической путем измерения

температуры в их центре с помощью вольфрам-рениевой термопары в условиях облучения в реакторе. Содержание PuO_2 в образцах составляло 1,1; 1,75 и 2,72 мас. % (рис. 9).

Микротвердость. Микротвердость ThO_2 , содержащей 0,5% CaO , равна 700 кгс/мм^2 при нагрузке 500 гс (твердость по Кнупу). Максимально полученное значение составляло 800 кгс/мм^2 . По другим данным, микротвердость при комнатной температуре ThO_2 того же состава равняется 640 кгс/мм^2 . При температуре $0,4 T_{пл}$ микротвердость ThO_2 плотностью 96% теоретической составляет 110 кгс/мм^2 , а для образцов с добавкой 6% UO_2 она возрастает до 150 кгс/мм^2 при той же относительной температуре.

Прочность при сжатии. Предел прочности при сжатии образцов из ThO_2 диаметром 10 мм и высотой 20 мм, изготовленных из тонкодисперсного порошка и из плавленной ThO_2 , измельченной до крупности частиц менее 5 мкм, при 20°C составил соответственно 155 и 160 кгс/мм^2 . В первом случае средний размер зерен был 25 мкм, а пористость образцов 6,7%, во втором соответственно 16,4 мкм и 8,6%.

Гидростатически прессованные образцы, спеченные до плотности 99% и содержащие в качестве активатора спекания 0,5% CaO , показали предел прочности при сжатии 156 кгс/мм^2 , тогда как в другом источнике для кубических образцов со стороной 12,7 мм и плотностью 100% с добавкой 0,5% CaO приводится значение 247 кгс/мм^2 . Такие же образцы, но содержащие 1% CaO , показали большую прочность – 280 кгс/мм^2 при 21°C . Размер зерна в образцах, испытанных в работе, равен 60 мкм.

Сообщается, что прочность при сжатии образцов $\text{ThO}_2 + 5\% \text{UO}_2$ плотностью 95% теоретической составляет 52 кгс/мм^2 .

1.10 Химические свойства двуокиси тория

Дисперсная ThO_2 является хорошим адсорбентом и активно поглощает влагу из воздуха. Однако прокаленная при высокой температуре

порошкообразная или плотная ThO_2 является одним из наиболее стойких материалов. Даже обработка серной кислотой при нагревании или сплавление с бисульфатом калия малоэффективны для перевода ThO_2 в раствор. Для растворения порошкообразной ThO_2 ее обычно обрабатывают раствором азотной кислоты, содержащим от 0,01 до 0,05 моль/л HF или фторосиликата натрия [32].

ThO_2 не взаимодействует с карбонатами щелочных металлов при сплавлении, однако растворима в хлоридах щелочных металлов, что может быть использовано в технологии переработки облученного топлива. Высокая скорость растворения ThO_2 наблюдалась в расплаве $\text{KCl} + 40\% \text{MgCl}_2$. При добавлении в расплав циркония наблюдается обменная реакция с образованием слоя пористой ZrO_2 на растворяемой компактной ThO_2 .

Стабильность в газовых средах и теплоносителях. Компактная ThO_2 стабильна на воздухе вплоть до температуры плавления. Флюоритная фаза смешанных окислов, содержащих менее 78 мол. % UO_2 , стабильна на воздухе при температурах выше 1400 °С.

До 600 °С окисление твердого раствора $(\text{U,Th})\text{O}_2$, содержащего менее 20 мол. % ThO_2 , происходит в две стадии, подобно окислению UO_2 . Твердый раствор, содержащий 25 и 30 мол. % ThO_2 , в первой стадии окислялся до состава $\text{Th}_y\text{U}_{1-y}\text{O}_{2,33-2,35}$ и во второй – до $\text{Th}_y\text{U}_{1-y}\text{O}_{2,35-2,37}$ с кубической структурой. Твердые растворы с содержанием более 40 мол. % ThO_2 окисляются в одну стадию [33].

ThO_2 постепенно теряет кислород при нагревании в инертных газовых средах с низким парциальным давлением O_2 при температуре выше 1400 °С. Минимальное отношение O/Th в равновесных условиях, достигаемое в среде гелия при 1900 °С и $P_{\text{O}_2} = 10^{-6}$ атм, равно 1,997. Это значение соответствует O/Th в точке плавления ThO_2 .

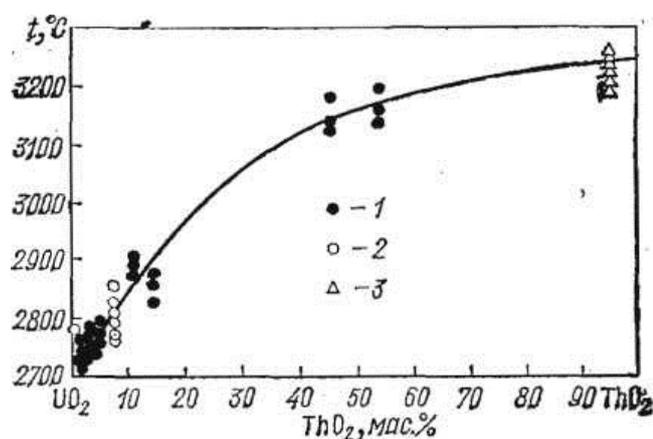


Рисунок 10 – Фазовая диаграмма ThO₂–UO₂. Линия ликвидуса построена для образцов, полученных:

- 1 – электроосаждением из расплавленных солей;
- 2 – гомогенизированным в реакторе;
- 3 – процессом золь–гель

Взаимодействие с элементами. Водород не восстанавливает ThO₂ вплоть до очень высоких температур. При спекании в водороде при 2000 °С ThO₂ сохраняет состав, близкий к стехиометрическому. Углерод взаимодействует с ThO₂ с образованием карбидов. В вакууме реакция начинается при 1900 °С. Теплота реакции, найденная при исследовании восстановления ThO₂ углеродом в равновесных условиях, составляет $H_{278} = 900$ Дж/моль.

В нагретом состоянии ThO₂ реагирует с хлором. Максимум скорости реакции хлорирования в присутствии окиси углерода наблюдается при 450–520 °С. Бериллий реагирует с ThO₂ при плавке в тиглях из нее с образованием ThBe₁₃. Реакция с твердым бериллием начинается при 750 °С.

ThO₂ практически не корродирует в висмуте при 925 °С в течение 168 ч в статических условиях. Выдержка образцов ThO₂ в течение 167 ч при 1000 °С в статических условиях в расплавленном натрии привела к изменению массы на 0,06%. При выдержке образцов ThO₂ в течение 2 ч, в вакууме при 2350 °С в контакте с W, Re и сплавом Mo–40% Re взаимодействие не происходит.

Взаимодействие с окислами. ThO_2-UO_2 . ThO_2 и UO_2 образуют непрерывный ряд твердых растворов. Промежуточные составы, как и исходные компоненты, имеют структуру флюорита. Температура ликвидуса сплавов приведена на рис. 10.

$ThO_2-UO_2-UO_{2,67}$. В квазибинарных разрезах ThO_2-SO_{2+x} при 1100–1500 °С и давлении кислорода 1 атм. установлено наличие однофазной области твердого раствора $(U,Th)O_{2+x}$.

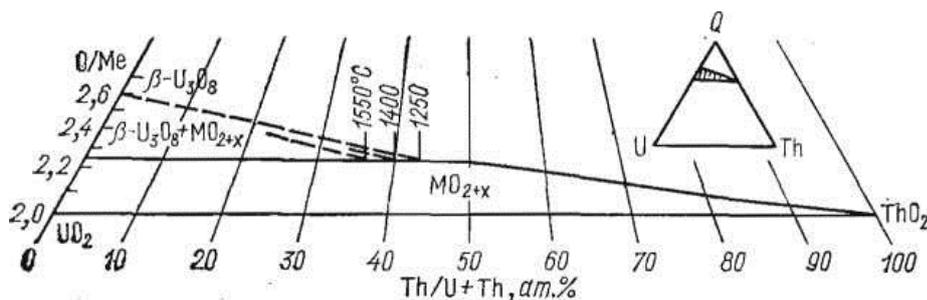


Рисунок 11 – Фазовая диаграмма системы $ThO_2-U_3O_8-UO_2$ при 1250–1550 °С

В тройной системе при 1100 °С и $O/Me > 2,25$ ($Me = Th + U$) при большом содержании урана существует двухфазная область, которая при 1100–1600 °С доходит до 45–48 мол. % ThO_2 . При $O/Me = 2,25$ к указанной области примыкает фаза $(Th_xU_{1-x})_4O_9$, стабильная до 1250 °С. При $O/Me < 2,25$ имеется двухфазная область. Большую часть системы занимает область фазы $(U, Th)O_{2+x}$. При температуре выше 1250 °С фаза Me_4O_9 исчезает, а область MeO_{2+x} расширяется с ростом температуры (рис. 11) [34].

ThO_2-ZrO_2 . Растворимость ZrO_2 в ThO_2 при 1800 °С составляет около 5 мол. %. Двухфазные области твердых растворов на основе ThO_2 и ZrO_2 более обширны, чем в системе UO_2-ZrO_2 , и существуют до 2200–2500 °С. Линия солидуса имеет небольшой минимум при 25 мол. % ZrO_2 и 2500 °С.

ThO_2-BeO . Растворимость компонентов друг в друге отсутствует. По данным полученным дифференциальным термическим анализом, эвтектика в системе существует при 21 ± 1 мол. % ThO_2 , а температура ее плавления составляет 2175 ± 8 °С.

$ThO_2-Y_2O_3$. В системе существует два типа твердых растворов– узкая область кубических твердых растворов на основе Y_2O_3 (С-тип) и флюоритные твердые растворы на основе ThO_2 . Область последних расширяется от 20–25 мол. % $YO_{1,5}$ при 1400 °С до 50–55 мол. % $YO_{1,5}$ при 2200 °С [35].

2 РАСЧЕТЫ И АНАЛИТИКА

2.1 Описание плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона

Экспериментальные исследования режимов совместной работы высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01 (рабочая частота – 13,56 МГц, колебательная мощность до 60 кВт), высокочастотного факельного плазмотрона (ВЧФ-плазмотрона) и плазмохимического реактора проводились на лабораторном плазменном стенде «Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01», схема которого представлена на рисунке 12.

