

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 ядерного топливного цикла**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Моделирование и исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного уран-ториевого ядерного топлива

УДК 621.039.543:661.8'02:66.011:533.9

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОАМ81	Сопыряев Владислав Вадимович		

Руководитель ВКР

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

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения
Профессиональные компетенции	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области технологий ядерно-топливного цикла, физики кинетических явлений, методов разделения жидких и газовых смесей, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области изотопных технологий и материалов, получения высокочистых веществ, переработки, утилизации и обезвреживания промышленных отходов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие явления и закономерности в области изотопных технологий и материалов, проводить исследования в области разделения молекулярных и изотопных смесей, получения высокочистых веществ.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы расчета каскадов для разделения молекулярных и изотопных смесей, эксплуатировать, проводить испытания, монтаж и настройку современных физических установок и устройств.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, проектировать и организовывать инновационный бизнес, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности, использовать современные достижения и передовые технологии получения и применения изотопно-модифицированных материалов в профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

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

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

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

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
ОАМ81	Сопыряеву Владиславу Вадимовичу

Тема работы:

Моделирование и исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного уран-ториевого ядерного топлива	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	02.03.2020 № 62-51/с

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

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	И.В. Кащук
Социальная ответственность	Т.С. Гоголева

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	12.03.2020 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
0AM81	В.В. Сопыряев		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM81	Сопыряеву Владиславу Вадимовичу

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

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %. (НК РФ)

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ конкурентных технических решений (НИ)	Анализ и оценка конкурентоспособности НИ. SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)	Определение структуры выполнения НИ. Определение трудоемкости работ. Разработка графика проведения исследования.
3. Составление бюджета инженерного проекта (НИ)	Расчет бюджетной стоимости НИ по разработке стенда
4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	12.03.2020 г.
--	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Кащук Ирина Вадимовна	К.Т.Н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Сопыряев Владислав Вадимович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM81	Сопыряеву Владиславу Вадимовичу

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

Тема ВКР:

Моделирование и исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного уран-ториевого ядерного топлива	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Теоретическое и экспериментальное исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций водно-органических нитратных растворов. Область применения - атомная энергетика.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ; – ГОСТ 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»; – ГОСТ 23000-78 «Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования».
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: – отклонение показателей микроклимата; – недостаточная освещенность; – повышенный уровень шума; – повышенный уровень электромагнитных излучений; – поражение электрическим током.
3. Экологическая безопасность:	– воздействия объекта на литосферу (отходы, утилизация компьютерной техники и периферийных устройств); – обеспечение экологической безопасности.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– описание типичной ЧС – пожар на рабочем месте; – превентивные меры и порядок действий во время ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	12.03.2020 г.
--	---------------

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Сопыряев Владислав Вадимович		

ОГЛАВЛЕНИЕ

РЕФЕРАТ	11
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	13
1.1. Дисперсионное ядерное топливо.....	13
1.1.1 Матричные материалы дисперсионного ядерного топлива.....	14
1.1.2 Матричные материалы на основе металлов.....	15
1.1.2.1 Алюминий и его сплавы.....	16
1.1.2.2 Цирконий и его сплавы	18
1.1.2.3 Никель.....	20
1.1.2.4 Магний.....	22
1.1.3 Матричные материалы на основе оксидов металлов	24
1.1.4 Матричные материалы на основе нитридов металлов	25
1.2 Технологии получения оксидных композиций для дисперсионного ядерного топлива.....	27
1.2.1 Золь-гель процесс	27
1.2.2 Плазмохимический синтез оксидных композиций	28
2. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ	31
2.1 Расчет показателей горючести и состава водно-органических нитратных растворов	31
2.2 Термодинамический расчет процесса плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций из растворов ВОНР	32
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	43
3.1 Описание плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона	43
3.2 Определение расходов воздушного теплоносителя через ВЧФ- плазмотрон и газоход.....	44
3.3 Расчет расхода газа через реактор.....	47
3.4 Плазмохимическая переработка модельных растворов	48
3.5 Анализ полученных результатов.....	49
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	56

4.1 Введение	56
4.2 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	57
4.2.1 Анализ конкурентных технических решений.....	57
4.2.2 SWOT-анализ.....	59
4.3 Планирование научно-исследовательских работ	60
4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования	60
4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	61
4.3.3 Разработка графика проведения научного исследования	62
4.4 Бюджет научного исследования	66
4.4.1 Расчет материальных затрат научного исследования	66
4.4.2 Расчет амортизация оборудования	67
4.4.3 Основная заработная плата исполнителей научного исследования .	68
4.4.4 Дополнительная заработная плата	70
4.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	71
4.4.6 Накладные расходы.....	71
4.5 Определение финансовой, бюджетной и экономической эффективности исследования	72
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	77
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	77
5.2 Производственная безопасность	79
5.2.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов	79
5.2.1.1 Отклонение показателей микроклимата	79
5.2.1.2 Недостаточная освещенность	80
5.2.1.3 Повышенный уровень шума	81
5.2.1.4 Повышенный уровень электромагнитных излучений	81
5.2.1.5 Поражение электрическим током.....	82
5.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия вредных и опасных факторов	84

5.3 Экологическая безопасность	85
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	86
Заключение по разделу “Социальная ответственность”	87
ВЫВОДЫ.....	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	89
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	90
Приложение А	93
Приложение Б.....	105
Приложение В	106
Приложение Г	107
Приложение Д	108
Приложение Е.....	109
Приложение Ж	111

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 111 страниц, 34 рисунка, 27 таблицы, 30 источников, 7 приложений.

Ключевые слова: высокочастотный факельный разряд, плазма, высокочастотный факельный плазмотрон, водно-органический нитратный раствор, плазмохимический синтез, оксидные композиции.

Объектом исследования является процесс плазмохимического синтеза оксидных композиций водно-органических нитратных растворов.

Цель работы – расчет и оптимизация процесса прямого синтеза в воздушной плазме топливных оксидных композиций « $\text{UO}_2\text{--ThO}_2\text{--MgO}$ » для уран-ториевого дисперсионного ядерного топлива из водно-органических нитратных растворов, включающих водные нитратные растворы делящихся металлов (уран, торий) и металл матрицы (магний), а также органический компонент.

В процессе исследований проводились: расчет показателей горючести различных по составу водно-органических нитратных растворов (ВОНР), термодинамические расчеты процесса плазмохимического синтеза оксидных уран-ториевых композиций из растворов ВОНР в воздушной плазме, измерение газодинамических параметров воздушно-плазменного потока при работе плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона, анализ полученных нанодисперсных порошков

В результате исследования: определены оптимальные составы растворов ВОНР и режимы, обеспечивающие их экологически безопасную и энергоэффективную плазменную переработку. Впервые экспериментально подтверждена на модельных растворах ВОНР возможность и эффективность процесса прямого плазмохимического синтеза гомогенных оксидных композиций «диоксид урана – диоксид тория – оксид магния» из диспергированных растворов в воздушно-плазменном потоке.

Область применения: результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы для создания

энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза оксидных композиций для различных типов ядерного топлива.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Дисперсионное ядерное топливо

В двадцать первом веке АЭС, использующие керамическое ядерное топливо (ЯТ), ещё будут составлять значительную часть атомной энергетики. Керамическое ядерное топливо из диоксида урана, обогащенное по изотопу уран-235, наряду с несомненными достоинствами имеет и существенные недостатки: хрупкость, низкая теплопроводность, которая по температуре плавления ограничивает удельную мощность реактора, короткий период использования (до 3-5 лет), невозможность создания энергетических установок сверхмалой (до 10 МВт) и малой (10-100 МВт) мощности, ограниченный ресурс изотопа уран-235, большие расходы на переработку отработавшего ЯТ [1].

Необходимость в дорогостоящем изотопном обогащении пропадает при использовании изотопов торий-232, уран-238, плутоний-239. Использование такого ЯТ может достигать до 10-15 лет. Также ко всему, запасов тория в земной коре по прогнозам в 3-5 раз больше, чем урана, а использование керамического ЯТ из композиций на основе оксида тория даст возможность создания сверхмалых и малых энергетических установок, которые можно использовать в удалённых и труднодоступных регионах, на рудниках и карьерах. Все же низкая теплопроводность остаётся существенным недостатком для керамического ядерного топлива.

Одним из перспективных направлений дальнейшего развития атомной энергетики является использование дисперсионного ЯТ, в котором включения из делящихся металлов (уран, торий, плутоний) в виде гранулированных оксидных композиций (микросфер) размещают в матрице, имеющей высокий коэффициент теплопроводности [2–5].

1.1.1 Матричные материалы дисперсионного ядерного топлива

Одним из компонентов топливной композиции дисперсионного ЯТ является неделимый материал (матрица), который обеспечивает его высокую радиационную стойкость.

Несмотря на то, что дисперсионное ЯТ применяется в реакторах различного назначения (исследовательских, энергетических, ядерных энергетических установок и т.д.), условия работы которых значительно различаются, имеется ряд требований, которые необходимо учитывать при выборе материала матрицы. В первую очередь материал матрицы должен иметь наименьшее значение поперечного сечения резонансного поглощения тепловых нейтронов, а также удовлетворять следующим требованиям [6]:

- иметь температуру плавления выше рабочей температуры топливного сердечника ТВЭЛ;
- обладать высокими механическими свойствами (прочностью, упругостью, твердостью и т.д.), чтобы сдерживать давление выходящих из ЯТ газообразных продуктов деления;
- теплофизические свойства (теплопроводность, коэффициент термического расширения и т.д.) должны обеспечивать хорошую передачу тепловой энергии от частицы ЯТ через оболочку к теплоносителю;
- материал матрицы должен быть совместим с топливной композицией дисперсионного ЯТ, материалом оболочки и теплоносителем;
- материал матрицы не должен иметь фазовых превращений и быть устойчивым в условиях радиационного облучения.

Кроме свойств, обеспечивающих работоспособность ТВЭЛ, использующего дисперсионное ЯТ, необходимо при выборе материала матрицы учитывать его доступность и стоимость.

1.1.2 Матричные материалы на основе металлов

В качестве материала матрицы при производстве ТВЭЛ дисперсионного типа исследовательских реакторов и реакторов корабельных ядерно-энергетических установок (ЯЭУ) широкое применение нашли металлы (алюминий и цирконий, а также их сплавы). Матрица из нержавеющей стали используется в дисперсионном ЯТ в энергетических реакторных установках.

В таблице 1 приведены данные о поперечном сечении поглощения тепловых нейтронов металлов.

Таблица 1. Поперечные сечения поглощения тепловых нейтронов некоторых элементов [7].

Элемент	Поперечное сечение поглощения тепловых нейтронов, 10^{-24}см^2
Бериллий	$10 \cdot 10^{-2}$
Углерод	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Азот	1,9
Кислород	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Магний	$7,0 \cdot 10^{-4}$
Алюминий	0,24
Кремний	0,16
Цирконий	0,18
Ниобий	1,16
Хром	3,1
Титан	5,8
Ванадий	5,0
Марганец	13,2
Железо	2,6
Никель	4,6
Медь	3,8
Молибден	2,7
Вольфрам	19,2
Тантал	21,0

Поперечное сечение поглощения тепловых нейтронов сплавов определяется как сумма произведений ядерной концентрации на сечение поглощения для каждого компонента сплава, деленная на общее число ядер в грамме сплава [7].

1.1.2.1 Алюминий и его сплавы

Алюминий и его сплавы широко используются в качестве матрицы дисперсионной топливной композиции для ТВЭЛов исследовательских реакторов из-за хороших ядерных и теплофизических свойств, а также прекрасных технологических качеств. Однако алюминий имеет низкую прочность и неудовлетворительную коррозионную стойкость. При рабочих температурах большинства исследовательских реакторов (100–150 °С) эти недостатки незначительно влияют на работоспособность ТВЭЛов.

Для повышения механических свойств алюминия его легируют магнием, цинком, кремнием, медью, серебром, литием и галлием. Наибольший эффект повышения механических свойств алюминия достигается при одновременном легировании несколькими элементами. Сплавы алюминия после термообработки с дисперсионным твердением обладают хорошими длительными механическими свойствами.

Таблица 2. Механические свойства некоторых сплавов алюминия до и после облучения потоком нейтронов [7].

Марка сплава	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
	До/после облучения	До/после облучения	До/после облучения
АД1	95/180	47/120	38/21
САВ – 1	290/330	245/280	11/10
6061 (США)	315/350	270/310	17,5/16

В условиях реакторного облучения свойства конструкционных материалов изменяются, и при этом сильно снижается их пластичность. Реакторное облучение незначительно влияет на механические свойства алюминия и его сплавов. Обращает внимание тот факт, что алюминий и его

сплавы при облучении практически не теряют пластичность, но прочность алюминия и сплавов при этом повышается. Влияние облучения на механические свойства алюминия и его сплавов характеризуют данные, представленные на рисунке 1 [8].

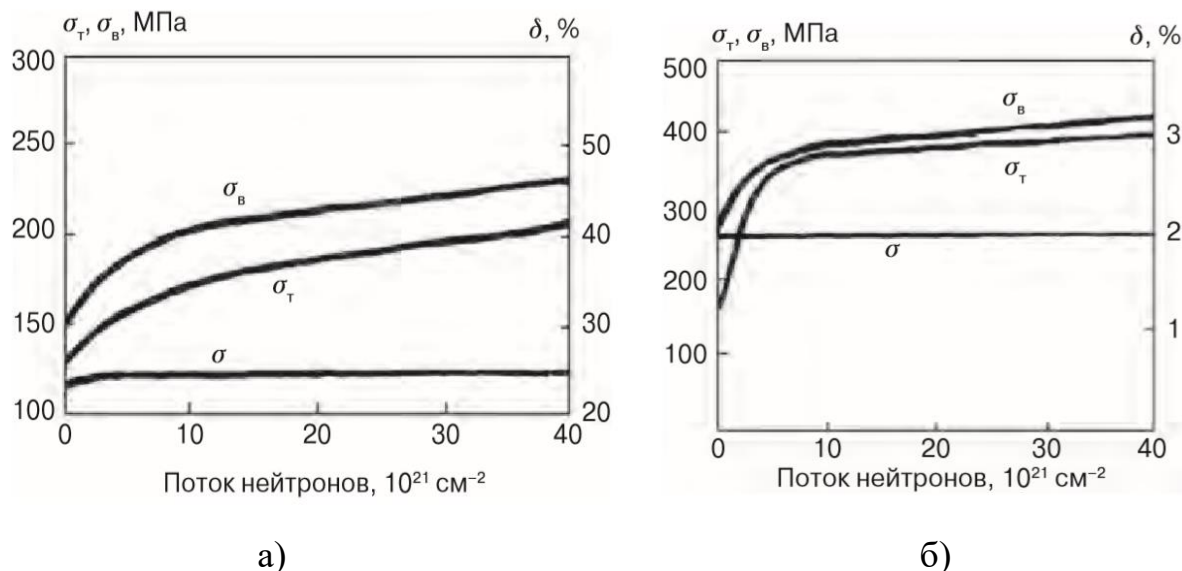


Рисунок 1. Влияние облучения на механические свойства технического алюминия (а) и сплава Al + 7% Si (б) [8]

Из анализа представленных зависимостей (рисунок 1) следует, что наибольшее изменение свойств происходит до величины потока нейтронов $(3-5) \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}$. Имеющиеся данные показывают, что технический алюминий, содержащий железо, кремний, медь и другие примеси, может успешно использоваться в качестве матрицы топливной композиции дисперсионного ЯТ до температур 100–130 °С. Технический алюминий с добавкой никеля используется в качестве матрицы топливной композиции дисперсионного ЯТ в энергетических ядерных реакторах с водой под давлением при температуре до 215–230 °С [8].

1.1.2.2 Цирконий и его сплавы

Цирконий и его сплавы широко применяются в атомной энергетике благодаря совокупности своих свойств: ядерных, химических и технологических. Однако эти свойства проявляются, если цирконий очищен от гафния, с которым он обычно находится в природе. Перед применением в атомной технике цирконий обычно подвергается йодному рафинированию. Широкое применение цирконий как матричный материал нашел в реакторах корабельных ядерных энергетических установок.

В настоящее время установлено существование трех фаз циркония: α -фаза ($T > 862\text{ }^{\circ}\text{C}$), β ($T = 862\text{--}1855\text{ }^{\circ}\text{C}$) и нестабильная ω -фаза ($P > 6\text{ ГПа}$). При фазовом превращении происходят объемные изменения, которые необходимо учитывать при определении эксплуатационных условий изделий из циркония.

На рисунке 2 показано влияние легирующих элементов на прочность циркония [8]. Наиболее важными легирующими элементами, используемыми в сплавах циркония, являются ниобий и олово.

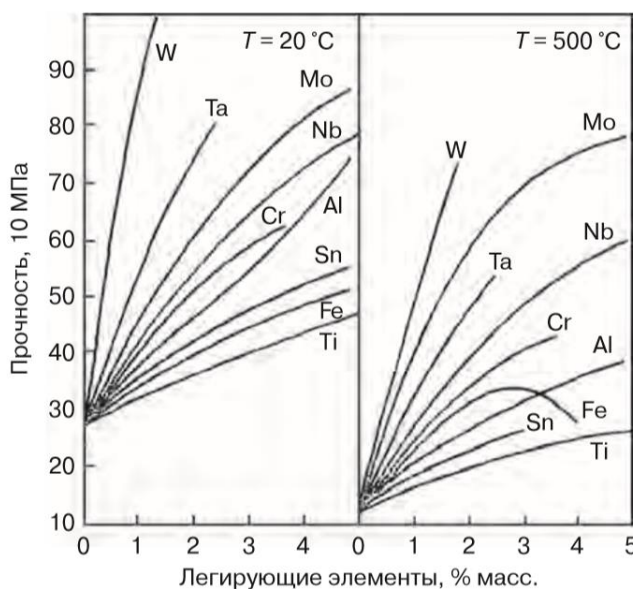


Рисунок 2. Влияние содержания легирующих элементов на прочность циркония при различных температурах

Как следует из данных рисунка 2, ниобий, имея сравнительно малое сечение захвата тепловых нейтронов, значительно повышает прочность

циркония как при комнатной температуре, так и при температуре 500 °С. В нашей стране в основном используются сплавы циркония с содержанием ниобия 1 % (Э110) и 2,5 % (Э125). В США применяются сложнелегированные сплавы (циркалои).