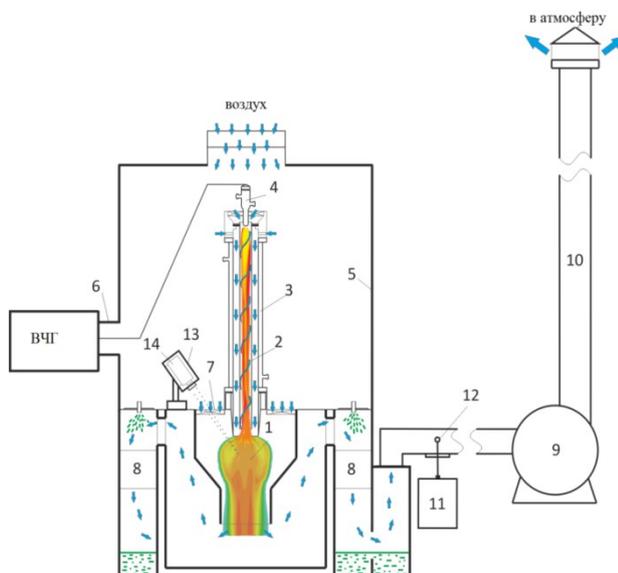


Рисунок 12 – Схема лабораторного плазменного стенда «Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01»: 1 – диспергатор; 2 – ВЧФ-разряд; 3 – ВЧФ-плазмотрон; 4 – медный электрод; 5 – корпус; 6 – коаксиальный вывод; 7 – реактор; 8 – узел «мокрой» очистки отходящих газов; 9 – вытяжной вентилятор; 10 – газоход; 11 – газоанализатор КМ9106 «Quintox»; 12 – пробоотборник; 13 – защитный кожух пирометра; 14 – высокоточный цифровой инфракрасный пирометр IPE 140/45; ВЧГ – высокочастотный генератор.

Измерения расходов воздуха через кварцевую разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона 3 и через газоход 10 проводились с помощью трубки Пито (рис. 13), схема которой представлена на рисунке 13.

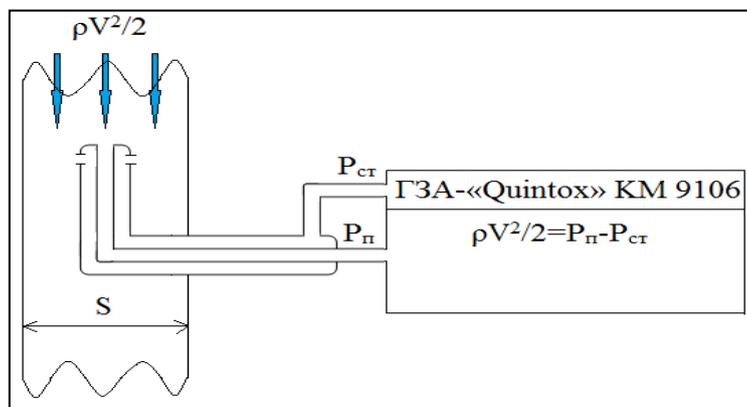


Рисунок 13 – Схема измерения расходов воздуха через кварцевую разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона и газоход с помощью трубки Пито

Измерение трубкой Пито напора, создаваемого набегающим потоком воздуха, определялось по уравнению:

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

где V – скорость набегающего потока воздуха; $P_{\text{п}}$ – полное давление; $P_{\text{ст}}$ – статическое давление; ρ – плотность воздуха при температуре T .

Скорость набегающего потока определялась по уравнению:

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

Объемный расход воздуха через кварцевую разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона и газоход определялся по уравнению:

$$Q = S \cdot V,$$

где S – площадь поперечного сечения кварцевой разрядной камеры ВЧФ-плазмотрона и газохода.

Объемный расход воздуха через реактор определялся по уравнению:

$$Q_{\text{р}} = Q_{\text{гхд}} - Q_{\text{пг}},$$

где $Q_{\text{гхд}}$ – расход воздуха через газоход, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{\text{пг}}$ – расход воздуха в качестве плазмообразующего газа (ПГ) через кварцевую разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона, $\text{м}^3/\text{с}$.

На рисунках 14 и 15 показано влияние входной площади импеллера реактора ($S_{\text{имп}}$) на объёмный расход воздуха через кварцевую разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона (рис. 14) и газоход (рис. 15).

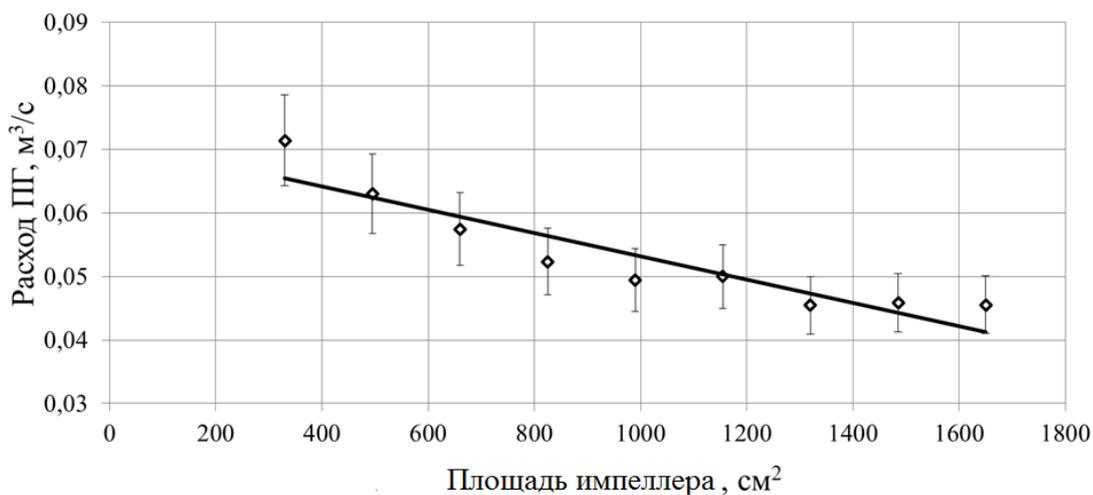


Рисунок 14 – Влияние входной площади импеллера реактора на объёмный расход воздуха через ВЧФ-плазмотрон

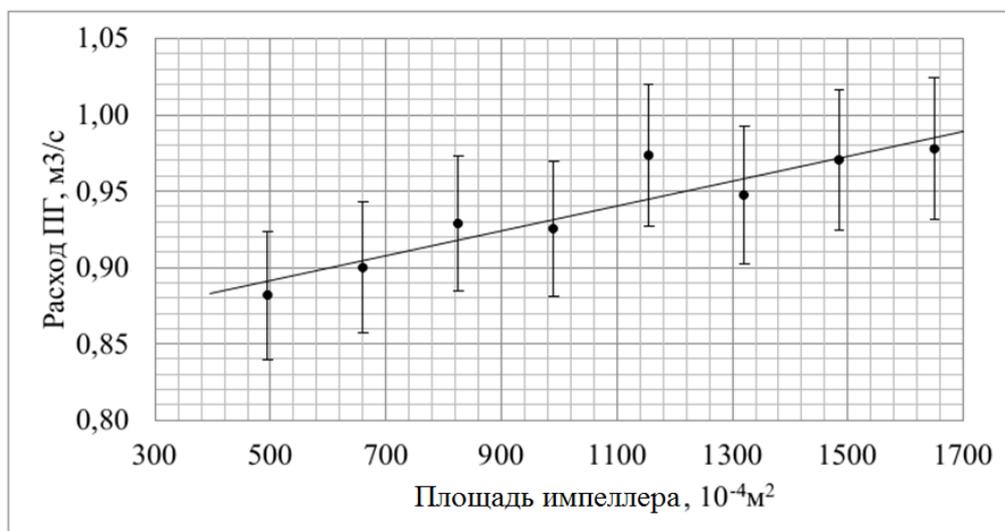


Рисунок 15 – Влияние входной площади импеллера реактора на объёмный расход воздуха через газоход

На рисунке 16 показано влияние входной площади импеллера реактора ($S_{\text{имп}}$) на среднемассовую температуру воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном, при различных режимах работы генератора ВЧГ8-60/13-01 ($I_a = 3,0 \text{ А}; 3,5 \text{ А}; 4,0 \text{ А}$ и $4,5 \text{ А}$).

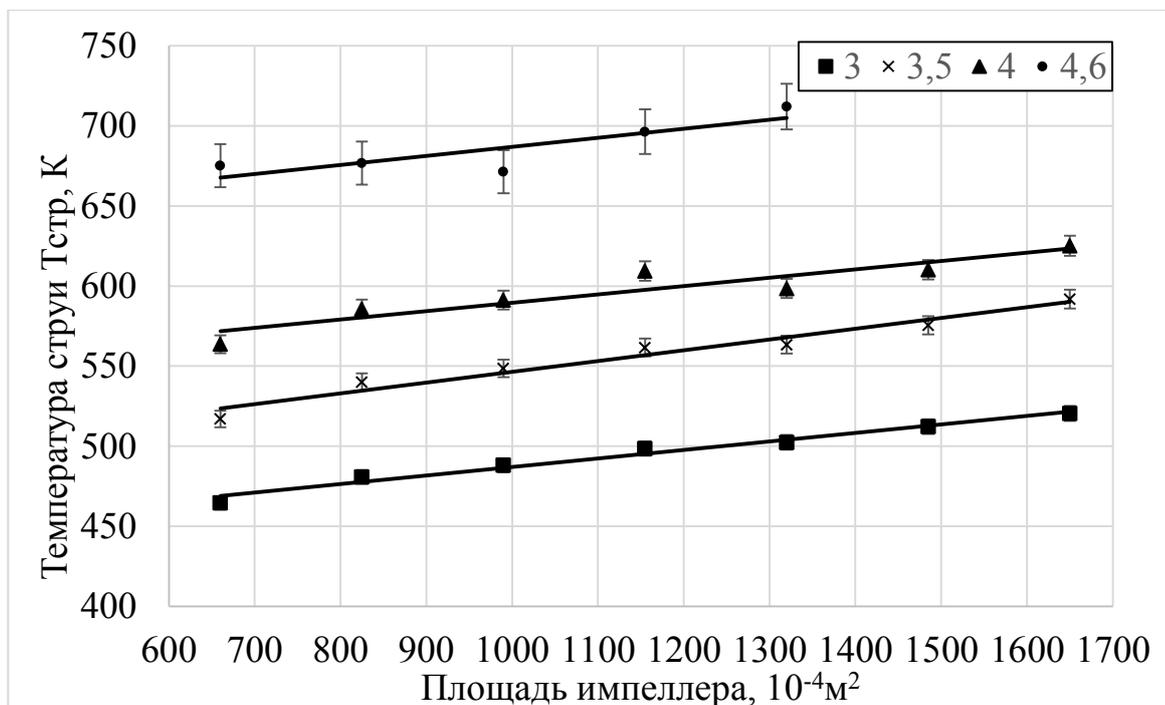


Рисунок 16 – Влияние входной площади импеллера реактора на среднемассовую температуру воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном

Из анализа полученной зависимости следует, что мощность плазменной струи ($P_{\text{стр}}$) и массового расхода плазмообразующего газа (воздуха) оказывают существенное влияние на среднемассовую температуру воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном. С учетом полученных результатов были определены следующие оптимальные режимы работы основных элементов плазменного стенда:

- высокочастотный генератор ВЧГ8-60/13-01 ($U_a=5,6 \text{ кВ}$, $I_a=3,5 \text{ А}$, $I_c=1,2 \text{ А}$);
- ВЧФ-плазмотрон ($P_{\text{стр}}=15,0 \text{ кВт}$);
- реактор ($S_{\text{имп}}=1320 \text{ см}^2$).