Значительное влияние на свойства циркония и его сплавов оказывает облучение. При облучении циркониевых сплавов происходит их упрочнение с одновременным снижением пластичности.

В таблице 3 приведены данные, характеризующие влияние облучения на механические свойства чистого циркония [8]. Данные таблицы 3 показывают, что изменение свойств циркония в результате облучения значительное.

Таблица 3. Влияние облучения на механические свойства (при 20 °С) циркония, отожженного при 650 °С в течение 30 минут

Температура облучения, °С	Поток быстрых нейтронов 10^{23} нейтр./м ²	σ_B , МПа		$\sigma_{0,2}$, МПа		δ , %	
		До облучения	После	До облучения	После	До облучения	После
80	0,3	300	330	160	220	35	26
80	4,0	265	320	160	260	34	20
80	10,0	265	360	160	340	34	15
300	0,4	260	280	150	220	34	25

При потоке быстрых нейтронов 10^{23} нейтр./м² предел прочности максимально возрастает на 36 %, предел текучести на 112 % и удлинение снижается на 68 %. По данным [8], сплав циркония Э635 при температуре облучения 80 и 300 °С практически не подвержен радиационному росту.

В ядерной технологии цирконий и его сплавы широко используются в качестве материалов оболочек ТВЭЛов. Крайне ограничены сведения об использовании этих материалов в качестве инертных матриц дисперсионных композиций ядерного топлива.

1.1.2.3 Никель

В качестве матрицы дисперсионной топливной композиции никель использовался в реакторе СМ-2. В нем отсутствуют аллотропические превращения. Теплопроводность никеля выше, чем нержавеющей стали. При температуре 100 °С его теплопроводность равна 83 Вт/(м·°С). Отличительной особенностью никеля является сочетание высокой прочности и модуля упругости с хорошей пластичностью ($\sigma = 30\text{--}40\%$) [9].

Для работоспособности дисперсионной топливной композиции наряду с теплопроводностью значительное влияние имеют длительные прочностные характеристики. На рисунке 3 приведены данные длительной прочности, а на рисунке 4 – зависимость скорости ползучести никеля от напряжения при различных температурах [10].

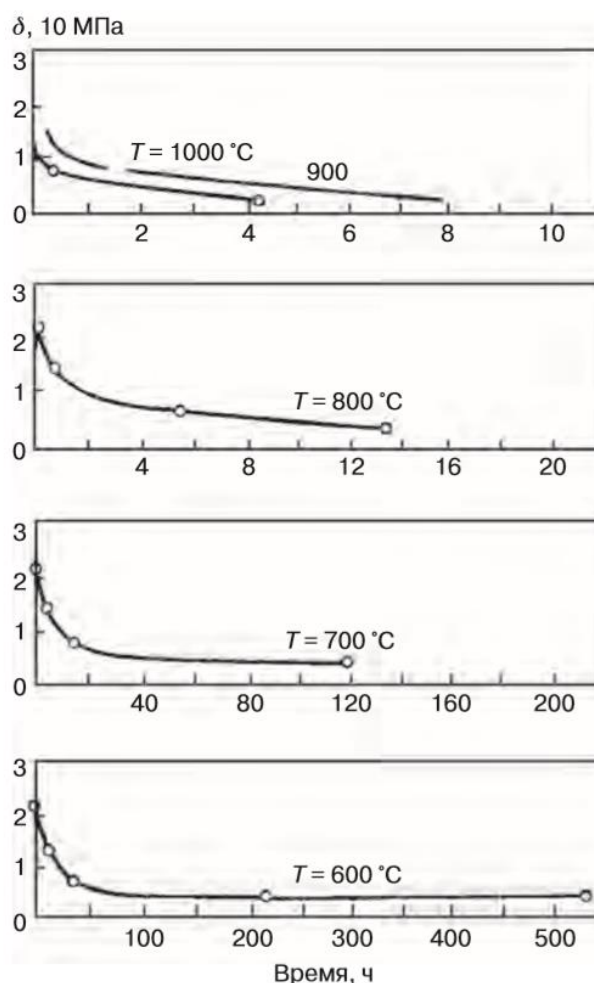


Рисунок 3. Длительная прочность никеля при различной температуре



Рисунок 4. Влияние напряжения на скорость ползучести никеля при различной температуре, °C: 1 – 250, 2 – 270, 3 – 480, 4 – 650

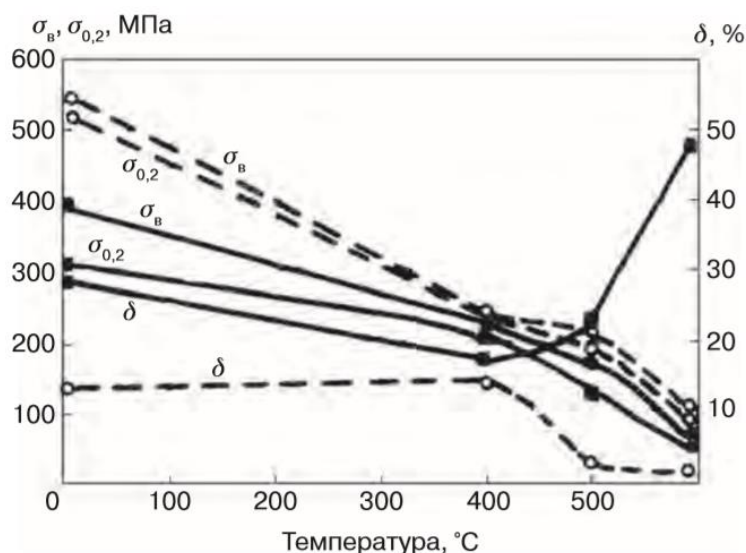


Рисунок 5. Влияние температуры на механические свойства технического никеля: (—) необлученного, (---) облученного

Изучение влияния нейтронного облучения в реакторе на механические свойства никеля показало резкое падение пластичности у облученного никеля при температуре 600 °C и выше, в то время как прочность увеличивается [8,10]. На рисунке 5 показано влияние температуры на механические свойства технического никеля, необлученного и облученного до потока нейтронов $1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ при температуре 150–200 °C. Согласно данным рисунка 5, до температуры 400 °C, характерной для исследовательских реакторов, пластические свойства никеля остаются достаточно высокими [10].

1.1.2.4 Магний

В СССР в первой в мире АЭС, а также Белоярской АЭС, Билибинской АТЭЦ, в реакторах ИРТ-2000 и ИРТ-5000 в качестве дисперсионного ядерного топлива использовалась композиция, в которой в качестве матричного материала применялся магний. Природный магний состоит из смеси трех стабильных изотопов ^{24}Mg (78,00 %), ^{25}Mg (10,11 %) и ^{26}Mg (11,29 %). Температура плавления магния равна 650 °С и зависит от содержания легирующих компонентов [11]. Среднее значение коэффициента линейного расширения для чистого магния в интервале температур 20 – 100 °С равно $26,86 \cdot 10^{-6}$.

Коэффициент теплопроводности магния при температуре 0 °С равен 172 Вт/(м·град). На рисунке 6 показано влияние температуры на изменение коэффициента теплопроводности магния [11].

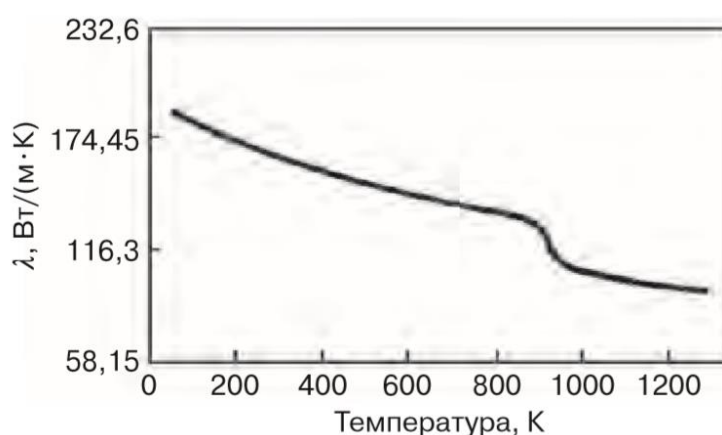


Рисунок 6. Влияние температуры на коэффициент теплопроводности магния

Из-за недостаточно высоких механических свойств магний не может быть использован в качестве конструкционного материала. Для повышения механических свойств магний легируют. Магниевого сплавы обладают выгодным сочетанием плотности и механических свойств. Плотность магниевых сплавов (1,8–1,9 г/см³) меньше плотности алюминия, железа, меди или никеля, а удельная прочность выше, чем у некоторых конструкционных сталей.

Разработаны и применяются различные магниевые сплавы, в том числе стандартные и специальные. Сплавы различаются по рабочим температурам: рабочая температура применяемых сплавов Mg-Al-Zr не превышает 150–200 °С. На рисунке 7 приведен участок диаграммы Mg-Zr [12]. При более высоких температурах их прочность снижается. Развитие новой техники, в том числе атомной энергетики, потребовало создания магниевых сплавов, не теряющих прочности при повышенных (до 400 °С) температурах.

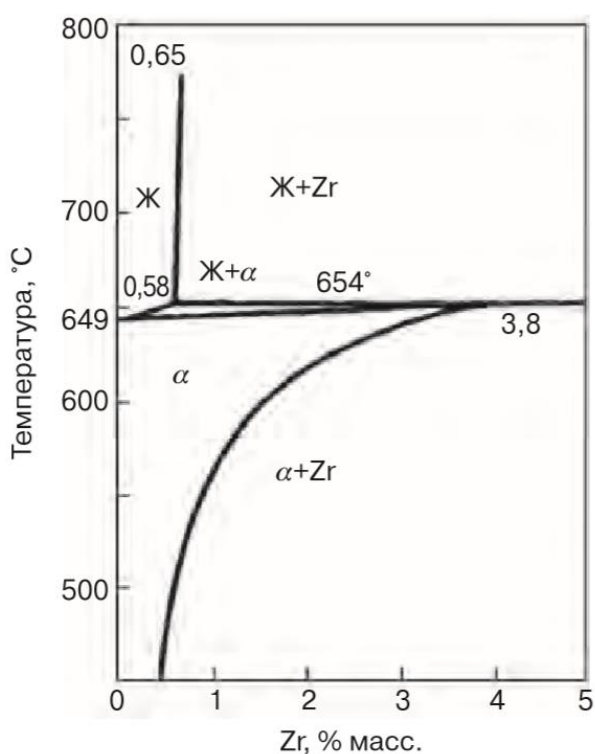


Рисунок 7. Участок диаграммы Mg-Zr

При создании таких сплавов были использованы редкоземельные металлы и торий. Сплавы магния, предназначенные для работы при температурах 300–400 °С, содержат от 1,5 до 4,0 % тория.

Малое сечение захвата тепловых нейтронов магния (0,06 барн), практически отсутствие его взаимодействия с ураном, хорошая теплопроводность и прочность сплавов магния послужили основанием их применения в атомной энергетике в качестве оболочечных материалов ТВЭЛов и матричного материала дисперсионной топливной композиции [13].

1.1.3 Матричные материалы на основе оксидов металлов

Уже к концу 90-х годов основное внимание при выборе материала инертной матрицы топлива IMF было сосредоточено на оксидных системах. Это в основном обусловлено тем, что наиболее изученное и используемое ядерное топливо – оксидное (UO_2 , PuO_2).

Среди оксидов в качестве матричного материала в основном рассматривали ZrO_2 , MgO , Al_2O_3 , Y_2O_3 , CeO_2 и более сложные оксидные системы: $(\text{Zr}, \text{Ca})\text{O}_{2-x}$, $(\text{Zr}, \text{Y})\text{O}_{2+x}$, ZrSiO_4 , $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, MgAl_2O_4 и др. В таблице Ж1 (Приложение Ж) приведены физико-механические свойства оксидных материалов.

Из анализа данных (таблица Ж1) следующие оксиды Al_2O_3 , MgO , MgAl_2O_4 , Ce_2O_3 , Y_2O_3 и стабилизированный ZrO_2 могут быть использованы в качестве материала инертной матрицы дисперсионного ЯТ. Диоксид циркония обладает хорошими физико-механическими свойствами при малом сечении поглощения тепловых нейтронов цирконием, отличается высокой химической и радиационной стойкостью. Однако ниже температуры плавления этот оксид имеет три типа кристаллической структуры [14]:

- высокотемпературная кубическая фаза, изоморфная с флюоритом CaF_2 при температуре выше 2640°C ;
- промежуточная тетрагональная фаза в диапазоне температур $1440 < T < 2640 \text{ K}$;
- низкотемпературная моноклинная фаза при температуре ниже 1420 K .

Очень важное свойство ZrO_2 – стабилизация кубической флюоритной структуры от температуры плавления до комнатной при замене Zr^{+4} в ZrO_2 алювалентными катионами Mg^{+2} , Ca^{+2} , Y^{+3} [15]. Недостатком ZrO_2 является низкая теплопроводность, которую можно повысить, добавляя MgAl_2O_4 . Теплопроводность ZrO_2 , стабилизированного 15 % масс. Y_2O_3 – $1,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ при 1500°C [16].

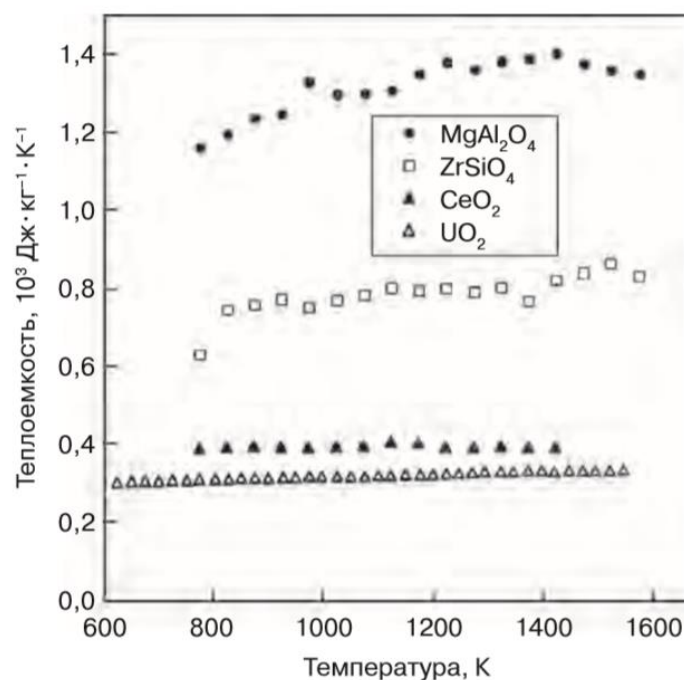


Рисунок 8. Влияние температуры на изменение теплоемкости MgAl_2O_4 , ZrSiO_4 и CeO_2

На рисунке 8 приведены данные исследований влияния температуры на изменение теплоемкости шпинели, циркона и оксида церия в сравнении с UO_2 , выполненных в Институте трансурановых элементов (ITU), Германия.

1.1.4 Матричные материалы на основе нитридов металлов

Наиболее благоприятное топливо реакторов на быстрых нейтронах — твердый раствор на основе UN-PuN [17]. Переработка такого вида топлива в топливо IMF предпочтительна с использованием в качестве материала инертной матрицы нитридов.

На рисунке 9 (а,б) и 10 приведены данные по распределению фазовых полей в системах Pu-Ce-N, Pu-Y-N и Pu-Zr-N [18].

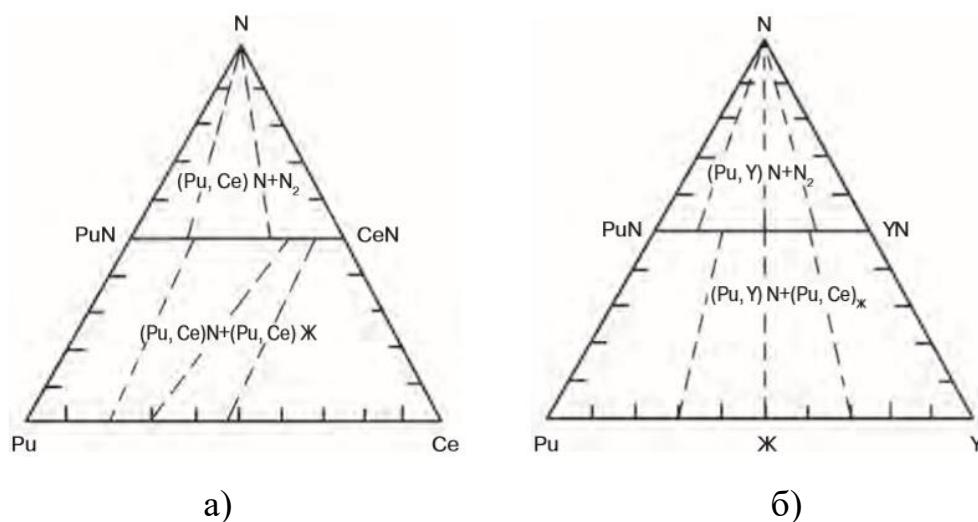


Рисунок 9. Изотермические сечения (1600 °C): система Pu-Ce-N (а); система Pu-Y-N (б)

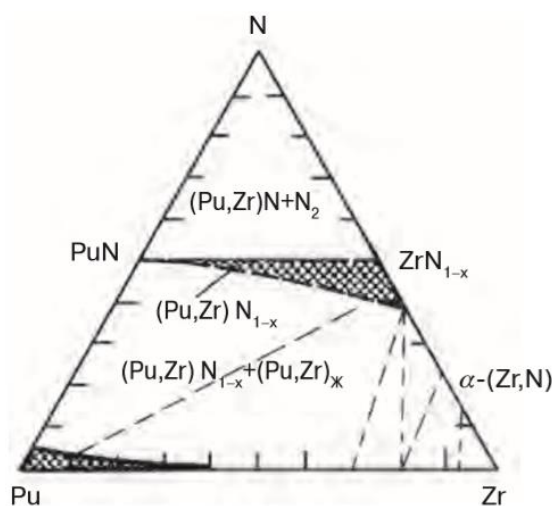


Рисунок 10. Изотермические сечения системы Pu-Zr-N (1500 °C)

Данные рисунков 9 (а,б) и 10 показывают, что в указанных системах существует непрерывный ряд твердых растворов. Согласно данным работ [18,19] моонитриды плутония и урана являются в высокой степени взаимно растворимыми. В системе AlN-PuN взаимная растворимость не обнаружена. По данным работы [20], не рекомендуется использовать в качестве материала инертной матрицы IMF нитрид титана из-за его ограниченной (≈ 31 % мол.) растворимости в PuN. Нитриды хрома (CrN) имеют высокое парциальное давление азота (≈ 1 мм рт. ст. при 1048 °C), поэтому их нецелесообразно использовать в качестве матричного материала. Из-за ограниченной

термостабильности Mg_3N_2 не рассматривают как материал матрицы IMF. По совокупности свойств наиболее подходящими материалами инертного разбавителя IMF являются нитриды алюминия и циркония.

1.2 Технологии получения оксидных композиций для дисперсионного ядерного топлива

1.2.1 Золь-гель процесс

Золь-гель процесс представляет собой технологию получения дисперсных частиц с преобразованием коллоидной системы на одной из стадий процесса. Этот метод используется для изготовления оксидов металлов, особенно оксидов кремния (Si) и титана (Ti). Процесс включает в себя превращение мономеров в коллоидный раствор – золь (стабильная суспензия коллоидных частиц в жидкости), который является предшественником для геля (пористая трехмерная непрерывная сплошная сеть, окружающая и поддерживающая непрерывную жидкую фазу; часто образуется ковалентными связями между золями частиц).

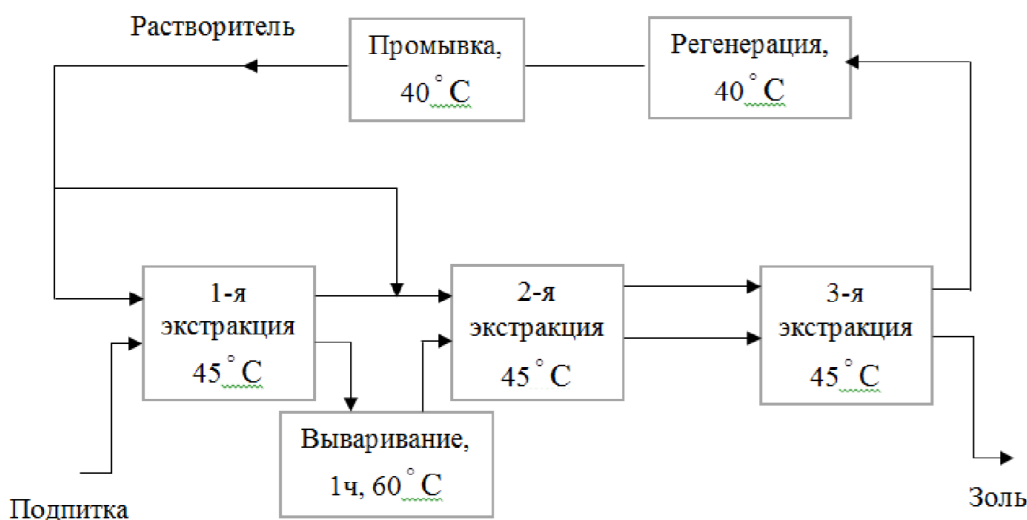


Рисунок 11. Схема процесса приготовления золя из диоксида урана экстракцией растворителя

«Золь» (коллоидный раствор), постепенно переходит в гелеобразную двухфазную систему, содержащую как жидкую фазу, так и твердую фазу,

морфология которой варьируется от дискретных частиц до непрерывных полимерных сетей. В случае коллоида объемная доля частиц может быть настолько низкой, что первоначально может потребоваться удаление значительного количества жидкости для улучшения гелеобразных свойств. Это может быть достигнуто разными способами. Самый простой метод состоит в том, чтобы дать частицам дисперсной фазы осесть в жидкости или газе под действием гравитационного поля или центробежных сил, а затем слить оставшуюся жидкость. Для ускорения процесса разделения фаз также можно использовать центрифугирование.

Для удаления оставшейся жидкой фазы требуется процесс сушки, который обычно способствует значительной усадке и уплотнению частиц. Скорость, с которой растворитель может быть удален, в конечном итоге определяется пористостью геля. После этого зачастую требуется термическая обработка (процесс обжига), чтобы способствовать дальнейшей поликонденсации и улучшить механические свойства и структурную стабильность. За счет этого происходит окончательное спекание, уплотнение и рост зерна.

Применение внешнего гелеобразования (золь-гель процесса) для получения микросфер из смесевых водных нитратных растворов сопряжено со следующими недостатками: многостадийность; продолжительность; низкая производительность; необходимость использования химических реагентов; дополнительное водородное восстановление; высокая себестоимость. Кроме того, раздельное получение и механическое смешение микросфер и матрицы не обеспечивают гомогенное распределение фаз в таком ЯТ.

1.2.2 Плазмохимический синтез оксидных композиций

К несомненным преимуществам применения плазмы для плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного ЯТ из диспергированных смесевых водных нитратных растворов по сравнению с золь-гель процессом и технологией, основанной на раздельном получении и

механическом смешении оксидов металлов, следует отнести: одностадийность; высокую скорость; возможность активно влиять на размер и морфологию частиц; компактность технологического оборудования [23].

На рисунке 12 представлена схема плазменной переработки диспергированных растворов [24].

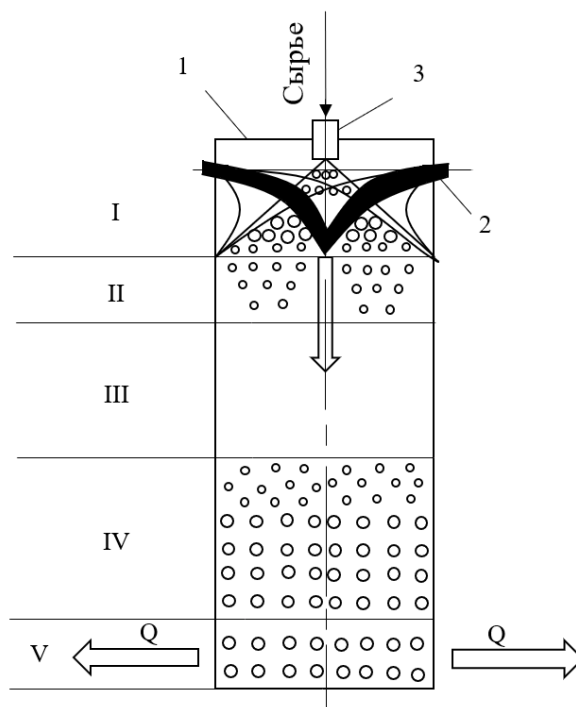


Рисунок 12. Схема плазменной переработки диспергированных растворов:

I – зона смешения; II – зона испарения капель; III – зона химической реакции; IV – зона формирования частиц порошка; V – зона охлаждения; 1 – плазмотрон; 2 – реактор; 3 – форсунка

В качестве исходного сырья применяют смесевые водные растворы или суспензии. Исходный раствор диспергируется и подается в плазменную струю.

Термолиз водных растворов солей или суспензий является гибким и универсальным способом получения наноразмерных порошков простых и сложных оксидов металлов. Основные его достоинства – это большое число каналов воздействия на физико-химические свойства продукта, возможность

синтеза сложнооксидных соединений, а также высокая химическая активность получаемых целевых продуктов.

В качестве исходных соединений для подготовки водных растворов и суспензий используются нитраты, сульфаты, ацетаты, карбонаты, гидроксиды металлов. Из водных растворов и суспензий, включающих соединения нескольких металлов получают сложные оксиды.

Однако плазменная обработка только смесевых водных растворов и суспензий требует значительных энергозатрат (до 4 МВт·ч/т) и не позволяет получать в одну стадию оксидные композиции требуемого стехиометрического состава без дополнительного водородного восстановления.

Предлагается прямой плазмохимический синтез в воздушно-плазменном потоке сложных оксидных композиций (включающих оксиды делящихся материалов и матрицу из тугоплавких оксидов металлов, имеющих высокий коэффициент теплопроводности и низкое резонансное поглощение нейтронов) из диспергированных горючих водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны и др.) и имеющих низшую теплотворную способность не менее 8,4 МДж/кг.

Плазменная обработка таких растворов ВОНР приводит к существенному снижению удельных энергозатрат на их переработку (до 0,1 МВт·ч/т), позволит значительно увеличить производительность плазменных установок, а также обеспечит условия в реакторе плазменной установки для прямого синтеза в воздушной плазме наноразмерных сложных оксидных композиций, имеющих гомогенное распределение фаз, высокую теплопроводность, а также требуемый стехиометрический состав без дополнительного водородного восстановления.

2. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Расчет показателей горючести и состава водно-органических нитратных растворов

Низшая теплотворная способность водно-органических нитратных растворов определялась по уравнению [25].

$$Q_n^p = \frac{(100 - W - A) \cdot Q_n^c}{100} - \frac{2,5 \cdot W}{100}, \quad (1)$$

где Q_n^c – низшая теплотворная способность горючего компонента в составе водно-органического нитратного раствора, МДж/кг; W и A – содержание воды и негорючих компонентов, %; 2,5 – значение скрытой теплоты испарения воды при 0 °С, МДж/кг.

Показано, что водно-органические нитратные растворы (ВОНР), имеющие $Q_n^p \geq 8,4$ МДж/кг, могут обеспечить существенное снижение энергозатрат на плазмохимический синтез сложных оксидных композиций.

Для образования сложных оксидных композиций различного состава определены следующие оптимальные по составу растворы ВОНР, имеющие $Q_n^p \geq 8,4$ МДж/кг:

- ВОНР-1 (28,4% H_2O – 29% C_3H_6O – 0,922% $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 9,941% $Th(NO_3)_4 \cdot 6H_2O$ – 31,737% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для получения ОК «50 % (5 % UO_2 + 45 % ThO_2)-50 % MgO »;

- ВОНР-2 (28,4% H_2O – 29% C_3H_6O – 1,066% $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 11,498% $Th(NO_3)_4 \cdot 6H_2O$ – 30,036% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для получения ОК «55 % (5,5 % UO_2 + 49,5 % ThO_2)-45 % MgO »;

- ВОНР-3 (28,4% H_2O – 29% C_3H_6O – 1,227% $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 13,225% $Th(NO_3)_4 \cdot 6H_2O$ – 28,149% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для получения ОК «60 % (6 % UO_2 + 54 % ThO_2)-40 % MgO »;

- ВОНР-4 (28,4% H_2O – 29% C_3H_6O – 1,405% $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 15,150% $Th(NO_3)_4 \cdot 6H_2O$ – 26,045% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для получения ОК «65 % (6,5 % UO_2 + 58,5 % ThO_2)-35 % MgO »;

- ВОНР-5 (28,4% H_2O – 29% $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 1,605% $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 17,310% $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 23,685% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для получения ОК «70 % (7 % UO_2 +63 % ThO_2)-30 % MgO »;

- ВОНР-6 (28,4% H_2O – 29% $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 1,832% $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 19,750% $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 21,019% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для получения ОК «75 % (7,5 % UO_2 +67,5 % ThO_2)-25 % MgO »;

- ВОНР-7 (28,4% H_2O – 29% $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 2,090% $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 22,529% $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 17,982% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для получения ОК «80 % (8 % UO_2 +72 % ThO_2)-20 % MgO »;

- ВОНР-8 (28,4% H_2O – 29% $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 2,386% $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 25,722% $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 14,492% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для получения ОК «85 % (8,5 % UO_2 +76,5 % ThO_2)-15 % MgO »;

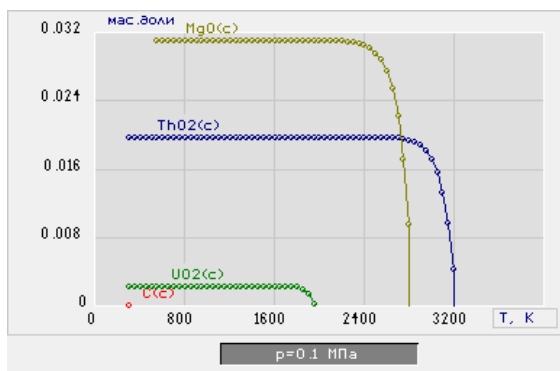
- ВОНР-9 (28,4% H_2O – 29% $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 2,730% $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 29,430% $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 10,440% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для получения ОК «90 % (9 % UO_2 +81 % ThO_2)-10 % MgO »;

- ВОНР-10 (28,4% H_2O – 29% $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 3,134% $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 33,788% $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 5,678% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для получения ОК «95 % (9,5 % UO_2 +85,5 % ThO_2)-5 % MgO »;

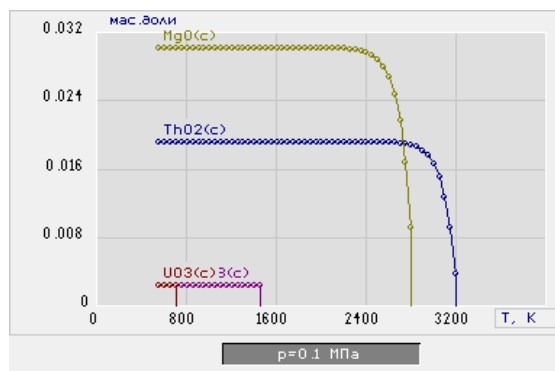
2.2 Термодинамический расчет процесса плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций из растворов ВОНР

Термодинамическое моделирование процесса плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций в воздушной плазме из растворов ВОНР проведено с использованием лицензионной программы термодинамического расчета состава фаз произвольных гетерогенных систем «TERRA». Расчеты проведены при атмосферном давлении (0,1 МПа), в широком диапазоне температур (300–4000 К) и изменении значений исходной массовой доли плазменного теплоносителя (воздуха) в интервале (10-90%).

На рисунках 13-22 представлены характерные равновесные составы продуктов плазменной переработки растворов ВОНР на основе ацетона.

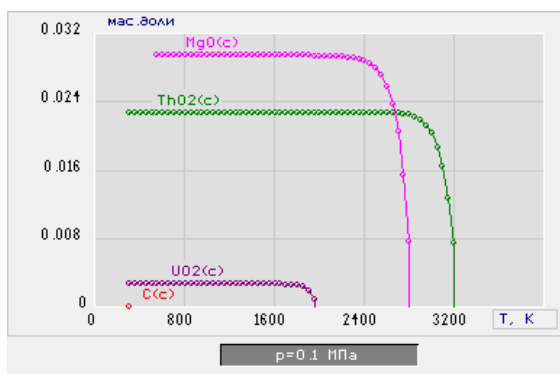


а)

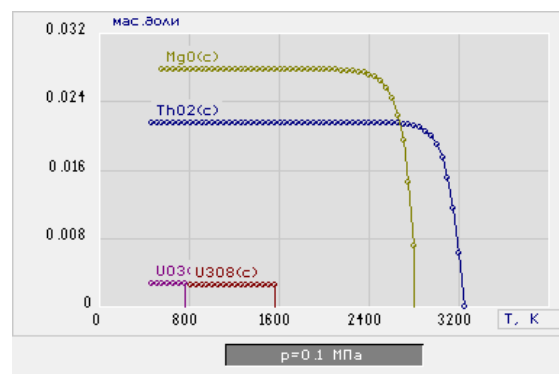


б)

Рисунок 13 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-1 на основе ацетона при массовой доле воздуха 64 % (а) и 65 % (б)

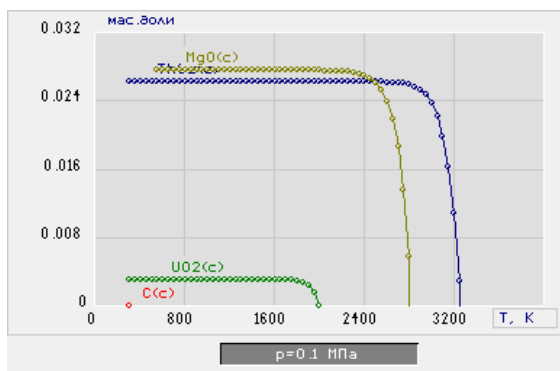


а)

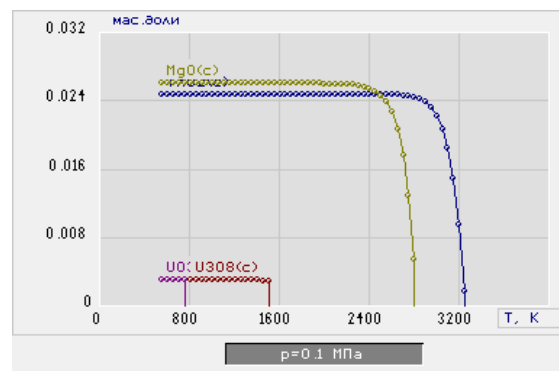


б)