Экспериментальные исследования процесса плазмохимического синтеза простых и сложных оксидных композиций (ОК) из диспергированных модельных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент, проводились на

лабораторном плазменном стенде «Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01» (рис. 12).

2.2 Плазмохимическая переработка модельных ВОНР

В таблице 3 представлен состав растворов ВОНР на основе ацетона.

Таблица 3 – Соотношение компонентов перерабатываемой ВСОК

Состав оксидной композиции	Состав раствора ВОНР, % масс.				
	H ₂ O	C ₂ H ₆ O (ацетон)	UO ₂ (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	Th(NO ₃) ₄ ·6H ₂ O	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O
UO ₂ /(ThO ₂ +UO ₂)=0,1	ВОНР-1				
«89,1%ThO ₂ – 9,9%UO ₂ –1%MgO»	28,4	29	3,512	37,866	1,221
	ВОНР-2				
«87,75%ThO ₂ – 9,75%UO ₂ – 2,5%MgO»	28,4	29	3,363	36,267	2,969
	ВОНР-3				
«85,5%ThO ₂ – 9,5%UO ₂ –5%MgO»	28,4	29	3,133	33,788	5,667
	ВОНР-4				
«83,25%ThO ₂ – 9,25%UO ₂ – 7,5%MgO»	28,4	29	2,923	31,517	8,159
	ВОНР-5				
«81%ThO ₂ –9%UO ₂ – 10%MgO»	28,4	29	2,729	29,43	10,44

Для подготовки растворов ВОНР использовались соли нитрата неодима (Nd(NO₃)₃·6H₂O)) вместо нитрата уранила, нитрата церия (Ce(NO₃)₃·6H₂O)) вместо нитрата тория, а также соли нитрата магния (Mg(NO₃)₂·6H₂O)) для образования матрицы в виде оксидов магния в составе ОК.

Вначале готовился с использованием дистиллированной воды (1 л) водный нитратный раствор (ВНР) из нитратных солей металлов и смешивался с органическим компонентом (3 л) с получением раствора ВОНР. Предварительно подготовленные растворы ВОНР подавались с постоянным расходом (300 л/ч) на диспергатор 1 и далее в диспергированном виде поступали в реактор, где в процессе переработки в воздушно-

плазменном потоке осуществлялся плазмохимический синтез простых и сложных ОК при температуре $T_p \geq 1000$ °С. Контроль температуры T_p осуществлялся высокоточным цифровым инфракрасным пирометром 14 (IRE 140/45) по линии поглощения диоксида углерода. После реактора пыле-парогазовая смесь поступала на центробежно-барботажные аппараты узла «мокрой» очистки отходящих газов 8, где происходило ее резкое охлаждение (закалка) обратной технологической водой (ОТВ) с получением водных суспензий из полученных ОК. Очищенные отходящие газы забирались высоконапорным вытяжным вентилятором и выбрасывались в атмосферу. Полученные водные суспензии ОК помещали в емкости из нержавеющей стали, отбирали пробы для определения гранулометрического состава суспензий методом лазерной дифракции (ЛД). Затем водные суспензии ОК отстаивали, полученные осадки отделяли, фильтровали и прокачивали в течение 20 минут при температуре 120–150 °С.

Розжиг плазмохимического реактора осуществлялся воздушной плазменной струей ($T_{стр} \approx 565$ К), на чистом горючем компоненте – ацетоне при анодном токе $I = 3,5$ А и площади реакторного шибера $S_{шиб} = 1320$ см². После того, как в плазмохимическом реакторе устанавливалась температура на уровне 1200 °С, подача ацетона прекращалась и одновременно начиналась подача подготовленной модельной ВСОК.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В таблице 4 приведены состав и режимы переработки растворов ВОНР, физико-химические и технологические свойства полученных простых и сложных ОК, моделирующих в воздушно-плазменном потоке плазмохимический синтез уран-ториевого дисперсионного ядерного топлива.

Из анализа представленных результатов следует, что при расходе ОТВ 2,8 кг/с на закалку ОК и частоте 35 Гц диспергатора увеличение исходной концентрации солей металлов ($\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) с 300 г/л до 1500 г/л в растворах ВОНР-40,41,42 приводит к уменьшению размера образующихся частиц оксида церия с 9,0 мкм до 4,8 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК также снижается с 10,3 м²/г до 4,9 м²/г (БЭТ). Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от нуля до 30 % в составе ОК (при $\alpha = 0,1$), полученных из растворов ВОНР-43,44,45,46,47,48 также приводит к увеличению размера образующихся частиц ОК с 10,7 мкм до 13,9 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК уменьшается с 10,3 м²/г до 4,9 м²/г (БЭТ). Увеличение массовой доли матрицы (MgO) с 10 % до 30 % в составе ОК (при $\alpha=0,5$), полученных из растворов ВОНР-59,60,61, приводит при увеличении частоты 50 Гц диспергатора к снижению размера образующихся частиц ОК с 9,8 до 9,3 мкм (метод ЛД). Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК (при $\alpha=0,6$), полученных из растворов ВОНР-62,63,64, также приводит при частоте 50 Гц диспергатора к снижению размера образующихся частиц ОК с 8,9 мкм до 6,8 мкм (метод ЛД). Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК (при $\alpha=0,7$), полученных из растворов ВОНР-65,66,67, также приводит при частоте 50 Гц диспергатора к снижению размера образующихся частиц ОК с 9,3 мкм до 8,1 мкм (метод ЛД). Это позволяет предположить, что плазменная переработка диспергированных растворов данных ВОНР в воздушно-плазменном потоке также приводит к плазмохимическому синтезу наноразмерных ОК.

Таблица 4 – Состав и режимы переработки растворов ВОНР, физико-химические и технологические свойства полученных простых и сложных оксидных композиций, моделирующих в воздушно-плазменном потоке плазмохимического синтез уран-ториевого дисперсионного ядерного топлива

Состав ОК	Состав ВОНР					Режимы переработки ВОНР		Лазерная дифракция ОК	БЭТ-анализ ОК		Параметры прессования ОК	
	№	Nd(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O, г/л	Ce(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O, г/л	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O, г/л	C ₃ H ₆ O, % масс.	f _Ф , Гц	Q _{отв} , кг/с		D ₅₀ , мкм	S, м ² /г	D _{бет} , нм	ρ _{нас} , г/см ³
ОК-40 (100% Ce ₂ O ₃)	ВОНР-40	-	300,0	-	64,9	35	2,8	9,0	10,3	76	-	-
ОК-41 (100% Ce ₂ O ₃)	ВОНР-41	-	500,0	-	64,5	35	2,8	6,1	5,2	151	-	-
ОК-42 (100% Ce ₂ O ₃)	ВОНР-42	-	1000,0	-	54,6	35	2,8	4,8	4,9	159	-	-
$\alpha = \text{Nd}_2\text{O}_3 / (\text{Nd}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3) = 0,1$												
ОК-43 (90% Ce ₂ O ₃ –10% Nd ₂ O ₃)	ВОНР-43	32,6	297,6	-	64,3	35	2,8	10,7	-	-	-	-
ОК-44 (85,5% Ce ₂ O ₃ –9,5% Nd ₂ O ₃ –5,0% MgO)	ВОНР-44	31,0	282,7	80,1	63,3	35	2,8	10,2	-	-	-	-
ОК-45 (81,0% Ce ₂ O ₃ –9,0% Nd ₂ O ₃ –10,0% MgO)	ВОНР-45	29,3	267,9	160,3	62,2	35	2,8	12,4	-	-	-	-
ОК-46 (76,5% Ce ₂ O ₃ –8,5% Nd ₂ O ₃ –15,0% MgO)	ВОНР-46	27,7	253,0	240,4	61,2	35	2,8	12,5	12,5	78	-	-
ОК-47 (72,0% Ce ₂ O ₃ –8,0% Nd ₂ O ₃ –20,0% MgO)	ВОНР-47	26,1	238,1	320,5	60,6	35	2,8	14,7	12,8	76	0,46	7,5
ОК-48 (63,0% Ce ₂ O ₃ –7,0% Nd ₂ O ₃ –30,0% MgO)	ВОНР-48	22,8	208,3	480,8	58,4	35	2,8	13,9	-	-	-	-
$\alpha = \text{Nd}_2\text{O}_3 / (\text{Nd}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3) = 0,5$												
ОК-59 (45,0% Nd ₂ O ₃ –45,0% Ce ₂ O ₃ –10,0% MgO)	ВОНР-59	146,7	148,8	160,3	62,3	50	2,8	9,8	13,1	68	0,84	12,5
ОК-60 (40,0% Nd ₂ O ₃ –40,0% Ce ₂ O ₃ –20,0% MgO)	ВОНР-60	130,7	132,3	320,5	60,3	50	2,8	9,6	14,5	67	-	-
ОК-61 (35,0% Nd ₂ O ₃ –35,0% Ce ₂ O ₃ –30,0% MgO)	ВОНР-61	114,1	115,8	480,8	59,8	50	2,8	9,3	16,4	65	-	-
$\alpha = \text{Nd}_2\text{O}_3 / (\text{Nd}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3) = 0,6$												
ОК-62 (54,0% Nd ₂ O ₃ –36,0% Ce ₂ O ₃ –10,0% MgO)	ВОНР-62	176,0	119,1	160,3	62,3	50	2,8	8,9	-	-	-	-

OK-63 (48,0% Nd ₂ O ₃ –32,0% Ce ₂ O ₃ –20,0% MgO)	BOHP-63	156,5	105,8	320,5	60,3	50	2,8	7,5	-	-	-	-
OK-64 (42,0% Nd ₂ O ₃ –28,0% Ce ₂ O ₃ –30,0% MgO)	BOHP-64	136,9	92,6	480,8	58,4	50	2,8	6,8	-	-	-	-
$\alpha = \text{Nd}_2\text{O}_3 / (\text{Nd}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3) = 0,7$												
OK-65 (63,0% Nd ₂ O ₃ –27,0% Ce ₂ O ₃ –10,0% MgO)	BOHP-65	205,4	89,3	160,3	62,3	50	2,8	9,3	13,9	64	-	-
OK-66 (56,0% Nd ₂ O ₃ –24,0% Ce ₂ O ₃ –20,0% MgO)	BOHP-66	182,5	79,4	320,5	60,3	50	2,8	8,9	16,8	58	-	-
OK-67 (49,0% Nd ₂ O ₃ –21,0% Ce ₂ O ₃ –30,0% MgO)	BOHP-67	159,7	69,4	480,8	58,4	50	2,8	8,1	15,4	69	-	-

На рис. 17 представлена гистограмма распределения по размерам частиц водной суспензии ОК-47 (метод ЛД).