Рисунок 14 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-2 на основе ацетона при массовой доле воздуха 64 % (а) и 66 % (б)

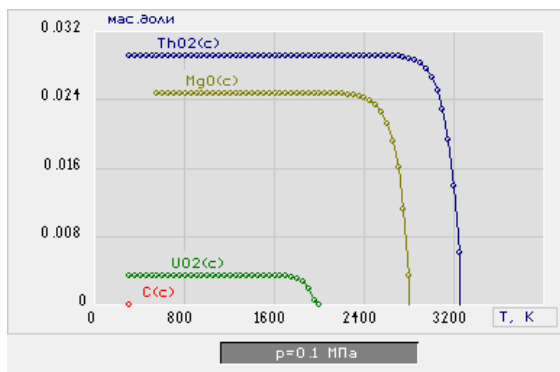


а)

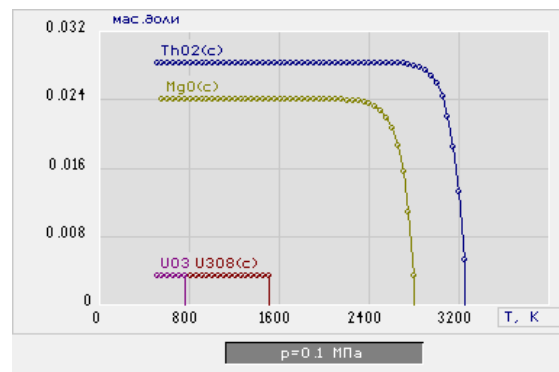


б)

Рисунок 15 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-3 на основе ацетона при массовой доле воздуха 64 % (а) и 66 % (б)

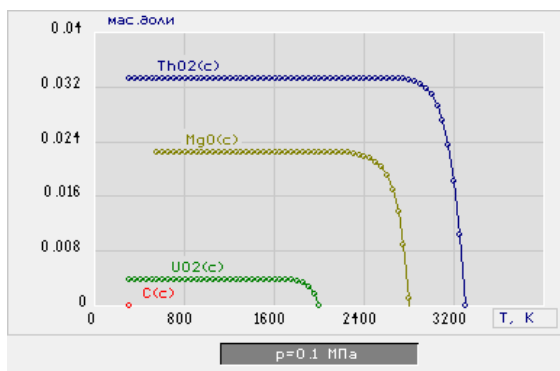


а)

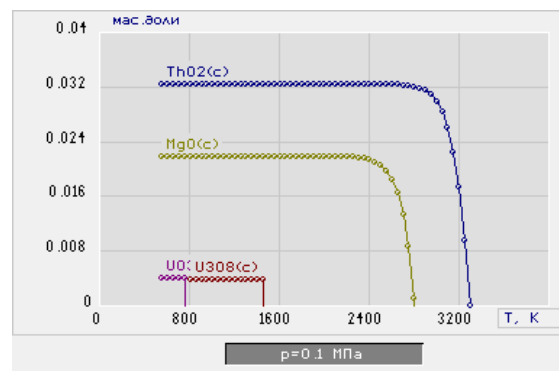


б)

Рисунок 16 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-4 на основе ацетона при массовой доле воздуха 65 % (а) и 66 % (б)

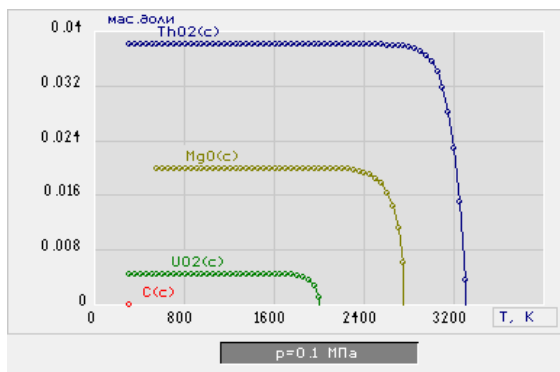


а)

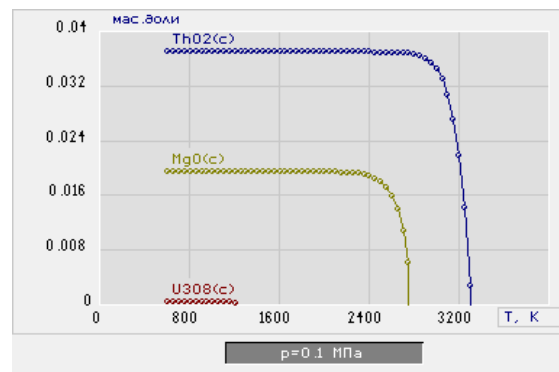


б)

Рисунок 17 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-5 на основе ацетона при массовой доле воздуха 65 % (а) и 66 % (б)

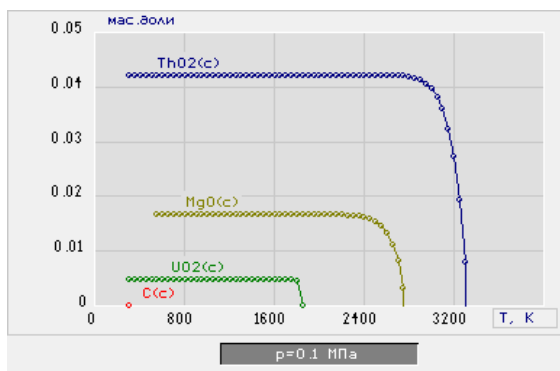


а)

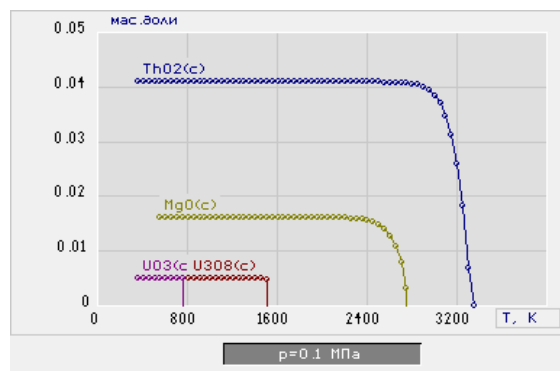


б)

Рисунок 18 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-6 на основе ацетона при массовой доле воздуха 65 % (а) и 66 % (б)

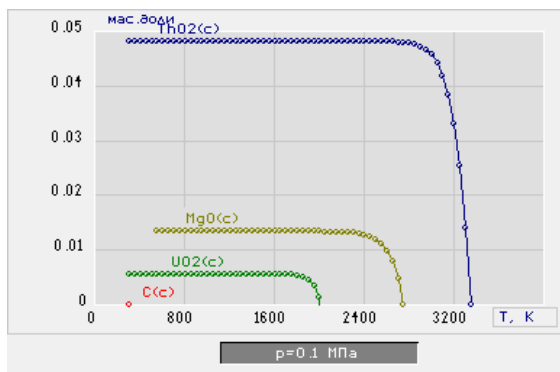


а)

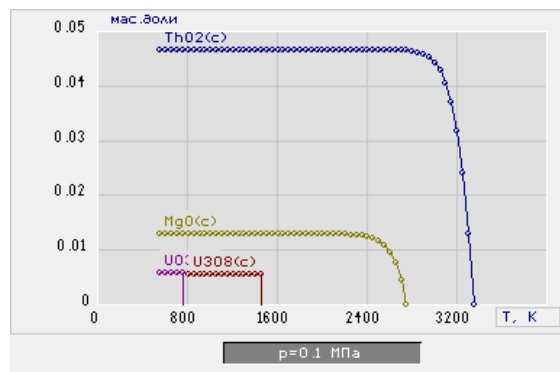


б)

Рисунок 19 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-7 на основе ацетона при массовой доле воздуха 66 % (а) и 67 % (б)

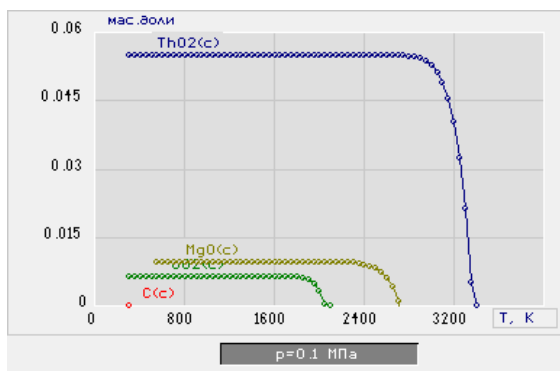


а)

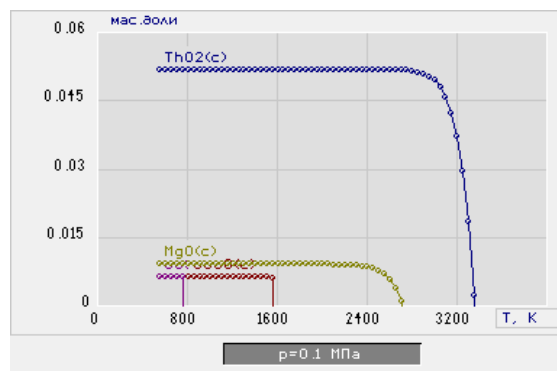


б)

Рисунок 20 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-8 на основе ацетона при массовой доле воздуха 66 % (а) и 67 % (б)

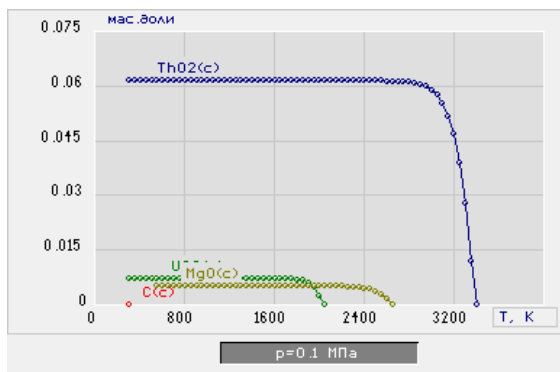


а)

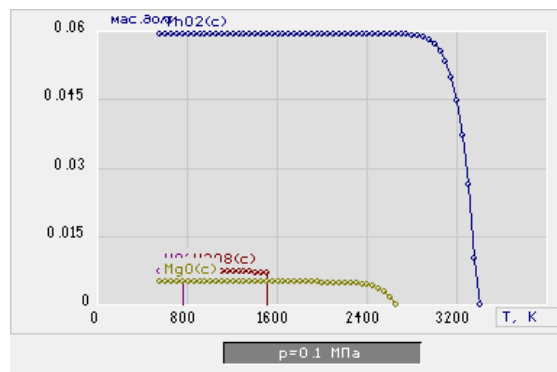


б)

Рисунок 21 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-9 на основе ацетона при массовой доле воздуха 66 % (а) и 68 % (б)



а)



б)

Рисунок 22 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-10 на основе ацетона при массовой доле воздуха 67 % (а) и 68 % (б)

Из анализа равновесных составов продуктов плазменной переработки растворов ВОНР на основе ацетона (рисунок 13-22) следует, что при массовой доле воздуха 64% (рисунки 13-15), 65% (рисунки 16-18), 66% (рисунки 19-21), и 67% (рисунок 22) основными продуктами в конденсированных фазах являются оксиды $\text{ThO}_2(\text{с})$, $\text{UO}_2(\text{с})$ и $\text{MgO}(\text{с})$, которые образуют требуемые оксидные композиции ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОК-4, ОК-5 и ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9, ОК-10. При этом также образуется незначительное количество углерода

$C(s)$, содержание которого резко возрастает при снижении массовой доли воздуха. Повышение массовой доли воздуха нецелесообразно, так как приводит к исчезновению целевого $UO_2(s)$ и появлению $UO_3(s)$ и $U_3O_8(s)$.

Далее были проведены расчеты энергозатрат на процесс плазмохимического синтеза в воздушной плазме 1 кг целевых продуктов в виде оксидных композиций ОК-1, ОК-2, ОК-3 и ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9, ОК-10. Результаты расчетов представлены в таблицах 4 – 13 и на рисунке 23.

Таблица 4. Результаты расчетов энергозатрат на получение из ВОНР-1 композиции ОК-1 «50 % (5 % UO_2 +45 % ThO_2)-50 % MgO »

Т, К	I_t , кДж/кг	I_{t-300} , кДж/кг	$Z_{ОК-1}$, масс. доли	$\Xi_{уд}$, МДж/кг
300	-5370	0	0,08691	0
500	-5130	240	0,08691	2,76
1000	-4380	990	0,05301	18,68
1500	-3650	1720	0,05301	32,45
2000	-2840	2530	0,05071	49,89
2500	-1510	3860	0,04921	78,44
3000	1609	6979	0,01715	406,94

Таблица 5. Результаты расчетов энергозатрат на получение из ВОНР-2 композиции ОК-2 «55 % (5,5 % UO_2 +49,5 % ThO_2)-45 % MgO »

Т, К	I_t , кДж/кг	I_{t-300} , кДж/кг	$Z_{ОК-2}$, масс. доли	$\Xi_{уд}$, МДж/кг
300	-5340	0	0,08687	0
500	-5100	240	0,08687	2,76
1000	-4360	980	0,05478	17,89
1500	-3260	2080	0,05478	37,97
2000	-2820	2520	0,05213	48,34
2500	-1500	3840	0,05062	75,86
3000	1585,9	6925,9	0,02023	342,36

Таблица 6. Результаты расчетов энергозатрат на получение из ВОНР-3 композиции ОК-3 «60 % (6 % UO_2 +54 % ThO_2)-40 % MgO »

T, K	I_t , кДж/кг	I_{t-300} , кДж/кг	$Z_{\text{ОК-3}}$, масс. доли	$\mathcal{E}_{\text{уд}}$, МДж/кг
300	-5310	0	0,08682	0
500	-5070	240	0,08682	2,76
1000	-4330	980	0,05675	17,27
1500	-3590	1720	0,05675	30,31
2000	-2790	2520	0,0537	46,93
2500	-1480	3830	0,05219	73,39
3000	1560,3	6870,3	0,02366	290,38

Таблица 7. Результаты расчетов энергозатрат на получение из ВОНР-4 композиции ОК-4 «65 % (6,5 % UO_2 +58,5 % ThO_2)-35 % MgO »

T, K	I_t , кДж/кг	I_{t-300} , кДж/кг	$Z_{\text{ОК-4}}$, масс. доли	$\mathcal{E}_{\text{уд}}$, МДж/кг
300	-5210	0	0,08436	0
500	-4970	240	0,08436	2,84
1000	-4260	950	0,05731	16,58
1500	-3530	1680	0,05731	29,31
2000	-2720	2490	0,05391	46,19
2500	-1390	3820	0,05246	72,82
3000	1584,3	6794,3	0,02666	254,85

Таблица 8. Результаты расчетов энергозатрат на получение из ВОНР-5 композиции ОК-5 «70 % (7 % UO_2 +63 % ThO_2)-30 % MgO »

T, K	I_t , кДж/кг	I_{t-300} , кДж/кг	$Z_{\text{ОК-5}}$, масс. доли	$\mathcal{E}_{\text{уд}}$, МДж/кг
300	-5170	0	0,0843	0
500	-4930	240	0,0843	2,85
1000	-4220	950	0,0597	15,91
1500	-3490	1680	0,0597	28,14
2000	-2690	2480	0,05583	44,42
2500	-1380	3790	0,05436	69,72
3000	1553	6723	0,03082	218,14

Таблица 9. Результаты расчетов энергозатрат на получение из ВОНР-6 композиции ОК-6 «75 % (7,5 % UO_2 +67,5 % ThO_2)-25 % MgO »

T, K	I_t , кДж/кг	I_{t-300} , кДж/кг	$Z_{\text{ОК-6}}$, масс. доли	$\mathcal{E}_{\text{уд}}$, МДж/кг
300	-5120	0	0,08423	0
500	-4890	230	0,08423	2,73
1000	-4170	950	0,0624	15,22
1500	-3450	1670	0,0624	26,76
2000	-2660	2460	0,05895	41,73
2500	-1360	3760	0,05651	66,54
3000	1517,8	6637,8	0,03553	186,82

Таблица 10. Результаты расчетов энергозатрат на получение из ВОНР-7 композиции ОК-7 «80 % (8 % UO_2 +72 % ThO_2)-20 % MgO »

T, K	I_t , кДж/кг	I_{t-300} , кДж/кг	$Z_{\text{ОК-7}}$, масс. доли	$\mathcal{E}_{\text{уд}}$, МДж/кг
300	-5010	0	0,0819	0
500	-4780	230	0,0819	2,81
1000	-4100	910	0,06367	14,29
1500	-3380	1630	0,06367	25,6
2000	-2570	2440	0,05879	41,5
2500	-1260	3750	0,05736	65,38
3000	1533,2	6543,2	0,03965	165,02

Таблица 11. Результаты расчетов энергозатрат на получение из ВОНР-8 композиции ОК-8 «85 % (8,5 % UO_2 +76,5 % ThO_2)-15 % MgO »

T, K	I_t , кДж/кг	I_{t-300} , кДж/кг	$Z_{\text{ОК-8}}$, масс. доли	$\mathcal{E}_{\text{уд}}$, МДж/кг
300	-4950	0	0,08167	0
500	-4720	230	0,08167	2,82
1000	-4040	910	0,06705	13,57
1500	-3330	1620	0,06705	24,16
2000	-2540	2410	0,0627	38,44
2500	-1250	3700	0,06002	61,65
3000	1487,9	6437,9	0,04564	141,06

Таблица 12. Результаты расчетов энергозатрат на получение из ВОНР-9 композиции ОК-9 «90 % (9 % UO_2 +81 % ThO_2)-10 % MgO »

T, K	I_t , кДж/кг	I_{t-300} , кДж/кг	$Z_{\text{ОК-9}}$, масс. доли	$\mathcal{E}_{\text{уд}}$, МДж/кг
300	-4890	0	0,08157	0
500	-4650	240	0,08157	2,94
1000	-3980	910	0,07104	12,81
1500	-3270	1620	0,07104	22,8
2000	-2490	2400	0,06798	35,3
2500	-1220	3670	0,0632	58,07
3000	1436,2	6326,2	0,05259	120,29

Таблица 13. Результаты расчетов энергозатрат на получение из ВОНР-10 композиции ОК-10 «95 % (9,5 % UO_2 +85,5 % ThO_2)-5 % MgO »

T, K	I_t , кДж/кг	I_{t-300} , кДж/кг	$Z_{\text{ОК-10}}$, масс. доли	$\mathcal{E}_{\text{уд}}$, МДж/кг
300	-4750	0	0,07907	0
500	-4520	230	0,07907	2,91
1000	-3880	870	0,0735	11,84
1500	-3180	1570	0,0735	21,36
2000	-2390	2360	0,0688	34,3
2500	-1120	3630	0,06498	55,86
3000	1434,2	6184,2	0,05891	104,98

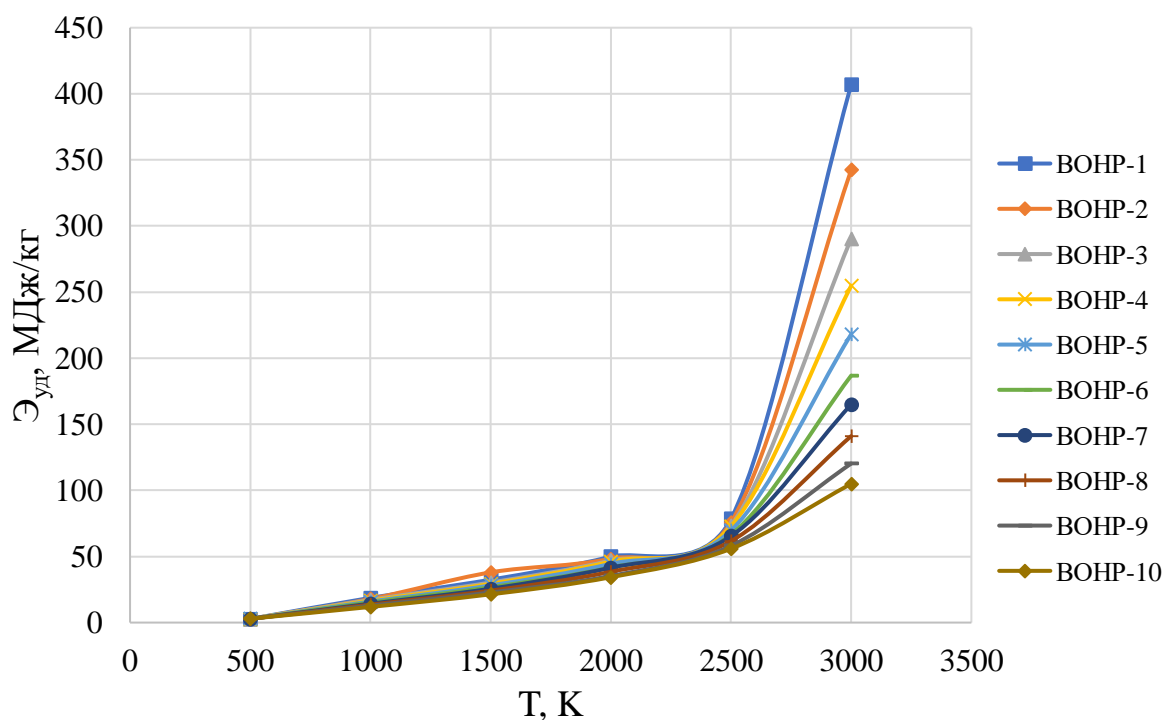


Рисунок 23 – Удельные энергозатраты на процесс плазмохимического синтеза оксидных композиций из растворов ВОНР на основе ацетона

Из анализа полученных данных определены условия, обеспечивающие при плазменной переработке растворов ВОНР максимальный выход целевых продуктов при минимальных энергозатратах. Показано, что максимальный выход целевого продукта достигается при ≈ 1500 К при плазмохимическом синтезе композиции ОК-10 «95 % (9,5 % UO_2 +85,5 % ThO_2)-5 % MgO ».

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Описание плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона

Экспериментальные исследования процесса плазмохимического синтеза порошков оксидных композиций из диспергированных растворов ВОНР осуществлялись с использованием плазменного стенда, представленного на рисунке Б1 (Приложение Б).

Высокочастотный ток от генератора ВЧГ через коаксиальный вывод 6 подается на водоохлаждаемый медный электрод 4 ВЧФ-плазмотрона 3, с которого возбуждается ВЧФ-разряд 2 внутри разрядной камеры из кварцевого стекла ($d=50$ мм, $l=860$ мм). ВЧФ-плазмотрон 3 генерирует плазменную струю со среднемассовой температурой до 4000 К. Высоконапорный вытяжной вентилятор 9 производит прокачку воздуха через ВЧФ-плазмотрон 3, импеллер реактора 7, узел мокрой очистки отходящих газов 8 и через воздуховод 10 выбрасывает их в атмосферу. На входе в ВЧФ-плазмотрон 3 располагается импеллер, который имеет пропускную площадь $S_{\text{ш}}=25$ см². Конструкционно импеллер плазмотрона необходим для закрутки входного воздушного потока, который прокачивается через разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона. Над импеллером реактора 7 находится шибер, позволяющий контролировать расход прокачиваемого воздуха через реактор. Входная площадь шибера $S_{\text{шиб}}$ регулируется в интервале 0-1650 см².

Для контроля содержания вредных газообразных веществ (СО, NO, NO₂, SO₂ и др.) в отходящих газах в газоходе размещен газоанализатор 11 с пробоотборником 12.

Для измерения напора воздушного потока и последующего определения скоростей (расходов) воздуха через разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона, импеллер реактора и газоход использовалась трубка Пито.

Измерение температуры горения диспергированных ВОНР в реакторе осуществлялось высокоточным цифровым пирометром IPE-140/45 бесконтактным способом по линии поглощения образующегося СО₂.

3.2 Определение расходов воздушного теплоносителя через ВЧФ-плазмотрон и газоход

Величина расхода воздушного плазменного теплоносителя через кварцевую разрядную камеру плазмотрона, а также через газоход вычислялись при помощи трубки Пито.

Трубка Пито измеряет напор входящего потока по следующему выражению:

$$f = \frac{(\rho V^2)}{2} = P_{\Pi} - P_{CT} \quad (3)$$

где P_{Π} – полное давление, Па;

P_{CT} – статическое давление, Па;

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

$f = \frac{(\rho V^2)}{2}$ – напор входящего потока.

Сделав необходимые математические преобразования, можно выразить скорость входящего потока V :

$$V = \left[\frac{2 \cdot (P_{\Pi} - P_{CT})}{\rho} \right]^{0,5} \quad (4)$$

Величина объёмного расхода воздуха через воздуховод определяется выражением:

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

где S – площадь поперечного сечения воздуховода.

Результаты экспериментальных исследований с расчетом указанных выше параметров представлены в таблицах Г1 и Г2 приложения Г. Полученные данные были обработаны и построены графики зависимостей входной площади импеллера реактора на напор, создаваемый набегающим потоком воздушного теплоносителя в газоход и ВЧФ-плазмотроне.

Влияние входной площади импеллера на напор входящего потока воздушного теплоносителя через газоход и ВЧФ-плазмотрон представлено на рисунках 24, 25.

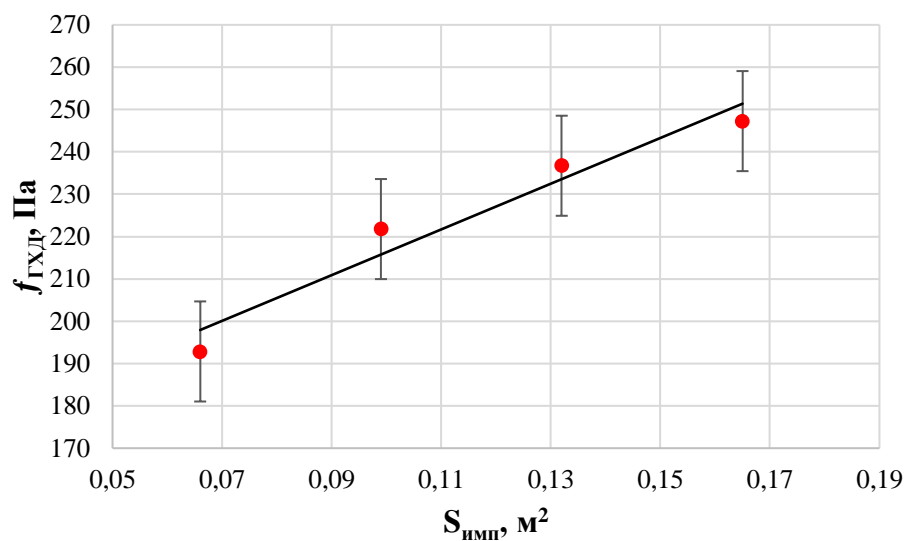


Рисунок 24 – Влияние входной площади импеллера реактора на напор, создаваемый набегающим потоком воздушного теплоносителя в газоходе

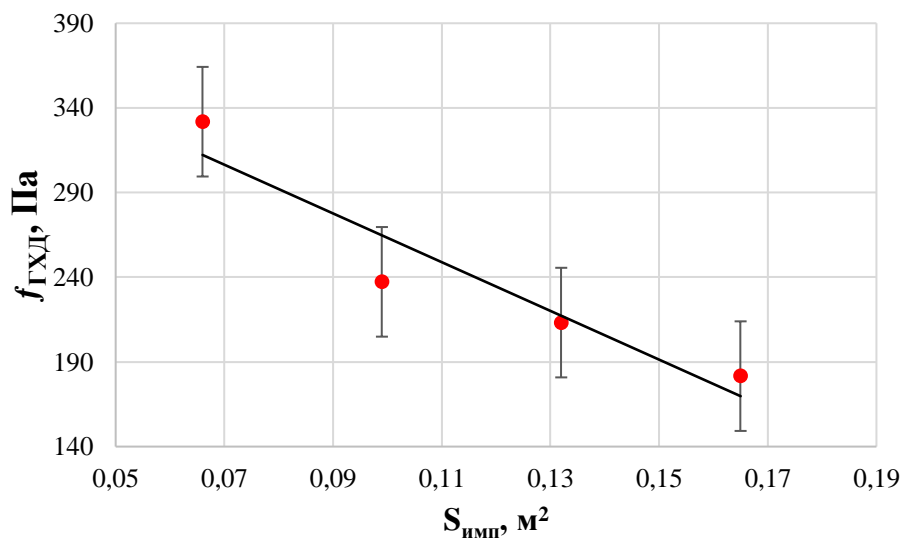


Рисунок 25 – Влияние входной площади импеллера реактора на напор, создаваемый набегающим потоком воздушного теплоносителя в разрядной камере ВЧФ-плазмотрона

Также построены графики зависимостей расхода плазменного теплоносителя через плазмотрон ($Q_{ПТ}$), и газоход ($Q_{ГХД}$) от входной площади импеллера реактора. Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздуха через газоход и ВЧФ-плазмотрон представлено на рисунках 26 и 27.

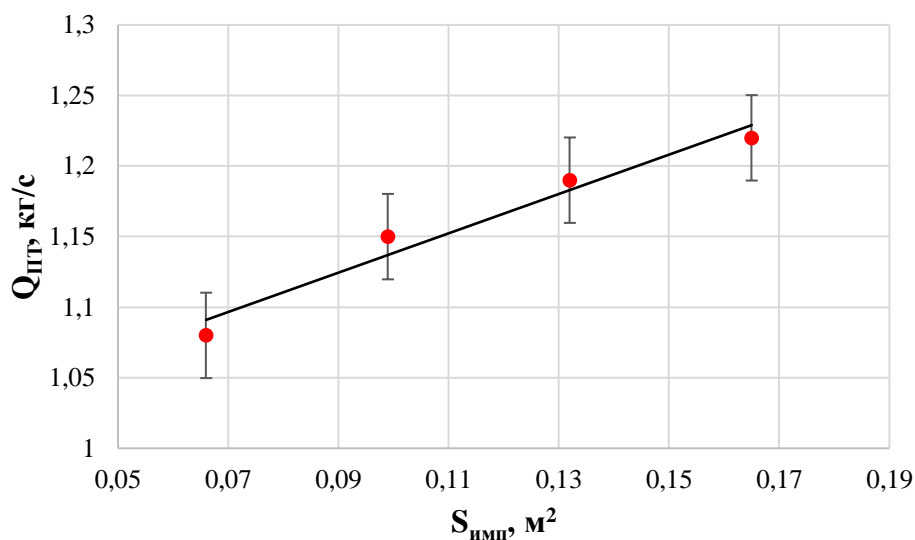


Рисунок 26 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход плазмообразующего газа через газоход

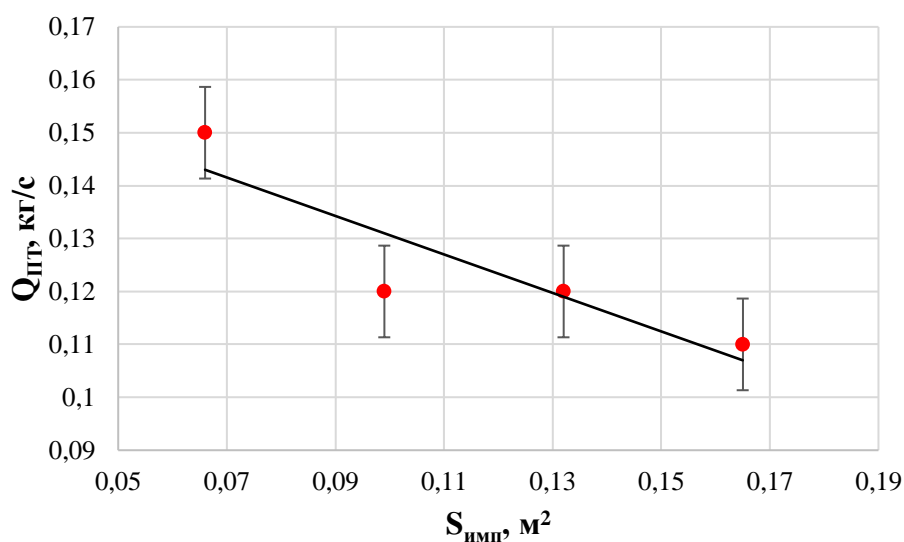


Рисунок 27 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон

3.3 Расчет расхода газа через реактор

Для расчета расхода плазмообразующего газа через реактор использовалось следующее выражение:

$$Q_P = Q_{ГХД} - Q_{ПТР} \quad (6)$$

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

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

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

На основе расчетов (таблица Д1, приложение Д) построен график зависимости расходов плазмообразующего газа через реактор в зависимости от входной площади импеллера реактора (Рисунок 28).

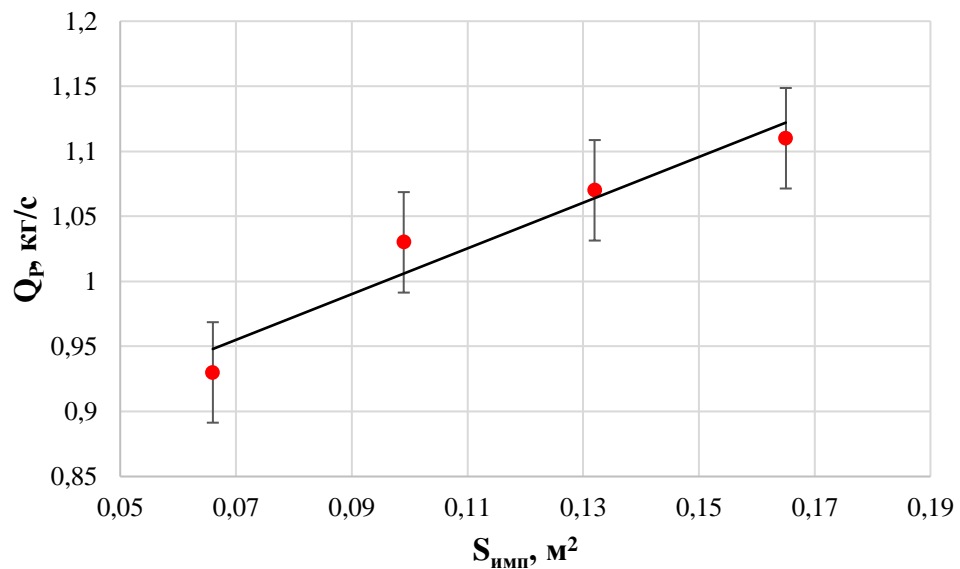


Рисунок 28 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздушного теплоносителя через реактор

Плавная регулировка расхода плазменного теплоносителя через реактор и плазмотрон осуществляется изменением входной площади импеллера с помощью шиберов.

3.4 Плазмохимическая переработка модельных растворов

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

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

Вначале готовился с использованием дистиллированной воды (1 л) водный нитратный раствор (ВНР) из нитратных солей металлов и смешивался с органическим компонентом (3 л) с получением раствора ВОНР. Предварительно подготовленные растворы ВОНР подавались с постоянным расходом (300 л/ч) на диспергатор 1 (рисунок Б1) и далее в диспергированном виде поступали в реактор, где в процессе переработки в воздушно-плазменном потоке осуществлялся плазмохимический синтез простых и сложных ОК при температуре $T_p \geq 1000^\circ\text{C}$. Контроль температуры T_p осуществлялся высокоточным цифровым инфракрасным пирометром 14 (ИРЕ 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 прокаливали в течение 20 минут при температуре 120-150 °С. В таблице Е1 (Приложение Е) приведены составы и режимы переработки растворов ВОНР, физико-химические и технологические свойства полученных простых и сложных оксидных композиций, моделирующих в воздушно-плазменном потоке плазмохимический синтез ОК для уран-ториевого дисперсионного ядерного топлива.