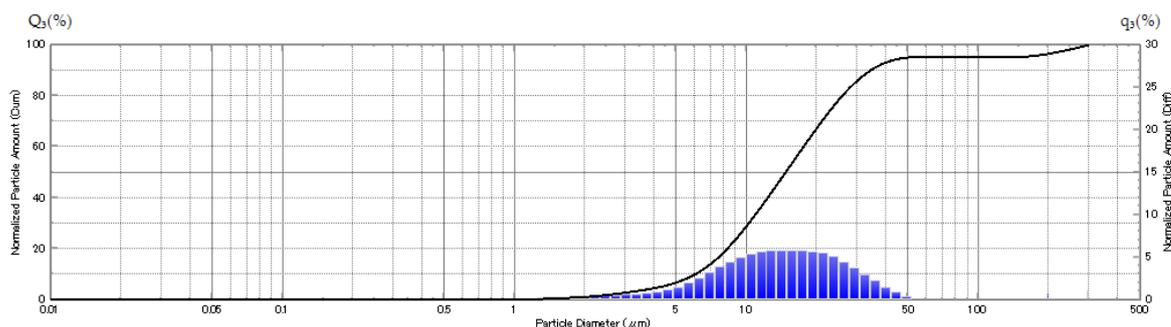


Рисунок 17 – Гистограмма распределения по размерам частиц водной суспензии ОК-47

Частицы водной суспензии ОК-43 характеризуются достаточно широким распределением по размерам, не имеющим явного максимума. Характерные величины медианных значений распределения частиц (агломератов) лежат в диапазоне от 2 до 45 мкм. Среднее значение размера частиц (агломератов) D_{50} составляет 14,7 мкм.

Анализ рентгенограмм образца после порошка ОК-47 после РФА показывает, что основным продуктом пробы порошка являются целевые оксиды церия (Ce_2O_3), неодима (Nd_2O_3) и магния (MgO). Средний размер ОКР для пробы – 89 нм.

СЭМ-изображение синтезированного порошка ОК-47 представлено на рис.18.

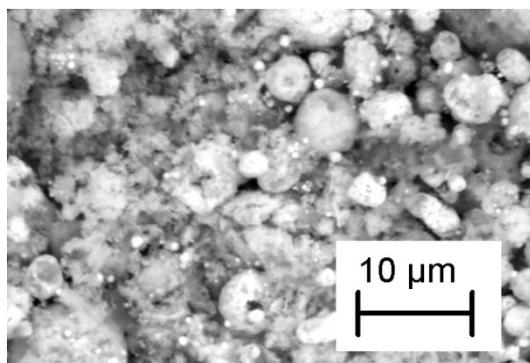


Рисунок 18 – СЭМ-изображение морфологической структуры частиц порошка ОК-47

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

Величина площади удельной поверхности по методу БЭТ составила $12,8 \text{ м}^2/\text{г}$. Полученное значение площади пересчитывалось в размер частиц, исходя из предположения об их сферической геометрии. Таким образом, размер частиц, определенный по БЭТ, составляет 76 нм.

Насыпная плотность исследуемой пробы порошка ОК-47 определялась по ГОСТ 27801-93 и составила $0,0,462 \text{ г}/\text{см}^3$. Свойства прессуемости, найденные по результатам прессования порошка ОК-47, имеют характерные для большинства оксидных материалов значения: порошок принадлежит к 4 группе сложности прессования. Таким образом, производство из этого порошка керамических таблеток возможно при использовании серийно выпускаемого оборудования и пресс-форм из углеродистой инструментальной стали. Прессование порошкового материала проводилось в стальной цилиндрической пресс-форме диаметром 10 мм под давлением 400 МПа с последующим спеканием полученных прессовок при температуре 1300 °С. Микрофотография спеченной керамики приведена на рис. 19.

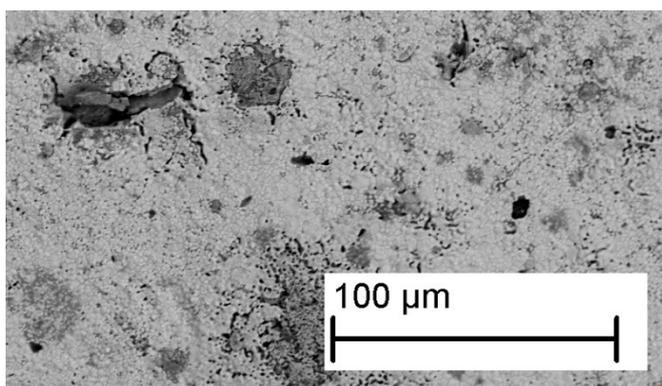


Рисунок 19 – Микрофотография спеченной керамики из порошка ОК-

ВЫВОДЫ

1. Проведен обзор и анализ различных методов получения оксидных композиций для дисперсионного ядерного топлива, на его основе выбран способ плазмохимического синтеза в воздушной плазме.

2. На основе результатов расчёта показателей горючести водно-органических нитратных растворов определены их оптимальные составы, имеющие низшую теплотворную способность $Q_{\text{рн}} \geq 8,4$ МДж/кг и адиабатическую температуру горения $T_{\text{ад}} \approx 1200$ °С.

3. По результатам расчета равновесных составов продуктов плазмохимического синтеза оксидных композиций в воздушной плазме определены для практической реализации режимы, обеспечивающие обработку нитратных растворов в воздушной плазме: $T = 1000\text{--}2000$ К, $P = 0,1$ МПа, содержание воздуха – 69 %.

4. Подготовлен плазменный стенд и проведены экспериментальные исследования на моделях, в результате которых были получены опытные партии оксидных порошков.

5. Проведен ряд анализов порошков: рентгенофлуоресцентный, лазерная дифракция, сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия, БЭТ-анализ. Результаты анализов удовлетворительно согласуются между собой и показывают, что образующиеся порошки можно отнести к классу наноразмерных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза из растворов ВОНР оксидных композиций для уран-ториевого и других видов дисперсионного топлива.

отнести предприятия по фабрикации ядерного топлива, исследовательские и энергетические ядерные реактора эксплуатирующие данный вид ядерного топлива.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования ультракороткоживущих изотопов. Результаты сегментирования представлены в рисунке 20.

		Синтез УКЖИ ^{11}C			
		Исследовательские ядерные реакторы	Промышленные реакторы	Научная отрасль	Металлургия
Потребность	Сильная				
	Слабая				

Рисунок 20 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию дисперсионного ядерного топлива

Из анализа карты можно сделать вывод, что наибольшую потребность в данном виде топлива испытывают отрасли, связанные с ядерными реакторами и наукой. К сожалению, использование дисперсионного уран-ториевого топлива в металлургии не получило должного развития. На данный момент атомная отрасль испытывает проблему с низкой теплопроводностью и радиационной стойкостью топливных элементов, поэтому необходимы исследования, связанные с совершенствованием материалов для фабрикации ядерного топлива. С учетом дальнейшего развития атомной энергетики потребность в модернизации ядерного топлива в ближайшее время будет расти.

4.2 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в разрабатываемый объект. Чтобы выявить ресурсоэффективность разработки и определить направления для ее будущего повышения, необходимо провести анализ конкурентных технических решений с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 5. В таблице представлены следующие показатели конкурентоспособности: плазмохимический синтез оксидных композиций для дисперсионного уран-ториевого топлива (П), золь-гель метод получения оксидной композиции (З), метод химического осаждения (Х). Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – слабая позиция, а 5 – сильная. Веса показателей в сумме должны составлять 1.

Таблица 5 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _п	Б _з	Б _х	К _п	К _з	К _х
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Повышение производительности труда	0,25	5	5	2	0,75	0,75	0,50
2.Удобство в эксплуатации	0,12	5	5	2	0,60	0,60	0,24
3. Энергоэкономичность	0,10	4	4	3	0,40	0,40	0,30
4. Надежность	0,12	3	3	5	0,36	0,36	0,60
5.Простота эксплуатации	0,14	5	5	2	0,70	0,70	0,28
Экономические критерии оценки эффективности							

1. Конкурентоспособность продукта	0,07	5	4	2	0,35	0,28	0,14
2. Уровень проникновения на рынок	0,07	3	2	5	0,21	0,14	0,35
3. Цена	0,08	5	4	3	0,40	0,32	0,24
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	3	3	5	0,15	0,15	0,25
Итого	1	38	35	29	3,92	3,70	2,90

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

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

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Коэффициент конкурентоспособности предприятия:

$$k_K = \frac{K_{\text{П}}}{K_{\text{3Хср}}} = \frac{3,92}{(3,70 + 2,90) / 2} = 1,19.$$

Так как $k_K > 1$, следовательно, предложенный метод получения оксидных композиций для ядерного топлива конкурентоспособен. Золь-гель метод является основным промышленным способом синтеза данных материалов. Результаты данной магистерской работы могут быть использованы для апробации новой технологии синтеза плазмохимическим методом.

4.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ представляет собой сводную таблицу, иллюстрирующую связь между внутренними и внешними факторами компании. Целью данного анализа является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

В таблице 6 приведена матрица SWOT-анализа для синтеза оксидных композиций с помощью плазмохимического метода.

Таблица 6 – Матрица SWOT

	Сильные стороны С1. Предварительное моделирование. С2. Возможность влиять на размеры частиц в реальном времени. С3. Экологичность метода.	Слабые стороны Сл1. Затраты на отработку технологии и ее внедрение. Сл2. Сложность конструкции технологического оборудования.
<p>Возможности</p> <p>В1. Создание рынка по методам получения топливных оксидных композиций.</p> <p>В2. Рост спроса со стороны предприятий топливного дивизиона Росатома.</p>	<p>В1С1 Синтез разнообразных оксидных композиций для ядерной энергетики.</p> <p>В2С3 Высокое качество целевого продукта на выходе.</p> <p>В2С2 Использование практически всего объема исходного раствора.</p>	<p>В1Сл1 Необходимость отработки технологии для получения лицензии на производство ядерных материалов.</p> <p>В2Сл2 Высокая вероятность износа конструктивных элементов при непрерывной работе.</p>
<p>Угрозы</p> <p>У1. Усовершенствования конкурентных технических решений.</p>	<p>У1С1 Возможность оптимизации метода лазерной сублимации для синтеза оксидных композиций.</p>	<p>У1Сл1 Финансирование технологий отработанных на протяжении десятков лет.</p>

У2. Несвоевременное финансовое обеспечение.	У2С2 Привлечение дополнительного финансирования со стороны государства на увеличение мощности технологического оборудования.	У2Сл2 Возможность возникновения простоя производства в случае поломки.
---	--	--

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективными в сложившейся ситуации являются следующие стратегии:

1. Необходимо отрабатывать проектируемую технологию синтеза оксидных композиций для получения лицензии на производство ядерных материалов;
2. Необходимо обеспечить запас комплектующих для своевременной замены при поломке оборудования.