3.5 Анализ полученных результатов

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

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

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

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

На рисунке 29 представлена характерная гистограмма распределения по размерам частиц водной суспензии ОК-8 (метод ЛД), полученной при переработке раствора ВОНР-8.

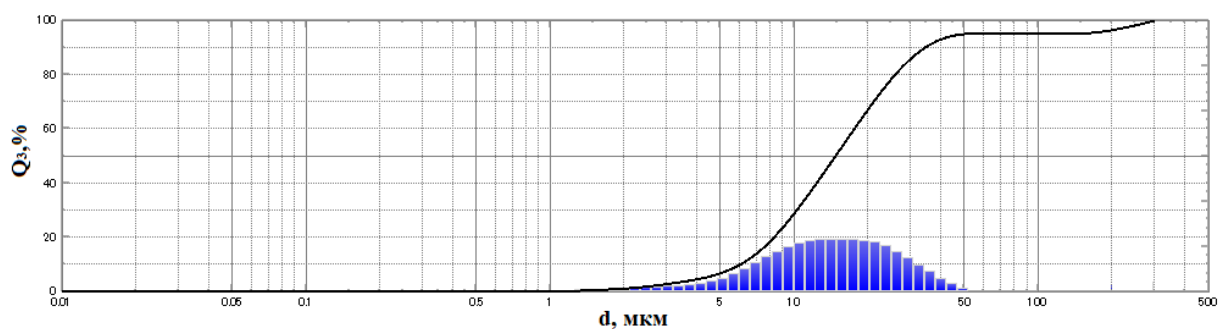


Рисунок 29 – Характерная гистограмма распределения по размерам частиц (агломератов) порошка ОК-8

Частицы водной суспензии ОК-8 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 порошка ОК-8 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.

Характерное СЭМ-изображение синтезированного порошка ОК-8 представлено на рисунке 30.

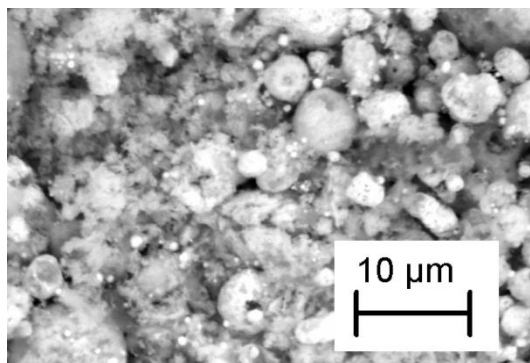


Рисунок 30 – Характерное СЭМ-изображение морфологической структуры частиц порошка ОК-8

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

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

Свойства прессуемости, найденные по результатам прессования порошка ОК-8, 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°C .

Характерная микрофотография спеченной керамики из порошка ОК-8 приведена на рисунке 31.

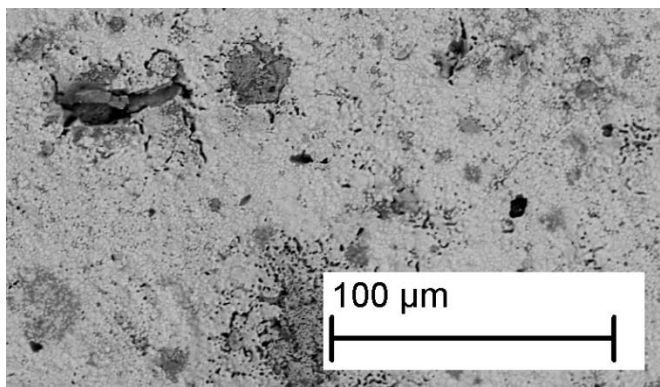


Рисунок 31 – Характерная микрофотография спеченной керамики из порошка ОК-8

На рисунках 32-34 показано влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц ОК в водных суспензиях (метод ЛД), удельной поверхности и размера кристаллитов в составе полученных порошков ОК (БЭТ-анализ).

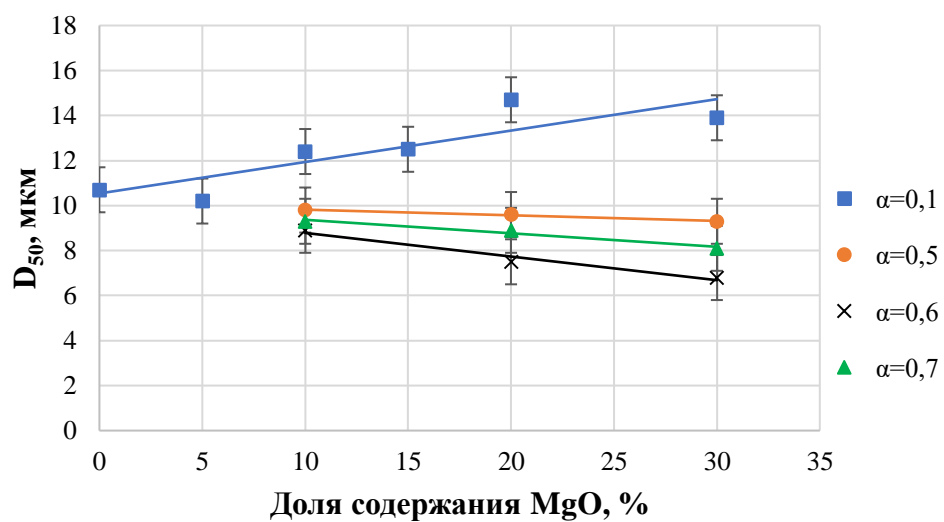


Рисунок 32 – Влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц в полученных водных суспензиях ОК (метод ЛД) при $\alpha=0,1$; 0,5; 0,6 и 0,7

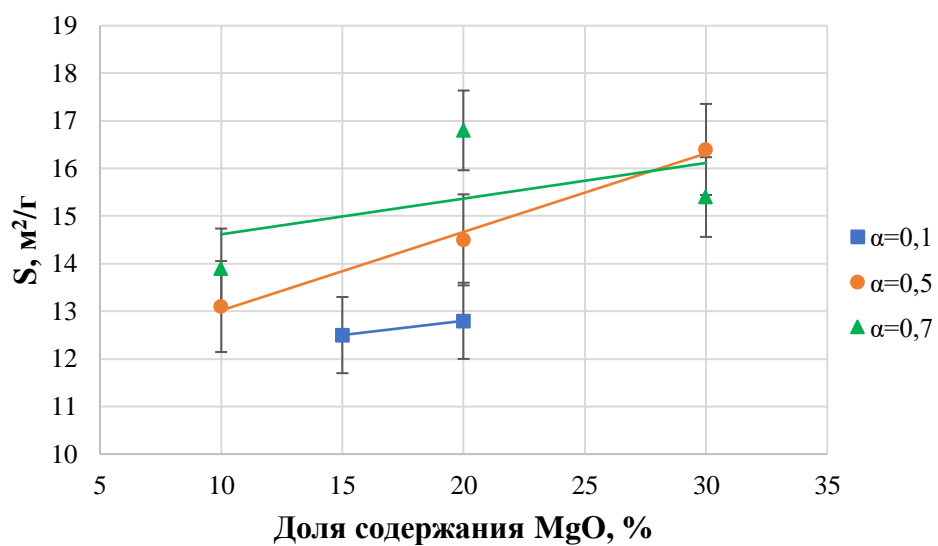


Рисунок 33 – Влияние содержания матрицы (MgO) на удельную поверхность ОК в составе порошков ОК (БЭТ-анализ) при $\alpha=0,1$; 0,5 и 0,7

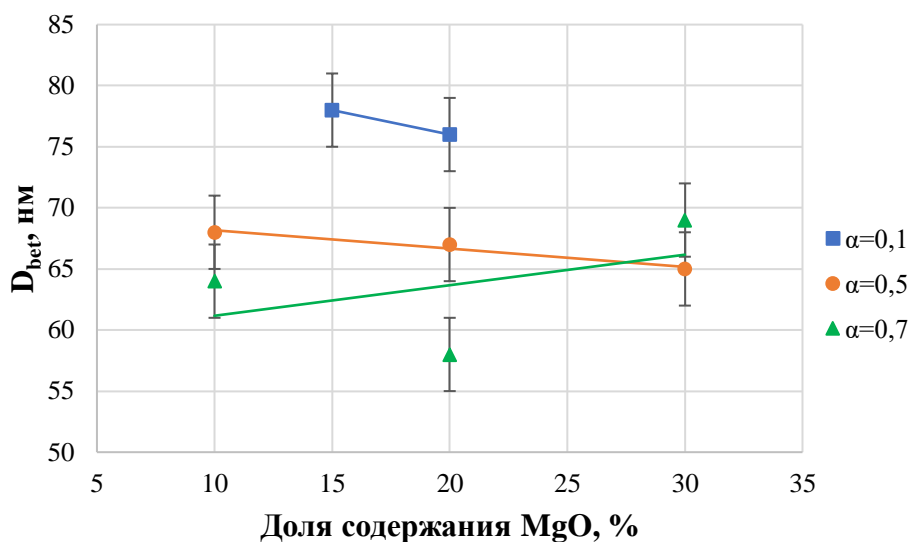


Рисунок 34 – Влияние содержания матрицы (MgO) на размер кристаллитов в составе полученных порошков ОК (БЭТ-анализ) при $\alpha=0,1$; 0,5 и 0,7

Из анализа результатов, представленных на рисунках 32-34 и таблице Д1, (приложение Д) следует:

- увеличение исходной концентрации солей металлов ($\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) с 300 г/л до 1000 г/л в растворах ВОНР-1,2,3 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 «Nd₂O₃–Ce₂O₃–MgO» (при $\alpha=0,1$), приводит при постоянном расходе воды на закалку ОК (2,8 кг/с) и частоте диспергатора (35 Гц) к увеличению размера образующихся частиц ОК с 10,7 мкм до 13,9 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК увеличивается с 12,5 м²/г до 12,8 м²/г, а размер кристаллитов в частицах ОК снижается с 78 нм до 76 нм (БЭТ-анализ).

- увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК (при $\alpha=0,5$), приводит при увеличении частоты 50 Гц диспергатора к снижению размера образующихся частиц ОК с 9,8 мкм до 9,3 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК увеличивается с 13,1 м²/г до 16,4 м²/г,

а размер кристаллитов в частицах ОК снижается с 68 нм до 65 нм (БЭТ-анализ).

- увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК (при $\alpha=0,6$), также приводит при частоте 50 Гц диспергатора к снижению размера образующихся частиц с 8,9 до 6,8 мкм (метод ЛД).

- увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК (при $\alpha=0,7$), также приводит при частоте 50 Гц диспергатора к снижению размера образующихся частиц ОК с 9,3 мкм до 8,1 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК увеличивается с 13,9 м²/г до 15,4 м²/г, размер кристаллитов в частицах ОК увеличивается с 64 нм до 69 нм (БЭТ-анализ).

Из сравнительного анализа данных по физико-химическим свойствам (рисунки 32-34, таблица Е1) полученных наноразмерных порошков ОК-4,5,6,7,8,9 (при $\alpha=0,1$), ОК-10,11,12 (при $\alpha=0,5$), ОК-16,17,18 (при $\alpha=0,7$) можно предположить, что и порошки ОК-13,14,15 (при $\alpha=0,6$) полученные при воздушно-плазменной переработке растворов ВОНР-13,14,15 также будут наноразмерными.

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

4.1 Введение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- расчет бюджета научно-технического исследования;
- определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель работы – расчет и оптимизация процесса прямого синтеза в

воздушной плазме топливных оксидных композиций «UO₂–ThO₂–MgO» для уран-ториевого дисперсионного ядерного топлива из водно-органических нитратных растворов, включающих водные нитратные растворы делящихся металлов (уран, торий) и металл матрицы (магний), а также органический компонент.

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

4.2.1 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 научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценивать сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Основными конкурентами плазмохимического синтеза оксидных композиций является микроволновая технология и микроволновая плазменная технология.

Нитратные растворы урана, плутония и тория эффективно поглощают микроволновое излучение; при этом быстро испаряется вода, нагревается и разлагается солевой остаток (гидраты нитратных солей) и получаются оксиды или оксидные композиции.

К преимуществам плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов следует отнести: одностадийность, низкие удельные энергозатраты, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц.

Оценочная карта анализа представлена в таблице 14. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее

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

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

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Таблица 14 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
2.Энергоэкономичность	0,9	5	3	3	0,9	0,54	0,54
3.Надежность	0,18	5	4	3	0,25	0,2	0,15
4.Простота эксплуатации	0,1	4	3	3	0,5	0,3	0,3
Экономические критерии оценки эффективности							
1.Конкурентоспособность продукта	0,07	4	4	3	0,35	0,28	0,21
2.Уровень проникновения на рынок	0,07	4	5	5	0,28	0,35	0,35
3.Цена	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
4.Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	5	5	0,4	0,4	0,4
5.Послепродажное обслуживание	0,06	4	3	2	0,3	0,18	0,12
6.Финансирование научной разработки	0,03	4	5	4	0,12	0,15	0,12
7.Срок выхода на рынок	0,04	5	4	4	0,2	1,16	0,16
8.Наличие сертификации разработки	0,06	4	5	4	0,24	0,3	0,24
Итого	1	59	52	46	4,84	3,81	3,44

Проведённый анализ конкурентных технических решений показал, что плазмохимический метод является наиболее экономически выгодным и эффективным методом синтеза оксидных композиций.

4.2.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Результатом является итоговая матрица, в которой описываются сильные и слабые стороны научного исследования, а также возможности и угрозы, которые могут повлиять на осуществление проекта.

Итоговая матрица SWOT-анализа представлена в таблице 15.

Таблица 15 – Итоговая матрица SWOT – анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1.Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии; С2.Квалифицированный персонал; С3.Маленький срок получения результатов при проведении научного исследования.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1.Длительный период при некоторых видах исследований; Сл2.Недостаток финансовых средств; Сл3.Отсутствие необходимого оборудования для проведения исследований; Сл4.У руководства НИР проблемы с материально-техническим обеспечением.
Возможности: В1.Появление дополнительного спроса на новый продукт; В2.Повышение стоимости конкурентных разработок; В3.Использование научно-исследовательских достижений ТПУ.	При использовании научно-исследовательских достижений ТПУ можно снизить стоимость производимой продукции и тем самым заявить об экономичности технологии.	Научно-исследовательские достижения ТПУ могут быть использованы при отсутствии необходимого оборудования и недостатке финансирования.

Продолжение таблицы 15

Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства; У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства	Заявленная экономичность и энергоэффективность может быть не оправдана при отсутствии спроса на новые технологии и несвоевременном финансировании научного исследования.	Отсутствие необходимого оборудования и длительность периода исследований может привести к отсутствию спроса на новые технологии.
--	--	--

4.3 Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 16.

Таблица 16 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Анализ исходных данных	Инженер
	4	Выбор направления исследований	Инженер
			Руководитель
	5	Календарное планирование работ по теме	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Разработка лабораторного макета	Инженер
	7	Экспериментальное исследование	Инженер
			Руководитель
Обобщение и оценка результатов	8	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер
	9	Анализ и обработка полученных результатов	Инженер
	10	Оформление пояснительной записки к ВКР	Инженер
	11	Подготовка к защите ВКР	Инженер

4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

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

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения

ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

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

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

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

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

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (3)$$

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

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

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

По всем выполняемым работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 17.

4.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ.

Диаграмма Ганта представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.

Для построения графика Ганта, следует, длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой, для каждого исполнителя расчеты производятся индивидуально:

$$T_{ki.рук} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где $k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал.рук} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

$$k_{кал.инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

где $T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году; $T_{кал}$ – общее количество выходных дней в году; $T_{пр}$ – общее количество праздничных дней в году.

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Составление и утверждение технического задания»:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} = \frac{3 \cdot 3 + 2 \cdot 5}{5} = 3,8 \text{ чел.-дн.},$$

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{q_i} = \frac{3,8}{1} = 3,8 \text{ раб.дн.}.$$

Расчет календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$k_{кал.инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48.$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Выбор направления исследований»:

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал} = 2,4 \cdot 1,48 = 3,55 \approx 4 \text{ кал.дн.}$$

Расчет календарного коэффициента для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$k_{кал.рук} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 66 - 14} = 1,28.$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Выбор направления исследований»:

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал} = 2,1 \cdot 1,28 = 2,69 \approx 3 \text{ кал.дн.}$$

Все полученные значения в календарных днях округляются до целого числа, а затем сводятся в таблицу 17.

Таблица 17 – Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительно сть работ в рабочих днях T_{pi}		Длительно сть работ в календарн ых днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожi}$, чел-дни					
	Руководи тель	Инженер	Руководи тель	Инженер	Руководи тель	Инженер	Руководи тель	Инженер	Руководи тель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	3	-	5	-	3,8	-	3,8	-	5	-
Подбор и изучение материалов по теме	-	10	-	15	-	12	-	12	-	14
Анализ исходных данных	-	5	-	7	-	5,8	-	5,8	-	7
Выбор направления исследования	3	4	6	6	4,2	4,8	2,1	2,4	3	4
Календарное планирование работ по теме	2	-	3	-	2,4	-	2,4	-	4	-
Расчёт показателей необходимых для проведения эксперимента		2		4		2,8		2,8		5

Продолжение таблицы 17

Разработка стенда в соответствии с выбранным исполнением и экспериментальное исследование	-	10	-	15	-	12	-	12	-	14
Оценка эффективности полученных результатов	2	4	4	6	2,8	4,8	1,4	2,4	2	4
Анализ и обработка полученных результатов	2	3	4	5	2,8	3,8	1,4	1,9	2	3
Технико-экономические расчеты	-	2	-	3	-	2,4	-	2,4	-	4
Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	-	6	-	10	-	7,6	-	7,6	-	12

После произведенных расчетов, представленных в таблице 17, строится диаграмма Ганта, представленная на рисунке В1 (Приложение В).

Таблица 18 – Сводная таблица по календарным дням

	Количество дней
Общее количество календарных дней для выполнения работы	76
Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер	67
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	16

В результате выполнения данного подраздела разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из участников проекта.

4.4 Бюджет научного исследования

4.4.1 Расчет материальных затрат научного исследования

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

- приобретаемые со стороны сырье и материалы, необходимые для создания научно-технической продукции;
- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса и для упаковки продукции или расходуемых на другие производственные и хозяйственные нужды (проведение испытаний, контроль, содержание, ремонт и эксплуатация оборудования, зданий, сооружений, других основных средств и прочее), а также запасные части для ремонта оборудования, износа инструментов, приспособлений, инвентаря, приборов, лабораторного оборудования и других средств труда, не относимых к основным средствам, износ спецодежды и других малоценных и быстроизнашивающихся предметов;
- покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;
- сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований (испытаний) и для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделий – объектов испытаний (исследований).

В материальные затраты, помимо вышеуказанных, включаются дополнительно затраты на канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.п. Однако их учет ведется в данной статье только в том случае, если в научной организации их не включают в расходы на использование оборудования или накладные расходы. В первом случае на них определяются соответствующие нормы расхода от установленной базы. Во втором случае их величина учитывается как некая доля в коэффициенте накладных расходов.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_{\text{м}} = (1 + k_{\text{т}}) \cdot \sum_{i=1}^m \text{Ц}_i \cdot N_{\text{расх}i} = (1 + 0,3) \cdot 1620 = 2106 \text{ руб.}$$

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

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

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

$k_{\text{т}}$ – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы (в данной работе принимается равным 30%).

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на приобретение материалов необходимых для проведения исследования. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Материальные затраты

Наименование	Цена за ед., руб.	Количество, ед.	Суммарная стоимость, руб.
Ацетон	70	10	700
Этанол	460	2	920
Всего за материалы, руб.			1620
Транспортно-заготовительные расходы, руб.			486
Итого по статье, руб.			2106

4.4.2 Расчет амортизация оборудования

Расчёт амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов.

Для практических измерений использовался поршневой компрессор марки Remeza.

Таблица 20 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Компрессор	1	5	40	40
Итого		40 тыс. руб.			

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации определяется по следующей формуле:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где n – срок полезного использования в годах.

Амортизация определяется по следующей формуле:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m,$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.;

m – время использования, мес.

Рассчитаем норму амортизации для компрессора, с учётом того, что срок полезного использования составляет 5 лет:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{5} = 0,2.$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m = \frac{0,2 \cdot 40000}{12} \cdot 1 = 667 \text{ руб.}$$

4.4.3 Основная заработная плата исполнителей научного исследования

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого, необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой

оклада.

Основная заработная плата $Z_{\text{осн}}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}},$$

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

$T_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{51285 \cdot 9}{237} = 1947,5 \text{ руб.},$$

где $Z_{\text{м}}$ – должностной оклад работника за месяц;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

- при отпуске в 28 раб. дня – $M=11$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;

- при отпуске в 56 раб. дней – $M=10$ месяца, 6-дневная рабочая неделя;

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{33150 \cdot 11}{207} = 1761,6 \text{ руб.}$$

Должностной оклад работника за месяц:

Для руководителя:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_{\text{р}} = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_{\text{р}} = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.},$$

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

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, принимается равным 0,3;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок, принимается равным 0,2;

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

Таблица 21 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	52/14	104/14
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	56/6	28/12
Действительный годовой фонд рабочего времени	237	207

Таблица 22 – Расчет основной заработной платы

Исполнители НИП	$З_{\text{тс}}$, руб	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$З_{\text{м}}$, руб	$З_{\text{дн}}$, руб	$T_{\text{р}}$, раб.дн.	$З_{\text{осн}}$, руб
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	1947,5	16	31160
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1761,6	67	118027,2
Итого:								149187,2

4.4.4 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

Для руководителя:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 31160 = 4674 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 118027,2 = 17704,08 \text{ руб.},$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии

проектирования принимается равным 0,15).

4.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

Для руководителя:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (31160 + 4674) = 10750,2 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (118027,2 + 17704,08) = 40719,38 \text{ руб.},$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование).

Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ):

- 22 % – на пенсионное страхование;
- 5,1 % – на медицинское страхование;
- 2,9 % – на социальное страхование.

4.4.6 Накладные расходы

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

Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{накл} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{нр} = 244430,3 \cdot 0,2 \approx 45161,58 \text{ руб.}$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы (принимается равным 0,2).

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИП по форме, приведенной в таблице 23.

Таблица 23 – Группировка затрат по статьям

Статьи							
Материальные затраты	Амортизация	Основная зароботная плата	Дополнительная зароботная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
2106	667	149187,2	22378,1	51469,6	225807,9	45161,58	270969,5

4.5 Определение финансовой, бюджетной и экономической эффективности исследования

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

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги:

1. Микроволновая установка.
2. Микроволновая плазменная установка.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{270969,5}{345000} = 0,785$$

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

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

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

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{270969,5}{345000} = 0,785;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{293000}{345000} = 0,85;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{345000}{345000} = 1;$$

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

Далее необходимо произвести оценку ресурсоэффективности проекта, определяемую посредством расчета интегрального критерия, по следующей формуле:

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

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент проекта;

b_i – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 24.

Таблица 24 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка проекта	Бальная оценка микроволновой установки	Бальная оценка микроволновой плазменной установки
Количество потребляемой электроэнергии	0,22	4	4	5
Количество получаемого продукта	0,24	5	4	2
Возможность оптимизации процесса	0,2	5	1	1
Простота эксплуатации	0,14	3	1	4
Стабильность работы	0,2	3	5	2
Итого:	1	4,1	3,18	2,74

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

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{I_{\text{р-исп.1}}}{I_{\text{финр}}} = \frac{4,1}{0,785} \approx 5,22.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.2}}}{I_{\text{исп.1}}} = \frac{3,74}{5,22} \approx 0,72.$$

Таблица 25 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,785	0,85	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,1	3,18	2,74
3	Интегральный показатель эффективности	5,22	3,74	2,74
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,72	0,52

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации устройства, как наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с остальными;
2. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы – 76 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 67 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель – 16;
3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 270969,5руб;
4. По факту оценки эффективности научного исследования, можно сделать выводы:

- Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,785, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной, по сравнению с аналогами;
- Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,1, по сравнению с 3,18 и 2,74;
- Значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 5,22, по сравнению с 3,74 и 2,74, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Магистерская диссертация посвящена процессу плазмохимического синтеза оксидных композиций водно-органических нитратных растворов. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы для создания энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза гомогенных оксидных композиций для различных типов ядерного топлива.

Работы по дипломному проекту проводились в лаборатории изотопного анализа и технологий отделения ядерно-топливного цикла. Работа велась с использованием источников питания (в т.ч. высокочастотных), электронно-вычислительной и измерительной аппаратуры.

Целью раздела «Социальная ответственность» является анализ объектов исследования на предмет выявления основных техносферных опасностей и вредных воздействий, оценка степени воздействия их на человека.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Согласно 91 статье Трудового кодекса Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю. Работодатель обязан вести учет времени, фактически отработанного каждым работником.

Рабочее место при выполнении работ в положении стоя (сидя) должно соответствовать требованиям, указанным в ГОСТе 12.2.033-78 (в ГОСТе 12.2.032- 78) «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ стоя (сидя). Общие эргономические требования».

По ГОСТ 23000-78 «Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования» пульта управления для работы в положении сидя должны иметь пространство для ног оператора с размерами не менее:

- 600 мм – по высоте;
- 400 мм – по глубине (на уровне колен);
- 600 мм – по глубине (на уровне пола);
- 500 мм – по ширине.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [28] высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680-800 мм; при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм.

Рабочий стол должен иметь 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.

Конструкция рабочего стула должна обеспечивать:

- ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;
- поверхность сиденья с закругленным передним краем;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400-550 мм и углам наклона вперед до 15° и назад до 5°;
- высоту опорной поверхности спинки 300 ± 20 мм, ширину – не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости – 400 мм;
- угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах $\pm 30^\circ$;
- регулировку расстояния спинки от переднего края сиденья в пределах 260- 400 мм;
- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной – 50-70 мм;
- регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах 230 ± 30 мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах 350-500 мм.

Рабочее место пользователя ПЭВМ следует оборудовать подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной

поверхности подставки до 20°. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

5.2 Производственная безопасность

Научно-исследовательская работа проводилась в отделении ядерно-топливного цикла. Исследования велись на ПЭВМ, а также использовался ВЧФ-плазменный стенд с использованием высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13.

В данном подразделе анализируются вредные и опасные факторы, которые могут возникать при проведении исследований в лаборатории, при разработке или эксплуатации проектируемого решения.

5.2.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов

5.2.1.1 Отклонение показателей микроклимата

Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» предназначены для предотвращения неблагоприятного воздействия микроклимата рабочих мест, производственных помещений на самочувствие, функциональное состояние, работоспособность и здоровье человека.

Микроклимат производственных помещений и рабочей зоны должен не зависеть от состояния природных метеорологических факторов, и формировать подходящие климатические условия, безопасные для персонала и наиболее благоприятные для выполнения работ.

Показателями, характеризующими микроклимат в производственных помещениях, являются: - температура воздуха; - температура поверхностей; - относительная влажность воздуха; - скорость движения воздуха; -

интенсивность теплового облучения. Оптимальные параметры микроклимата на рабочих местах приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Оптимальные величины показателей микроклимата

Период года	Температура, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	21-23	20-24	40-60	0,1
Тёплый	22-24	21-25	40-60	0,1

Для поддержания допустимых величины показателей климатических условий рабочей зоны необходимо конструирование специального технического помещения. В холодный период года – отопление, вытяжная вентиляция, средства индивидуальной защиты от охлаждения, а в теплый период – естественная и приточная вентиляции поддерживают температуру воздуха на рабочих местах.

5.2.1.2 Недостаточная освещенность

Недостаток освещения может очень плохо сказаться на продуктивности работы зрительного аппарата. Так же это может: повлиять на психику человека, его эмоциональное состояние; вызывает усталость центральной нервной системы, возникающей в результате прилагаемых усилий для опознания четких или сомнительных сигналов.

Для оптимизации условий труда имеет большое значение освещение рабочих мест. Задачи организации освещённости рабочих мест, следующие: обеспечение различаемости рассматриваемых предметов, уменьшение напряжения и утомляемости органов зрения. Производственное освещение должно быть равномерным и устойчивым, иметь правильное направление светового потока, исключать слепящее действие света и образование резких теней.

Требования к освещению помещений указаны в СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение», согласно которому для

зрительных работ средней точности, освещенность, при системе общего освещения, должна составлять 400 лк.

Естественное освещение создается природными источниками света солнечными лучами и светом небосвода, проникающим через боковые светопроемы (окна) в наружных стенах.

Искусственное освещение в рабочей зоне осуществляется люминесцентными лампами, находящиеся на стенах помещения на уровне около четырёх метров.

5.2.1.3 Повышенный уровень шума

Основными источниками шума на испытательной площадке является высокочастотный факельный плазмотрон и компрессор.

Повышенный шум на рабочем месте оказывает вредное влияние на организм работника в целом, вызывая неблагоприятные изменения в его внутренних органах и нервной системе, способствуя развитию утомления, снижению работоспособности, внимательности и производительности труда, изменениям в сердечно-сосудистой системе и появлению общих и профессиональных заболеваний (тугоухость, неврит слухового нерва и др.), а также производственный травматизм.

Согласно санитарным нормам СН 2.2.4/2.1.8.562-96 предельно допустимый уровень звука на рабочем месте для трудовой деятельности – 65 дБ.

Для защиты от вредного воздействия шума во время испытания применяются защитные противошумные наушники.

5.2.1.4 Повышенный уровень электромагнитных излучений

Основным источником электромагнитных излучений в лаборатории является высокочастотный факельный плазмотрон.

Длительное воздействие на человека электромагнитных полей промышленной частоты приводит к расстройствам сердечно-сосудистой и

центрально-нервной систем: вялость, раздражительность, апатия, боли в сердце и голове, расстройство сна, нарушение работы органов дыхания и пищеварения, возможны изменения в составе крови.

Максимальная возможная частота работы генератора импульсных напряжений – 150 кГц. При таком показателе частоты безопасной нормой для человека считаются следующие показатели: $E=500 \text{ В/м}$, $H=50 \text{ А/м}$, $\text{ЭНЭ}=20000 \text{ (В/м)}^2 \cdot \text{ч}$, $\text{ЭНН}=200 \text{ (А/м)}^2 \cdot \text{ч}$ (ЭН-энергетическая нагрузка).

Для защиты персонала от воздействия радиоволн ЭМ излучения применяется, экранирующие средства поглощающих или отражающих электромагнитную энергию и ограничение пребывания в зоне рабочего места работающего плазмотрона.

5.2.1.5 Поражение электрическим током

В качестве накопителя энергии ускорителя служит высокочастотный генератор, напряжение на выходе которого может достигать 400 кВ.

При нахождении в близости к электрооборудованию через тело человека может возникнуть цепь электротока по любому из семи перечисленных ниже сценариев:

- непосредственное прикосновение различными частями тела к двум разным полюсам источника;
- прикосновение к одному полюсу, обладающему потенциалом относительно земли;
- попадание под остаточный заряд, сохранившийся на схеме после ее отключения;
- действие наведенного заряда в металлических проводниках, оборудовании, не имеющем непосредственной связи с действующими источниками напряжения;
- возникновение разряда статически скопившегося электричества;
- образование эффекта напряжения шага;

- создание благоприятных условий для аварийного пробоя электрической изоляции, образованной воздушным расстоянием до потенциала.

Проходя через тело человека, электрический ток производит термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие.

Термическое действие тока проявляется в ожогах отдельных участков тела, нагреве и повреждении кровеносных сосудов; электролитическое – в разложении органической жидкости, в том числе крови, что вызывает нарушение ее состава, а также ткани в целом; механическое – в расслоении, разрыве тканей организма; биологическое – в раздражении и возбуждении живых тканей организма, а также в нарушении внутренних биологических процессов. Взаимодействуя с биотоками организма, внешний ток может нарушить нормальный характер их воздействия на ткани и вызвать произвольные сокращения мышц.

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов регламентируются ГОСТ 12.1.038-82 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1)».

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения при аварийном режиме производственных электроустановок с частотой тока 50 Гц, напряжением выше 1000 В, с глухим заземлением нейтрали не должны превышать значений, указанных в таблице 27.

Таблица 27 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения

Продолжительность воздействия t, с	До 0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	Св. 1,0 до 5,0
Предельно допустимое значение напряжения прикосновения U, В	500	400	200	130	100	65

Для защиты от повышенного уровня напряжения предусмотрены следующие средства защиты:

- изолирующая штанга;
- диэлектрические перчатки, боты и галоши, ковры, изолирующие подставки;
- защитные ограждения (Металлическая сеть; изолирующие щиты, колпаки накладки).

5.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия вредных и опасных факторов

Лаборатория удовлетворяет всем требованиям технической документации и обеспечивает возможность безопасного и удобного проведения работ.

В зале установлена приточно-вытяжная вентиляция, для предотвращения неблагоприятного воздействия микроклимата Относительная влажность воздуха должна быть в пределах 40-60%. В лаборатории, а также в кабинете с компьютером, где записываются и обрабатываются результаты эксперимента, необходимо обеспечить величину освещенности в 400 лк. В лаборатории это обеспечивается люминесцентными лампами, в кабинете с компьютером совместно лампами и естественным освещением.

В лаборатории имеются защитные наушники, защищающие от любых возможных звуков, которые издают высокочастотный факельный плазмотрон и компрессор. Наушники рассчитаны на уровень шума до 110 дБ.

Испытательная установка ограждена металлической сетью, которая служит экраном, понижающим степень распространение электромагнитного излучения. Для защиты персонала от воздействия радиоволн ЭМ излучения применяется, экранирующие средства поглощающих или отражающих электромагнитную энергию и ограничение пребывания в зоне рабочего места работающего генератора.

Так же присутствуют средства защиты от поражения электрическим током: изолирующая штанга; диэлектрические перчатки, боты и галоши, ковры, изолирующие подставки; защитные ограждения (металлическая сеть; изолирующие щиты, колпаки накладки).

5.3 Экологическая безопасность

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Выявляются предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации предлагаемых в ВКР решений.

Во время работы высокочастотный факельный плазмотрон не выделяет каких-либо вредных веществ, следовательно не наносит вреда окружающей среде. С точки зрения влияния на окружающую среду можно рассмотреть влияние серверного оборудования при его утилизации.

Большинство компьютерной техники содержит бериллий, кадмий, мышьяк, поливинилхлорид, ртуть, свинец, фталаты, огнезащитные составы на основе брома и редкоземельные минералы. Это очень вредные вещества, которые не должны попадать на свалку после истечения срока использования, а должны правильно утилизироваться.

Утилизация компьютерного оборудования осуществляется по специально разработанной схеме, которая должна соблюдаться в организациях:

- На первом этапе необходимо создать комиссию, задача которой заключается в принятии решений по списанию морально устаревшей или не рабочей техники, каждый образец рассматривается с технической точки зрения.
- Разрабатывается приказ о списании устройств. Для проведения экспертизы привлекается квалифицированное стороннее лицо или организация.