4.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Далее была проведена оценка степени готовности научной разработки к коммерциализации и выяснение уровня собственных знаний для ее проведения. Для этого была заполнена специальная форма, содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенций разработчика научного проекта. Форма представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	3
2.	Определены перспективные направления коммерциализации	3	3

	научно-технического задела		
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	5	5
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	5	5
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	5
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	1	1
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	5
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	5
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	5
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	4
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	4
14.	Имеется команда для	4	5

	коммерциализации научной разработки		
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	2	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	42	57

При проведении анализа по таблице, приведенной выше, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Так, при оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i,$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Так, если значение $B_{\text{сум}}$ получилось от 75 до 60, то такая разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации. Если от 59 до 45 – то перспективность выше среднего. Если от 44 до 30 – то перспективность средняя. Если от 29 до 15 – то перспективность ниже среднего. Если 14 и ниже – то перспективность крайне низкая.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что перспективность коммерциализации данного НТИ находится на среднем уровне. Этот уровень можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта, которая включает в себя анализ рынков сбыта, разработку бизнес-плана и т.д.

4.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации. Выделяют следующие методы коммерциализации научных разработок:

— Торговля патентными лицензиями, т.е. передача третьим лицам права использования объектов интеллектуальной собственности на лицензионной основе.

— Передача ноу-хау, т.е. предоставление владельцем ноу-хау возможности его использовать другим лицом, осуществляемое путем раскрытия ноу-хау.

— Инжиниринг предполагает предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг.

— Франчайзинг, т.е. передача или переуступка разрешения продавать чьи-либо товары или оказывать услуги в некоторых областях.

— Организация собственного предприятия.

— Передача интеллектуальной собственности в уставной капитал предприятия.

— Организация совместного предприятия, т.е. объединение двух и более лиц для организации предприятия.

— Организация совместных предприятий, работающих по схеме «российское производство – зарубежное распространение».

Таким образом, для данного научно-технического исследования наиболее предпочтительным является такой метод коммерциализации как торговля патентными лицензиями. Так как лицензиар не вкладывает собственных средств в производство, следовательно, не несет расходов по сбыту и т.д. Поскольку НТИ проводится по гранту госкорпорации РОСАТОМ, то такая технология синтеза может быть передана третьим лицам (топливные компании Росатома) с последующим правом его использования с учетом интересов лицензиата. Как правило, лицензиатом выступает госкорпорация Росатом, заинтересованная в получении ядерного топлива с высокой теплопроводностью и радиационной стойкостью.

4.6 Инициация проекта

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

1) Цели и результат проекта.

Приведем информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Информация по заинтересованным сторонам проекта представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Частные инвесторы	Увеличение удельной энергоёмкости нового вида топлива
РОСАТОМ	Получение оксидных композиций для производства ядерного топлива

В таблице 9 представлена информация об иерархии целей проекта и критерия достижения целей.

Таблица 9 – Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного уран-ториевого топлива
Ожидаемые результаты проекта:	Получение оксидных композиций для дисперсионного уран-ториевого топлива
Критерии приемки результата проекта:	Получение оксидных композиций с требуемым составом
Требования к результату проекта:	Требование:
	Высокая удельная поверхность
	Высокая радиационная стойкость

2) Организационная структура проекта.

Далее определены участники рабочей группы данного проекта, роль каждого участника в данном проекте, а также функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эта информация представлена в таблице 10.

Таблица 10 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Тихонов А.Е., ТПУ, магистр	Исследование процесса плазмохимическо го синтеза оксидных композиций	Основной разработчик проекта	584
2	Каренгин А.Г., ТПУ, доцент	Консультации по основным вопросам темы	Руководитель проекта	432
ИТОГО:				1016

3) Ограничения и допущения проекта.

Ограничения проекта – все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованы в рамках данного проекта. Данная информация представлена в таблице 11.

Таблица 11 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	312043,9 рублей
3.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ, РОСАТОМ
3.2. Сроки проекта:	3 месяца
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	25.02.2021
3.2.2. Дата завершения проекта	31.05.2021

Таким образом, установлены цели и результаты проекта, рассмотрена организационная структура проекта, определены ограничения и допущения проекта.

4.7 Планирование управления научно-исследовательского проекта

Для выполнения работы формируется рабочая группа, в состав которой входит научный руководитель проекта (НР) и инженер (И). После чего, в рамках проведения научного исследования выполняется ряд основных этапов, представленных в таблице 12.

Таблица 12 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение задания	И, НР
	2	Календарное планирование работ по теме	И, НР

	3	Изучение материалов по теме плазмохимического синтеза	И
Выбор направления исследований	4	Анализ литературных источников по дисперсионному ядерному топливу	И
	5	Выбор методов анализа оксидных композиций	И, НР
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение процесса плазмохимического синтеза с использованием плазмотрона	И, НР
	7	Анализ полученных результатов	И, НР
Обобщение и оценка результатов	8	Составление отчета по работе	И

В рамках планирования научного проекта был построен календарный график проекта. Линейный график представлен в таблице 13.

Таблица 13 – Календарный план проекта

Код работ	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление и утверждение задания магистерской диссертации	1	25.02.2021	26.02.2021	Тихонов А.Е. Каренгин А.Г.
2	Календарное планирование работ по теме	3	1.03.2021	3.03.2021	Тихонов А.Е. Каренгин А.Г.
3	Изучение материалов по теме плазмохимического синтеза	9	4.03.2021	12.03.2021	Тихонов А.Е.
4	Анализ литературных источников по дисперсионному ядерному топливу	10	15.03.2021	24.03.2021	Тихонов А.Е.

5	Выбор методов анализа оксидных композиций	5	25.03.2021	29.03.2021	Тихонов А.Е. Каренгин А.Г.
6	Проведение процесса плазмохимического синтеза с использованием плазмотрона	25	30.03.2021	23.04.2021	Тихонов А.Е. Каренгин А.Г.
7	Анализ полученных результатов	30	26.04.2021	25.05.2021	Тихонов А.Е. Каренгин А.Г.
8	Составление отчета по работе	6	26.05.2021	31.05.2021	Тихонов А.Е.
ИТОГО:		89			

Диаграмма Гантта – тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде таблицы 14 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 14 – Календарный план-график проведения работ

Код работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki}	Продолжительность выполнения работ													
				февраль			март			апрель			май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление и утверждение задания магистерской диссертации	Научный руководитель, инженер	1			■											
2	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель, инженер	3			■	■										

Отразим стоимости всех материалов, используемых при разработке проекта, включая расходы на их приобретение и, при необходимости, на доставку. Эти данные представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Бумага, формат А4	Пачка	1	295	295
Картридж для принтера	Шт	1	2650	2650
Программное обеспечение Windows	Шт	1	13000	13000
Программное обеспечение Terra	Шт	1	15000	15000
Итого:				30945

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

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: 10,4;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

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

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

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (г. Томск).

Таблица 16 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	118	118
– праздничные дни		
Потери рабочего времени:		
– отпуск	48	48
– невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	247	247

Приведем расчет заработной платы для научного руководителя:

$$Z_m = 38050 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 64304,5 \text{ руб.}$$

$$Z_{дн} = \frac{56277 \cdot 10,4}{247} = 2707,6 \text{ руб.}$$

$$Z_{осн} = 2331,8 \cdot 54 = 146208,1 \text{ руб.}$$

Приведем расчет заработной платы для инженера:

$$Z_m = 14874,45 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 25137,8 \text{ руб.}$$

$$Z_{дн} = \frac{25137,82 \cdot 10,4}{247} = 1058,4 \text{ руб.}$$

$$Z_{осн} = 1058,43 \cdot 73 = 77265,7 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы приведем в таблице 17.

Таблица 17 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	$k_{пр}$	k_p	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Научный руководитель	38050	0,3	1,3	64304,5	2707,6	54	146208,1
Инженер	14874,45	0,3	1,3	25137,8	1058,43	73	77265,7
Итого:							223473,8

Отразим обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного

социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot Z_{\text{осн}},$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2%.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды приведем в таблице 18.

Таблица 18 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.
Научный руководитель	146208,1
Инженер	77265,7
Коэффициент отчислений	0,302
Итого:	67489,1

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. Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 19.

Таблица 19 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты	30945
Основная заработная плата	223473,8
Отчисления во внебюджетные фонды	67489,1
Бюджет затрат:	321907,9

Таким образом, проведено планирование бюджета научного исследования, рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления). Бюджет затрат составил 321907,9 рублей.

4.9 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

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

Интегральный финансовый показатель разработки:

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

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

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

Интегральный показатель ресурсоэффективности:

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

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

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 20.

Таблица 20 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	4	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	4	2
3. Помехоустойчивость	0,2	3	3
4. Энергосбережение	0,25	5	4
5. Надежность	0,25	4	4
6. Материалоемкость	0,1	5	4
Итого:	1	25	21

$$I_{\text{ТП}} = 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,1 = 4,15$$

$$I_{\text{аналог}} = 4 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,1 = 3,6$$

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

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{p-\text{исп.}i}}{I_{\text{финр.}i}}$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.}1}}{I_{\text{исп.}2}}$$

Таблица 21 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог
	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,15	3,6
	Интегральный показатель эффективности	4,15	3,6
	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,153	

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разрабатываемый способ плазмохимического синтеза оксидных композиций является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом, основываясь на показателях эффективности.

Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1) Потенциальными потребителями результатов исследования являются исследовательские и энергетические ядерные реакторы.

Сегментирование рынка осуществляется по следующему критерию: потребность в результате НИИ.

2) В результате проведения анализа конкурентных технических решений сделан вывод о том, что разрабатываемый метод плазмохимического синтеза оксидных композиций является наиболее предпочтительным, чем золь-гель метод.

3) Определены сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы для реализации проекта. По итогам выполнения SWOT-анализа выбраны наиболее эффективные стратегии.

4) Оценка степени готовности научной разработки к коммерциализации показала средний уровень, который можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта.

5) В процессе планирования научно-исследовательского проекта построен план управления научным проектом, определены виды работ, установлены даты начала и окончания работ и состав участников.

6) При планировании бюджета рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды. Бюджет затрат составил 321907,9 рублей.

Оценка эффективности исследования показала, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом.

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Одно из основных направлений профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда. Таким образом осуществляться планомерное повышение качества и эффективности средств защиты от вредных и опасных производственных факторов.

Законодательство Российской Федерации об охране труда основывается на Конституции Российской Федерации и Трудовом кодексе Российской Федерации.

Работодатель берет на себя обязанности по обеспечению безопасных условий и охраны труда в организации. Согласно Федеральному закону от 17 июля 1999 г. №181-ФЗ "Об основах охраны труда в Российской Федерации" (с изменениями от 20 мая 2002 г., 10 января 2003 г., 9 мая, 26 декабря 2005 г.) остановимся на некоторых понятиях.

Охрана труда – система сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая в себя правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия [37].

Условия труда – совокупность факторов производственной среды и трудового процесса, оказывающих влияние на работоспособность и здоровье работника [37].

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его заболеванию.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его травме и смерти.

Безопасные условия труда – такие условия труда, при которых воздействие вредных или опасных производственных факторов на работников исключено или уровни их воздействия не превышают

установленные нормы [37].

Рабочее место – место, в которое необходимо прибыть работнику для выполнения его работы.

Поставленные задачи требуют использования достижений многих научных дисциплин, прямо или косвенно связанных с задачами создания безопасных условий труда. При разработке требований производственной санитарии используются результаты исследований ряда медицинских и биологических дисциплин [38].

Огромнейшее влияние на решение проблем охраны труда оказывает качество подготовки специалистов в этой области, их умение принимать верные решения в сложных и динамичных условиях современного производства [38].

Рабочие, служащие, инженерно-технические работники и руководящий состав обязан следовать правилам по охране труда и техники безопасности.

5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Научно-исследовательская работа проводилась на кафедре технической физики. Исследования велись на ПЭВМ, а так же использовался ВЧФ-плазменный стенд с использованием высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13.

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

В таблице 22 представлены основные виды работ, которые могут привести к воздействию опасных и вредных факторов.

Таблица 22 – 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	
Расчёт данных на ПЭВМ. Работа на плазменной установке.	–	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.)	Пожарная опасность	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы» СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» ГОСТ 12.1.004-91 Пожарная безопасность
Работа с химическими реактивами	Химические вредные вещества	–	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества

На работника лаборатории, проводящего экспериментальные исследования, могут воздействовать следующие факторы:

– Физические:

- температура и влажность воздуха;
- шум;

- статическое электричество;
- электромагнитное поле низкой частоты;
- освещённость;
- наличие 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 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ВЧФ-плазмотроне и ПЭВМ

5.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение.

5.2.2 Технические мероприятия

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, как показано на рис. 21.

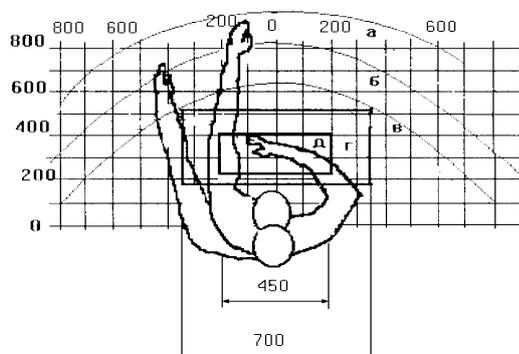


Рисунок 21 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

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.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования. Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не

менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглаблённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 градусов. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают

активность человека.

5.2.3 Условия безопасности работы

Основные параметры, характеризующие условия труда – это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [39] и приведены в таблице 23.

Таблица 23 – 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.

При эксплуатации ВЧФ плазмотрона в окружающую среду выбрасываются вредные газообразные вещества, такие как оксиды азота и углерода, с концентрацией, не превышающей нормы предельно допустимых

концентраций (таб. 24).

В таблице 24 приведены предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ и их класс опасности.

Классы опасности:

- 1 – вещества чрезвычайной опасности;
- 2 – вещества высоко опасные;
- 3 – вещества умеренно опасные;
- 4 – вещества мало опасные.

Таблица 24 – 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
6	Ацетон	200	3

Вентиляция — процесс удаления отработанного воздуха из помещения и замена его наружным. Система вентиляции обеспечивает отток и приток воздуха в помещении. Вентиляция обеспечивает санитарно-гигиенические условия (температуру, относительную влажность, скорость движения воздуха и чистоту воздуха) воздушной среды в помещении, благоприятные для здоровья и самочувствия человека, отвечающие требованиям санитарных норм, технологических процессов, строительных конструкций зданий, технологий хранения и т. д. Система вентиляции на плазматроне осуществляется с помощью специальных движимых лопастей. Скорость потока воздуха через газоход (вентиляцию) равна 18,76 м/с.

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. В нашем случае источником шума является откачивающий компрессор. Согласно [40] уровень шума компрессора не превышает 65 дБ, что соответствует санитарным нормам [41]. Шум на рабочем месте может быть вызван работой ПЭВМ. Уровень шума ПЭВМ лежит в пределах 30-40 дБ, что также соответствует [41].

Электро-магнитное излучение - распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля. ВЧФ-плазматрон питается от генератора высокочастотного тока. Генератор полностью экранирован. Согласно [42], предельно допустимая величина электромагнитного воздействия от установки на человека составляет менее 0,2 мкТл. Это значение входит в допустимый порог строгих санитарных норм электромагнитного излучения.

Экран и системные блоки ПЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно [39] 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 мкР/час. По нормам [39] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

5.3 Электробезопасность

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

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ или другими электрическими приборами и установками в

условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта электрических приборов;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании.

Электрический ток, проходя через организм человека может оказывать на него три вида воздействий:

– термическое действие тока:

- появление на теле ожогов разных форм;
- перегревание кровеносных сосудов;
- нарушение функциональности внутренних органов, которые находятся на пути протекания тока.

– электролитическое действие: расщепление крови и иной органической жидкости в тканях организма.

– биологическое действие:

- нарушение нормальной работы мышечной системы;
- возникновение произвольных судорожных сокращений мышц;
- нарушению нормальной работы органов дыхания и сердца, в том числе абсолютное прекращению их функциональности.

Основными факторами поражения, которые возникают в результате действия электрического тока на человека являются:

- электрические травмы – местное повреждение тканей организма в результате действия электрического тока или электрической дуги. К электрическим травмам можно отнести такие повреждения как электрические ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, механические повреждения;
- электрические знаки – проявляются на коже человека, который подвергся действию тока, в виде пятен овальной формы серого или бледно желтого цвета. Как правило, безболезненны, затвердевают подобно мозоли, со временем омертвевший слой кожи сходит самостоятельно;
- металлизация кожи – возникает в результате проникновения в верхний слой кожи мелких частиц металла, который оплавился под действием электрической дуги. Кожа в месте поражения становится болезненной, становится жесткой, принимает темный металлический оттенок;
- электроофтальмия – возникает в результате воспаления наружной оболочки глаз под действием ультрафиолетовых лучей электрической дуги. Для защиты необходимо пользоваться защитными очками и масками с цветными стеклами;
- механические повреждения – проявляются под действием тока, произвольным судорожным сокращением мышц. Это может привести к разрыву кожи, кровеносных сосудов и нервных тканей.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной

изоляция;

- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпус электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей);
- применение средств защиты:

Электрозащитные средства – это переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих с электроустановками, от поражения электрическим током, от воздействия электрической дуги. Эти средства должны обеспечивать высокую степень защиты и удобство при эксплуатации. Их выбирают с учетом требований безопасности для данного вида работ. В первую очередь безопасность обеспечивается применением средств коллективной защиты, а затем, если она не может быть обеспечена, применяют средства индивидуальной защиты.

К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся [43]:

- оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть заблокированы с устройствами, отключающими рабочее напряжение при снятии;
- изолирующие устройства и покрытия;
- устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения;
- устройства дистанционного управления;
- предохранительные устройства и др.

При выполнении данной ВКР применен 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.

При использовании данного оборудования строго выполнялись требования по электробезопасности, все операции выполнялись

руководителем, имеющим допуск до работ с напряжениями свыше 1000 В.

5.4 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [44], 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 лаборатории по степени пожаровзрывоопасности относится к категории Б, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей
- возгорание легковоспламеняющейся жидкости (ацетон).

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);
- 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;
- проведение работ с использованием приточно-вытяжной вентиляцией;
- соблюдение правил герметизации оборудования, задействованного в технологическом процессе.

При возникновении пожара сообщить руководителю, органам противопожарной безопасности предприятия и приступить к тушению пожара огнетушителем. При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. Сообщить руководству (дежурному).
2. Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС по телефону – 112.

3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(Справочное)

Investigation of plasmachemical synthesis of oxide compositions for dispersion of uranium - thorium nuclear fuel

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Тихонов Алексей Евгеньевич		

Руководитель ВКР

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

Консультант-лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Преподаватель ОИЯ ШБИП	Шайкина О.И.	-		

Introduction

The sustainable development of modern civilization largely depends on reliable energy, which is developing at a faster pace than other industries and requires different and stable sources of raw materials instead of a depleting hydrocarbon.

Renewable energy sources are currently an alternative to hydrocarbons: hydropower, wind energy, biomass, thermal energy, tidal energy and nuclear energy, and in the future - thermonuclear.

Chernobyl and Fukushima have severely eroded confidence in nuclear power. However, the International Energy Agency (IEA) annual report in 2011 emphasized that the world cannot do without nuclear power to meet the growing demand for electricity, due to its almost unlimited resources, as well as economic and environmental advantages over traditional sources.

At present, the issue of the safety of nuclear power is especially acute, and new generation nuclear reactors and fuel assemblies (FA) are being actively developed. In this regard, much attention is paid to dispersed nuclear fuel. The creation of fuel elements (fuel elements) based on dispersed nuclear fuel is especially important in connection with the need to ensure a high neutron flux and increased radiation resistance during long-term operation in a reactor.

Fuel elements with dispersed nuclear fuel are widely used in reactor cores for various purposes. They are successfully operated in research and materials science reactors and are used in the development of nuclear power ship installations. They also proved to be effective in high temperature gas cooled reactors (HTGR).

Dispersed fuel rods ensure reliable retention of all fission products and, in particular, actinides. The high thermal conductivity of dispersed fuel elements allows them to be operated at significant thermal loads.

The main part of the fuel element (fuel element) is nuclear fuel, which can be homogeneous in the form of fissile isotope compounds or heterogeneous, in

which particles of the fissile isotope matter are uniformly distributed in a matrix of non-fissile material.

A characteristic feature of dispersed nuclear fuel is its increased radiation resistance during long-term operation in a reactor. In this regard, dispersion fuel has found wide application in research and materials science reactors, as well as in special-purpose nuclear facilities, which are characterized by increased fission densities, power release rates, and temperatures.

Recently, another incentive has arisen for the development and use of dispersion-type fuels. This is due to the need to reduce the accumulated stocks of weapons-grade and energy-grade plutonium. For this, IMF-fuel (Inert Matrix Fuel) is being developed, which is a dispersion composition in which plutonium is evenly distributed in a uranium-free matrix. IMF fuel makes it possible to significantly reduce plutonium stocks and significantly increase the burnup of a fissile isotope. The use of this type of fuel ensures the direct disposal of spent nuclear fuel.