- Составляется акт утилизации, основанного на результатах технического анализа, который подтверждает негодность оборудования для дальнейшего применения.

- Формируется приказ на утилизацию. Все сопутствующие расходы должны отображаться в бухгалтерии.

- Утилизацию оргтехники обязательно должна осуществлять специализированная фирма.

- Получается специальная декларация официальной формы, которая подтвердит успешность уничтожения электронного мусора.

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

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) - это нарушение нормальных условий жизни и деятельности людей на объекте или определенной территории (акватории), вызванное аварией, катастрофой, стихийным или экологическим бедствием, эпидемией, эпизоотией (болезнь животных), эпифитотией (поражение растений), применением возможным противником современных средств поражения и приведшее или могущее привести к людским или материальным потерям.

Наиболее вероятной из чрезвычайных ситуаций является возникновения пожара, который может возникнуть из-за неисправности электрооборудования. Основные причины возникновения пожара: воспламенение изоляции электрических проводов, генератора, трансформаторов, в результате длительного воздействия повышенной нагрузки, короткого замыкания или аварийных ситуаций.

Для предотвращения образования пожара прибегают к следующим действиям: проверка операционного персонала на предмет знаний пожарной

безопасности, выполнение работ в соответствии с правилами и нормами, плановый осмотр установок.

При возникновении ЧС определён следующий алгоритм действий: вызов специальной службы; отключение от сети питания электроустановок и электрооборудования; изоляция всей системы подачи рабочего газа и баллонов; организовать эвакуацию из рабочей зоны, или, при возможности оперативно приступить к ликвидации очага пожара первичными средствами пожаротушения (огнетушитель ОУ-5-ВСЕ, пожарный рукав, бак с песком).

Заключение по разделу “Социальная ответственность”

В разделе «Социальная ответственность» были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при работе на установке ВЧФ-плазмотрона, проведен анализ вредных и опасных производственных факторов. К таковым относятся отклонение показателей микроклимата, недостаточная освещенность, повышенный уровень шума, повышенный уровень электромагнитных излучений, поражение электрическим током. Обоснованы мероприятия по снижению уровней воздействия вредных и опасных факторов на исследователя. Рассмотрены вопросы экологической безопасности и безопасности в чрезвычайных ситуациях. Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией является возникновение пожара вследствие короткого замыкания токоведущих частей. Разработан порядок действия в результате возникновения чрезвычайной ситуации и меры по ликвидации её последствий.

Грамотное соблюдение норм и правил, приведенных в нормативных документах, позволяет снизить воздействие вредных и опасных факторов на окружающую среду и организм человека при работе над научно-исследовательским проектом.

ВЫВОДЫ

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

2. По результатам проведенных теплотехнических расчетов установлены закономерности влияния органического компонента (ацетон) на показатели горючести водно-органических нитратных растворов и определены составы растворов ВОНР, обеспечивающие энергоэффективный синтез оксидных композиций « $\text{UO}_2\text{-ThO}_2\text{-MgO}$ » заданного состава.

3. В результате проведенного термодинамического моделирования процесса плазменной переработки растворов ВОНР в широком диапазоне температур (300÷4000) К установлены закономерности влияния массовой доли воздушного теплоносителя на состав образующихся продуктов, проведена оценка энергозатрат на процесс и определены условия, обеспечивающие в воздушной плазме плазмохимический синтез оксидных композиций « $\text{UO}_2\text{-ThO}_2\text{-MgO}$ » заданного состава.

4. Проведены экспериментальные исследования процесса синтеза оксидных композиций « $\text{UO}_2\text{-ThO}_2\text{-MgO}$ » в воздушно-плазменном потоке из диспергированных растворов ВОНР, включающих неодим (вместо урана) и церий (вместо тория) и исследованы физико-химические и технологические свойства полученных образцов порошков. Установлены закономерности влияния массовой доли матрицы (оксид магния) на размер образующихся кристаллитов в составе оксидных композиций « $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ ». Показано, что плазменная переработка диспергированных растворов ВОНР в воздушно-плазменном потоке позволяет осуществлять плазмохимический синтез наноразмерных порошков оксидных композиций с высокими физико-химическими и технологическими свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Скоров Д.М., Бычков Ю.Ф., Дашковский А.М. Реакторное материаловедение. – М.: Атомиздат, 1979. – 344 с.
2. Самойлов А.Г., Каштанов А.И., Волков В.С. Дисперсионные тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1965. – 343 с.
3. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
4. Горский В.В. // Атомная техника за рубежом. – 1999. – Т. 10. – С. 9–13.
5. Degueldre C. and Paratte J.M. // J. Nucl. Mater. – 1999. – V. 274. – P. 1–6.
6. Скоров Д.М., Бычков Ю.Ф., Дашковский А.М. Реакторное материаловедение. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. – 344 с.
7. Цыканов В.А. Тепловыделяющие элементы для исследовательских реакторов. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2000. – 249 с.
8. 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.
9. Бескоровайный Н.М. и др. Конструкционные материалы ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 324 с.
10. Энциклопедия современной техники. Конструкционные материалы. Т. 2. Гл. ред. А.Г. Туманов. – М.: Советская энциклопедия, 1964.
11. Эйдензон М.А. Магний. – М.: Металлургия, 1969. – 352 с.
12. Полмеар Я. Легкие сплавы от традиционных до нанокристаллов. – М.: Техносфера, 2008. – 464 с.
13. Calliot R., et al. Raisons du choix de l'alliage Mg-Zr pour le gainage des elements combustibles // J.Nucl.Mater. – 1963. – V 8. – No 1. – P. 1.
14. Самсонов Г.В. и др. Физико-химические свойства окислов. Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.

15. Current Status of Neutron Capture Therapy // IAEA – TECDOC-1223, IAEA, Vienna, 2001.
16. Strategic Planning for Research // IAEA – TECDOC-2212, IAEA, Vienna, 2001.
17. Алексеев С.В., Зайцев В.А. Нитридное топливо для ядерной энергетики. – М.: Техносфера, 2013. – 240 с.
18. Холлек Х. Двойные и тройные карбидные и нитридные системы переходных металлов. Справочник. Пер. с нем / Под ред. Ивенского Ю.В. – М.: Металлургия, 1988. – 319 с.
19. Matzke H.J., Rondinella V.V., Wiss T. Materials research on inert matrixes: a screening study // J. Nucl. Mater. – 1999. – V. 274. – No 1–2. – P. 47.
20. Kleykamp H. Selection of materials as diluents for burning of plutonium fuels in nuclear reactors // J. Nucl. Mater. – 1999. – V. 275. – No 1–2. – P. 1.
21. W. Luther, in Industrial application of nanomaterials-chances and risks, W. Luther (Ed.), Future Technologies Division, Dusseldorf, 2004.
22. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.
23. Пархоменко В.Д., Сорока П.И., Краснокутский Ю.И., Верещак В.Г. Плазмохимические методы получения порошкообразных веществ и их свойства. // Всесоюзный журнал химического общества им. Д.И. Менделеева. 1991 (2). Т.36. С. 166-170.
24. Дорзет В.С., Друговский А.И., Панфилов С.А., Хрусталева Т.Р. // Исследование плазменных процессов и устройств. – Минск: ИТМО АН БССР, 1978. – 103-110.
25. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: справочная книга. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
26. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиции: пер. с франц. – М.: Мир 1968. – 464 с.
27. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.
28. ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность.

29. Пожаро и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004 – 85 ССБТ Пожарная безопасность.

30. ППБ 01 – 03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.

Приложение А

(справочное)

Modeling and research of the process of plasma-chemical synthesis of oxide compositions for dispersed uranium-thorium nuclear fuel

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Сопыряев Владислав Вадимович		

Руководитель ВКР

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

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

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

INTRODUCTION

In XXI century NPP using ceramic nuclear fuel (NF) based on uranium-235 will still be a significant part of atomic energetics. Such NF has significant disadvantages: low thermal conductivity limiting specific capacity in melting temperature, short usage cycle of uranium NF (reactor shutdown and refueling every 3-5 years), impossibility to create low and ultralow capacity electric power complexes, big costs for spent NF utilization, uranium-235 scarce resources.

In case of using isotopes uranium-238, thorium-232 and plutonium-239 there is no need in expensive isotope enrichment and fuel usage cycle could be raised up to 10-15 years. Possible resource of thorium in Earth crust is 3-5 times greater than that of uranium and using ceramic NF of oxide compositions based on thorium could give an opportunity to create low and ultra-low capacity electric power complexes for using them in remote areas, hard-to-reach regions, mines, and opencasts. However, significant disadvantage of ceramic NF is low thermal conductivity.

Promising line of development of atomic energetics is usage of dispersion nuclear fuel. In such case, inclusion of fissile material (uranium, thorium, plutonium) in form of granulated oxide compositions (microspheres) is placed inside the matrix of material with high thermal conductivity coefficient. Using metallic materials (aluminum, molybdenum, tungsten, stainless steel) as matrix materials increases thermal conductivity coefficient but declines neutron balance because of high neutron resonance absorption.

The use of the sol-gel method for obtaining microspheres from mixed water nitric solutions is connected with following disadvantages: multistage process, long process duration, low productivity, need in chemicals, additional hydrogen reduction, high prime cost. In addition, separable obtaining and mechanical mixing microspheres and matrix material do not ensure homogeneous phase distribution in such NF.

Plasma-chemical method could be alternative to sol-gel process. Doubtless advantages of plasma application for plasma-chemical synthesis of oxide compositions from dispersed mixed water nitric solutions are single stage process,

high speed process, clarity, environment safety, homogeneous phase distribution with desired stoichiometric ratio, possibility to influence on size and particle morphology, equipment compactness. However, plasma treatment of water nitric solutions needs significant energy costs (up to 4 MW-h/ton) and it does not allow one-stage producing oxides with required stoichiometric ratio without hydrogen reduction.

For the first time direct plasma-chemical synthesis of complex oxide compositions (including oxides of fissile materials and matrix of churlish metal oxide with high thermal conductivity coefficient and low neutron resonance absorption) in air-plasma flow from dispersed combustible water-organic nitric solutions (WONS) was provided. Such WONS includes liquid organic components (alcohols, ketones, etc.) and have low calorific value of minimum 8.4 MJ/kg and adiabatic combustion temperature of minimum 1200 degrees Celsius. Plasma treatment of such WONS provides reducing recycling energy costs (up to 0.1 MWh/ton), it increases plant productivity. Also it ensures conditions in plasma-chemical reactor for direct synthesis of nanosized complex oxide compositions having homogeneous phase distribution and high thermal conductivity coefficient, required stoichiometric ratio without hydrogen reduction.

A1. Methods for large-scale synthesis of nanomaterials

A1.1 Sol-gel

In materials science, the sol–gel process is a method for producing solid materials from small molecules. The method is used for the manufacture of metal oxides, especially the oxides of silicon and titanium [1]. The process involves conversion of monomers into a colloidal solution (sol) that acts as the precursor for an integrated network (or gel) of either discrete particles or network polymers. Typical precursors are metal alkoxides.

In this chemical procedure, a "sol" (a colloidal solution) is formed so that it gradually develops in the direction of the formation of a gel-like two-phase system containing both a liquid phase and a solid phase, the morphology of which varies

from discrete particles to continuous polymer networks. In the case of a colloid, the volume fraction of particles (or particle density) may be so low that initially it may be necessary to remove a significant amount of liquid to recognize gel-like properties. This can be achieved in any number of ways. The easiest way is to allow time for precipitation, and then drain the remaining liquid. Centrifugation can also be used to speed up the phase separation process.

Removing the remaining liquid (solvent) phase requires a drying process, which is usually accompanied by a significant amount of shrinkage and compaction. The rate at which the solvent can be removed is ultimately determined by the distribution of porosity in the gel. The final microstructure of the final component will undoubtedly be strongly influenced by the changes made to the structural template at this stage of processing.

After this, a heat treatment or firing process is often required in order to facilitate further polycondensation and to improve the mechanical properties and structural stability through final sintering, compaction and grain growth. One of the clear advantages of using this methodology over more traditional processing methods is that compaction is often achieved at significantly lower temperatures.

The sol of the precursor can either be applied to the substrate to form a film (e.g., by immersion coating or by centrifugation), cast into a suitable container of the desired shape (e.g., to obtain monolithic ceramics, glasses, fibers, membranes, aerogels), or is used for the synthesis of powders (e.g., microspheres, nanospheres) [2]. The sol-gel approach is a cheap and low-temperature technique that allows precise control of the chemical composition of the product. Even small amounts of dopants, such as organic dyes and rare earths, can be incorporated into sols and ultimately uniformly dispersed in the final product. It can be used in the processing and production of ceramics as a material for investment casting or as a means for the production of very thin films of metal oxides for various purposes. Materials obtained from sol-gel have various applications in optics, electronics, energy, space, (bio) sensors, medicine (e.g., controlled drug release), chemically active material and separation technology (e.g., chromatography) [2].

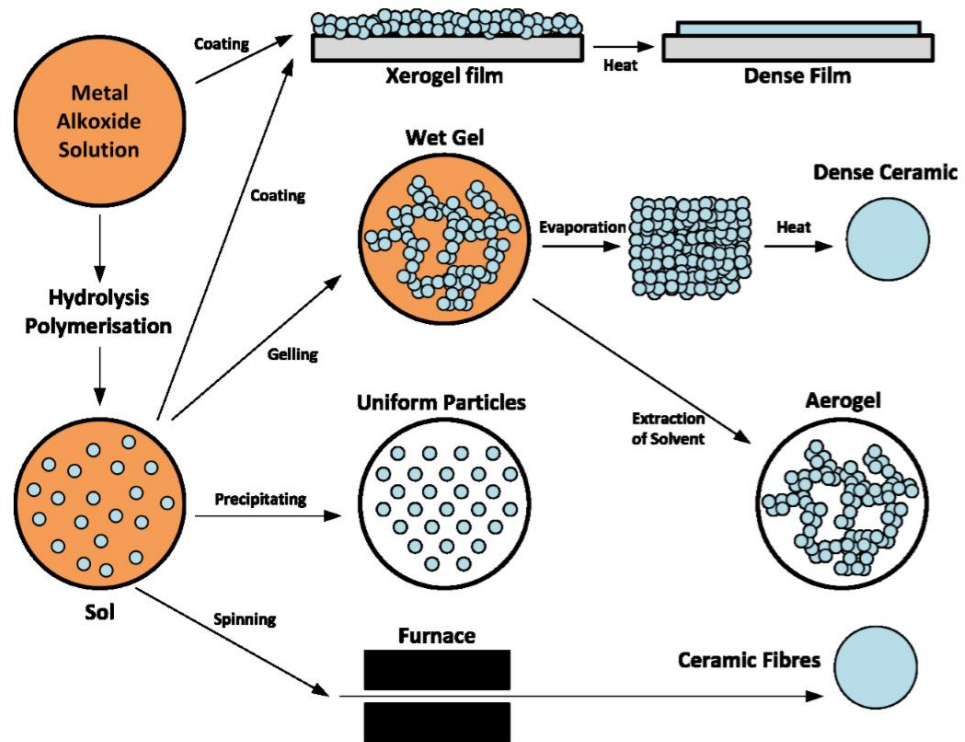


Figure 1. Schematic representation of the different stages and routes of the sol-gel technology.

When processing fine ceramics, the irregular sizes and shapes of particles in a typical powder often lead to heterogeneous packaging morphologies, which leads to changes in packing density in a compact powder. Uncontrolled flocculation of powders due to the attractive forces of Van der Waals can also lead to microstructural inhomogeneities [3].

Differential stresses resulting from uneven shrinkage during drying are directly related to the rate at which the solvent can be removed, and thus are highly dependent on the distribution of porosity. Such stresses were associated with the transition of plastic into a brittle state in consolidated bodies [3] and can lead to the propagation of cracks in an unburned body if they are not weakened.

In addition, any fluctuations in the packing density in the compact when it is being prepared for the furnace are often amplified during sintering, resulting in heterogeneous compaction. It was shown that some pores and other structural defects associated with changes in density play a harmful role in the sintering

process, increasing and, therefore, limiting the final density. It has also been shown that differential stresses due to inhomogeneous compaction lead to the propagation of internal cracks, thus turning into weaknesses in strength control.

It would seem desirable to process the material so that it is physically uniform in terms of component distribution and porosity, rather than using particle size distributions that maximize green density. The retention of a uniformly dispersed set of strongly interacting particles in suspension requires complete control over the interaction of particles with particles. Monodisperse colloids provide this potential.

A1.2 Plasma-chemical technique

The plasma-chemical method involves mixing the main gas with a dispersed aqueous solution of uranium nitrate. Nitrogen or argon heated to a low-temperature plasma is used as the main gas.

Mixing a high-temperature coolant gas with a dispersed aqueous solution of uranium nitrate leads to heating and evaporation of solution droplets, followed by thermal decomposition of salt particles, accompanied by enrichment of the gas phase with vapor and synthesis of oxide particles [4].

The cooling of the reaction products, the so-called vacation, is carried out by mixing the plasma products with a sprayed liquid with a high latent heat of evaporation. As the liquid, you can use deionized water, liquid nitrogen or liquid carbon monoxide, which is fed under a pressure of 2 MPa into the region of the reaction zone.

The rates for introducing the gas mixture and the dispersed aqueous solution into the reactor conversion zone usually vary significantly. Thanks to the injection zone, a reciprocating gas movement with contained aerosol particles is formed in the reactor. Agglomeration of particles and their expansion occur in the circulation zones.

The growth and agglomeration of particles in the conversion zone facilitate the subsequent separation of the dust-gas mixture and reduce the number of reverse reactions of UO_2 particles with nitric acid vapors.

The values