A 1 Literature review

A 1.1 High temperature dispersion nuclear fuel

Most research reactors use nuclear fuel based on a dispersion composition with an aluminum matrix. To ensure the maximum possible neutron flux and high energy density, uranium is released as a fissile component of the dispersive fuel. The fuel rods of research reactors are generally clad with aluminum. For such fuel elements, the coolant temperature is not higher than 100 °C.

In addition, as uranium, the Institute uses uranium dioxide as a component of dispersion fuel, and beryllium oxide (ML-1) and thorium dioxide (ERR) as a matrix. In the PRTR research reactor (USA), a dispersion composition was proposed, in the capacity of which plutonium dioxide was used as a matrix, and uranium dioxide was used as a matrix.

Along with research reactors in the 50-60s, in the 20th century, power reactors and nuclear power plants were built, the dispersion type of nuclear fuel of which contains mainly UO_2 dispersed in a stainless steel matrix. The coolant temperature of power reactors reached 255–295 °C.

The operation of dispersive fuel elements with a fuel core made of a UO_2 - stainless steel composition contributed to the study of other high-temperature matrix materials. Among these materials were both small neutron capture cross sections, such as beryllium and zirconium, and large capture cross sections, but with a high melting point: tungsten, molybdenum, tantalum, niobium, and graphite. At the same time, ceramic matrix materials are also being investigated: BeO , ZrO_2 , Al_2O_3 , SiC , UO_2 , ThO_2 .

Along with uranium dioxide, UC , UC_2 , UN was investigated as a fissile phase of high-temperature dispersive fuel.

Dispersion compositions with fissile material of UO_2 , UC , UN and a matrix of refractory metals have been widely used in the development of reactor facilities for space purposes. Fuel based on UO_2 -Mo was used in the world's first reactor-converter "Topaz", and compositions with a matrix of tungsten or molybdenum

were used for high-temperature transport reactors. Fuel elements with high-temperature dispersion fuel (operating temperature up to 2200 °C) were part of the Phobos-type reactors for a nuclear rocket engine.

A 1.2 Dispersion fuel of power reactors

At present, much attention is paid to the search for promising types of fuel for nuclear power plants with light water reactors. The direction that can be attributed to innovative is associated with the use of dispersion-type fuel. It is planned to use high-density (in terms of uranium content) fuel based on U-Mo, U-Nb-Zr alloys and uranium silicide (U₃Si) with a matrix of zirconium alloys. This type of fuel was once developed for ship transport installations (nuclear submarines, icebreakers).

Compared to standard UO₂ fuel, particulate fuel has a high uranium content (9.5–12.9 g/cm³), low fuel operating temperatures <550 °C, and high maximum burnup (100 MW day/kg U). Dispersion type fuel rods showed high performance under variable loads. All of the above contributes to an increase in economic efficiency and a decrease in electricity costs.

A 1.3 Fuel for "combustion" plutonium

For military purposes, the USSR and the USA produced more than 250 tons of weapons-grade plutonium containing approximately 93% ²³⁹Pu. Some of this plutonium has recently been recognized as excessive: the United States and Russia have agreed to dispose of it. In addition, up to 10 thousand tons of spent nuclear fuel are unloaded from nuclear reactors annually. By 2020, it will accumulate up to 450 thousand tons. Of the most common pressurized water reactor LWR with a capacity of 1 GW el. annually, about 23 tons of actinides are unloaded, and over the lifetime of the reactor (~ 40 years), they accumulate about 900 tons. Spent nuclear fuel contains 97% of heavy metals (U, Pu) that are

recyclable. One ton of irradiated nuclear fuel with an average burnup of 40 GW • day / ton contains about a quarter of the initial amount of ^{235}U , 10 kg of plutonium and 1.5 kg of other transuranic elements, mainly neptunium, americium and curium, and a significant amount of long-lived nuclides.

According to the data, in connection with the termination of military programs and an increase in the production of reprocessing of spent nuclear fuel, stocks of weapons-grade plutonium by the end of the 20th century increased by 200 tons and by 1000 tons of energy plutonium.

In addition, all countries, regardless of their attitude to the use of nuclear energy, are concerned about the fate of irradiated nuclear fuel (SNF). In 2008, the European Commission conducted a poll, which showed that more than 70% of the population of 27 EU countries doubt the possibility of a reliable and safe disposal of spent nuclear fuel anywhere at all. The problem of excess plutonium and accumulation of high-level waste from nuclear reactors is also associated with the potential dangers of nuclear proliferation and environmental safety.

It was assumed that the program for the development of fast reactors would solve the problem of excess plutonium, but this program has not been implemented so far. Many fast neutron reactors have been shut down; only one BN-600 reactor is operating in our country.

Another way to reduce plutonium stocks is to use recovered Pu in LWRs as a mixture of uranium and plutonium oxides (MOX fuel). However, even with a massive switch to such a fuel, the task of reducing plutonium stocks is not solved, since the reprocessing of ^{239}Pu in LWRs, including with partial loading of the reactor core with MOX fuel, is accompanied by the accumulation of plutonium.

In this regard, a number of countries are conducting research on the development of nuclear reactor fuel based on plutonium in the form of a dispersion composition with a uranium-free (inert) matrix (Inert Matrix Fuel - IMF). Significant interest in the development of IMF fuel, along with the reduction of plutonium reserves, is also caused by the possibility of obtaining spent nuclear fuel intended for disposal with a low content of actinides and achieving a deeper

burnup. The huge interest in the study of IMF fuel is indicated by the list of organizations around the world where these studies are carried out or have been carried out:

- Canada - Atomic Energy of Canada Limited;
- France - Commissariat, de J 'Exergue Atomique, Saalay, Cadarache, Grenoble, University of Paris;
- Italy - Politecnico di Milano, ENEA, University of Trento;
- Japan - Japanese Atomic Energy Research Institute, Japan Nuclear Cycle Development Institute, University of Tohoku, University of Kushi;
- Korea - Korean Atomic Energy Research;
- Holland - Nuclear Energy Center of Pete \ n, University of Delft;
- Switzerland - Paul Scherer Institute, Ecole Politechnique Federale, Lausanne;
- USA - University of Ann Arbor, Massachusetts Institute of Technology, Argonne National Laboratory, Ridge National Laboratory, Las Alamos National Laboratory.

Table 1 shows the main directions of research of national programs for the development of fuels based on inert matrices.

Table 1. National IMF Fuel Development Programs

Country	Materials - candidates for inert matrices
Canada	ZrSiO ₄ , MgAl ₂ O ₄ , CeO ₂ , CePO ₄ , ZrO ₂ , SiC
France	Mo, W, Zr, MgAl ₂ O ₄ , Al ₂ O ₃ , (Zr, Y Pu)O ₂ , (Ce Pu)O ₂
Japan	Mineral-like structures of Y ₂ O ₃ , spinel, corundum
Switzerland	Zr N, Zr, (Y, Zr)O ₂ , (Er, Y, Zr, Pu)O ₂
USA	MgO, ZrO ₂ , SiC, BeO

As can be seen from the data presented (Table 1), the main interest in the development of IMF fuel relates to ceramic-metal dispersion compositions (cer-met), ceramic solid solutions (Me, Pu) O₂, ceramic-ceramic compositions (cer-cer) and compositions metal-to-metal (met-met).

Back in the early 50s and 60s, studies were carried out on the possibility of using IMF nuclear fuel. In 1962, Westinghouse Electric (USA) irradiated fuel elements with fuel in the form of ZrO_2-UO_2 solid solutions in research reactors. The ZrO_2-UO_2-CaO composition was investigated in 1966 in a PBF pulsed reactor heated to 2420 K. According to data, in 1969–1974. PWR irradiated fuel elements with dispersion fuel (wt%): 38 UO_2 -57 ZrO_2 -5 CaO. The Paul Scherer Institute (PSI), Switzerland, took an active part in the development of IMF fuel. PSI was the initiator in 1995-1998. four IMF Fuel Development Meetings.

The study of the thorium fuel cycle has shown that thorium can be successfully used as an inert matrix material for burning plutonium. In addition, it should be borne in mind that the use of the thorium fuel cycle will lead to a significant reduction in the rate of plutonium accumulation. For example, in an LWR reactor when a ThO_2 matrix is irradiated for 1 MW • day, six times less ^{239}Pu is formed than during irradiation of conventional fuel. The study of the ThO_2-PuO_2 fuel composition in the USA under the NERI project showed that in one core it is possible to "burn" most of the plutonium and minor actinides (Am, Np, Cm), 75% in the fuel with one plutonium and 50% in the fuel with all actinides.

The use of thorium compounds (ThO_2) as an inert matrix for "burning" plutonium also has the advantage that in this case the amount of thorium in the core is not limited by the Doppler coefficient. The study of the possibility of "burning" plutonium in the CANDU reactor using ThO_2 showed that up to 94% of Pu was burned out during burnup up to 30 MW • day/kg of heavy metals. Thorium-based IMF fuel can reduce the amount of plutonium by about 90%. The resulting spent nuclear fuel (SNF) can be further directed to disposal.

A 1.4 Types of nuclear fuel composition

In the development of inert matrix fuels (IMF), compositions with a homogeneous and heterogeneous structure are investigated. Each of these structures has advantages and disadvantages.

In the homogeneous structure of IMF, fine particles of fissile matter are evenly distributed in the matrix material (Fig. 1).

Due to the small size of the fissile material particles, fission fragments to a greater extent leave the fissile material and damage the matrix material.

Materials with a homogeneous structure include solid solutions of oxides, carbides, nitrides or metals, for example (Th, Pu)O₂, (Th, Pu)C, etc.

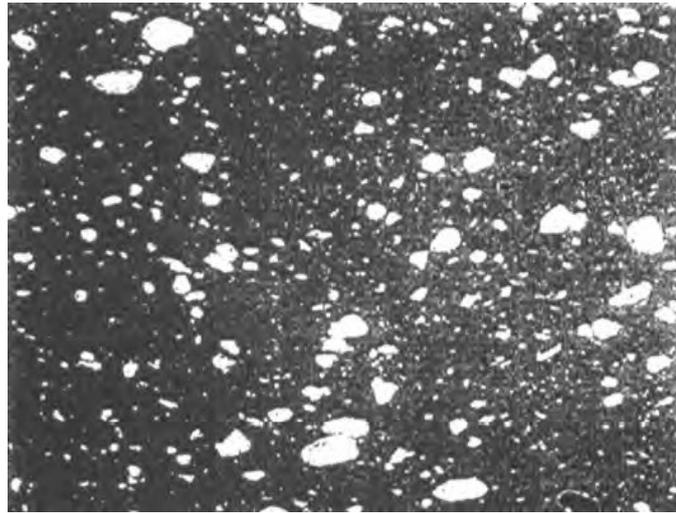


Figure 1 – Microstructure of UO₂-MgAl₂O₄ composition

Nuclear fuel with an inert matrix with a heterogeneous structure contains fissile material in the form of microspheres (most often 100-200 μm in diameter) or rounded shapes located in a matrix of inert material (Fig. 2).

Despite the fact that the damage to the inert matrix by fission products in the heterogeneous structure of the IMF is less than in the homogeneous structure, it is difficult to evenly distribute the fissile material in it due to segregation during manufacture. In addition, during sintering, due to the difference in shrinkage of microspheres and matrix materials, bulging of microspheres on the surface of the sintered product up to 60 μm is often observed.

Heterogeneous IMF fuels are typically multiphase. In the case of mixed phases, this fuel can be either cer-cer (ceramics embedded in other ceramics) or cer-met (ceramics embedded in metal). However, fuels with a heterogeneous structure are subject to less radiation damage when exposed to fission products and α- and β-radiation.

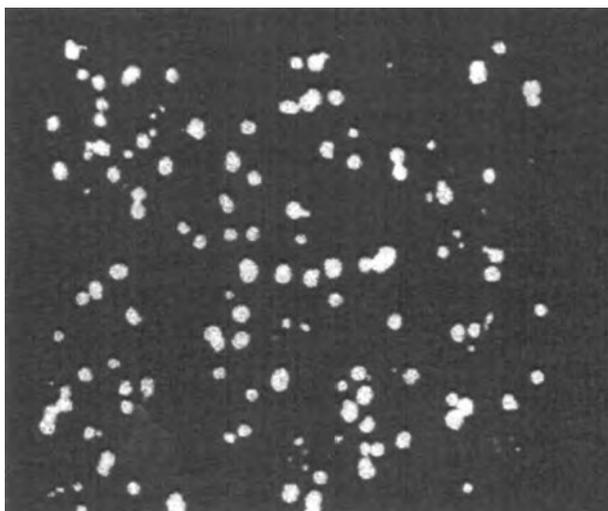


Figure 2 – The microstructure of the fuel from $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-UO}_2$ composition

Thus, nuclear fuel in the form of dispersion compositions is the main type of fuel for research reactors and ship nuclear power plants. This type of fuel can be used in power reactors and nuclear installations for space purposes. The use of fuel in the form of IMFs based on inert matrices can be successfully applied to increase the burnup and "incineration" of plutonium.

A 1.5 Dispersion fuel materials

One of the components of the dispersion fuel composition is a non-fissile material (matrix), which provides high radiation resistance of this type of nuclear fuel.

Despite the fact that dispersion type nuclear fuel is used in reactors for various purposes (research, power, nuclear power plants, etc.), the operating conditions of which differ significantly, there are a number of requirements that must be taken into account when choosing a matrix material.

When choosing a matrix material, it is necessary to take into account nuclear properties, physical, mechanical and economic. First of all, the matrix material should have the smallest value of the thermal neutron absorption cross section. In addition, it must meet the following requirements:

- have a melting temperature higher than the operating temperature of the fuel core of fuel elements,
- have high mechanical properties (strength, elasticity, hardness, etc.), and not only their short-term values are extremely important, but also long-term strength, creep rate, etc., in order to restrain the pressure of gaseous fission products escaping from the fuel,
- thermophysical properties (thermal conductivity, coefficient of thermal expansion, etc.) should ensure good transfer of thermal energy from the fuel particle through the cladding to the coolant,
- it is extremely important that the matrix material is compatible with the fuel composition, cladding material and coolant,
- the matrix material should not have phase transformations and be stable under conditions of radiation exposure.

In addition to the properties that ensure the operability of a fuel element using dispersion type nuclear fuel, it is necessary to take into account its availability and cost when choosing a matrix material.

Aluminum and zirconium, as well as their alloys, are widely used as a matrix material in the production of dispersion-type fuel elements for research reactors and reactors of ship nuclear power plants. A stainless steel matrix is used in dispersion type nuclear fuel in power reactors. Graphite serves as a matrix material in the manufacture of fuel elements for HTGR reactors. In the development of IMF-type fuel intended for "burning" plutonium, most often ceramic materials are used as matrix materials, mainly of the oxide type.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Самойлов А.Г. и др. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 400 с.
- 2) Скоров Д.М., Бычков Ю.Ф., Дашковский А.М. Реакторное материаловедение. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. – 344 с.
- 3) Прошкин А.А., Дьяков А.В., Степанов А.С. Перспективные виды топлива для энергетических водо-водяных и быстрых реакторов // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2013. – Вып. 1. – С. 26.
- 4) Костин В.И. и др. Реакторные установки разработки ОКБМ в развитии атомной промышленности, энергетики и флота России // Атомная энергия. – Январь 2007. – Т. 102. – Вып. 1. – С. 3.
- 5) Konings R.J.M., et al. Transmutation of actinides in inert-matrix fuels: fabrication, studies and modeling of fuel behavior // J. Nucl. Mater. – 1999. – V. 274. – No 1–2. – P. 84.
- 6) Горский В.В. Ядерное топливо с инертной матрицей (IMF) // Атомная техника за рубежом. – 2000. – № 10. – С. 3.
- 7) Алексеев С.В., Зайцев В.А. Торий в ядерной энергетике. – М.: Техносфера, 2014. – 394 с.
- 8) Соколова И.Д. и др. Использование тория в ядерно-энергетических реакторах // Атомная техника за рубежом. – 2009. – № 8. – С. 3.
- 9) Ackerman R.J., Rauh E. G. High-temperature properties of the Th – O system. – «High-temper. Sci. (Int. Journ.)», 1973, v. 5, N 6, p. 463
- 10) Benz R. Thorium – Thorium dioxide phase equilibria. – «J. Nucl. Mater.», 1969, v. 29, N 1, p. 43.
- 11) Костин В.И. и др. Реакторные установки разработки ОКБМ в развитии атомной промышленности, энергетики и флота России // Атомная энергия. – Январь 2007. – Т. 102. – Вып. 1. – С. 3. Кацин Л. Химия тория. – В

кн.: Актиниды. Под ред. Г. Сибурга и Дж. Каца. М., Изд-во иностр. лит., 1955, с. 89.

12) Lang S.M., Knudsen F.P. Some physical properties of high density thorium dioxide // J. Amer. Ceram. Soc. – 1956. – V. 39. – P. 415.

13) Konings R.J.M., et al. Transmutation of actinides in inert-matrix fuels: fabrication, studies and modeling of fuel behavior // J. Nucl. Mater. – 1999. – V. 274. – No 1–2. – P. 84.

14) Цыканов В.А. Тепловыделяющие элементы для исследовательских реакторов. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2000. – 249 с.

15) Мень А.Н., Воробьев Ю.П., Чуфаров Г.И. Физико-химические свойства нестехиометрических окислов. – Л.: Химия, 1973. – 223 с.

16) Weissert L.R., Schileo G. Fabrication of thorium fuel elements. – Publ. American Nuclear Society for Metals. – U.S. Atomic Energy Commission, 1966. – P. 208.

17) Harada Y., et al. Calcination and sintering study of thoria // J. Amer. Ceram. Soc. – 1962. – V. 45. – No 6. – P. 253.

18) Baldetti S., et al. National Committee for Nuclear Energy (CNEN) activities on the Uranium – Thorium cycle applied to water reactors. In.: Proceedings of the Fourth United National International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy. United Nations, Geneva. – 1971. – V. 9. – P. 255.

19) Свойства элементов. В двух частях. Ч.1. Физические свойства. Справочник. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.

20) Weissert L.R., Schileo G. Fabrication of thorium fuel elements. – Publ. American Nuclear Society for Metals. – U.S. Atomic Energy Commission, 1966. – P. 208

21) Болгар А.С., Турчанин А.Г., Фесенко В.В. Термодинамические свойства карбидов. – Киев: Наукова думка, 1973. – 271 с.

- 22) Свойства, получение и применение тугоплавких соединений. Справочник / Под. ред. Т.Я. Косолаповой. – М.: Металлургия, 1986.– 928 с.
- 23) Самсонов Г.В., Упадхья Г.Ш., Нешпор В.С. Физическое материаловедение карбидов. – Киев: Наукова думка, 1974. – 455 с.
- 24) Henna S., Lones S.W. // Trans. Br. Ceram Soc. – 196. – P. 613.
- 25) Chandramouli V., et al. Microwave synthesis of solid solutions of urania and thoria – a comparative study // J. Nucl. Mater. – 1998. – V. 254. – No 1. – P. 55.
- 26) Simnad M.T. Fuel element experience in nuclear power reactor – Gordon and Breach Sci. Pub. New York, London, Paris, 1971.
- 27) Wymer R.G. Laboratory and engineering studies of sol-gel processes at Oak-Ridge Nat. Lab. Sol-gel processes for ceramic nuclear fuels, Vienna, 6–10 May, 1968. IAEA. – Vienna, 1968. – P. 131.
- 28) Anthonysamy S., et al. Studies on the Kinetics of oxidation of urania-thoria solid solutions in air // J. Nucl. Mater. – 2000. – V. 280. – P. 25.
- 29) Watts C.R. Stability of tungsten and thoria dispersions in beryllium. – Amer. Inst. Aeronaut. Astronaut. Technical Information Service, 1968.
- 30) Кржановский Р.Е., Штерн З.Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов. – Л.: Энергия, 1973. – 334 с.
- 31) Тугоплавкие материалы в машиностроении. Справочник под ред. Туманова А.Т. и Портного К.И. – М.: Машиностроение, 1967. – 392 с.
- 32) Henney J., Jones J.W.S. Great Britain Atomic Energy Research Establishment Report AERE-R-4993, Harwell, Berks, England, 1965.
- 33) Burghartz M., et al. Concepts and first fabrication studies of inert matrix fuel for the incineration of plutonium // Workshop on Advanced Reactors with Innovative Fuels, Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland, 21–23 Oct, 1998. – NEA, 1998. –P. 253.
- 34) Самойлов А.Г., Каштанов А.И., Волкова В.С. Дисперсионные ТВЭЛЫ: В 2-х т. Т. 1. Материалы и технология. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.

35) Организация, нормирование и оплата труда: Учебное пособие / А. С. Головачев, Н. С. Березина, Н. Ч. Бокун и др.; Под общ. Ред. А. С. Головачева. – М.: Новое знание, 2004. – 496 с. /Глава 5.

36) Пашуто, В. П. Организация, нормирование и оплата труда на предприятии: учебно-практическое пособие / В. П. Пашуто. – М: КНОРУС, 2005. – 320 с. / Глава 7/

37) Моссэ А.Л., Печковский В.В. Применение низкотемпературной плазмы в технологии неорганических веществ. Минск, Наука и техника, 1973. – 216 с.

38) Эксплуатационная документация для компрессора AIRTECH 220/25W1.

39) СН 2.2.4/2.1.8.562-96 "Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки"

40) Эксплуатационная документация ВЧГ8-60/13, 2000 г.

41) Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. –Изд. 2-е, доп. И перераб. –М.: Наука, 1972. – 720с.

42) ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества.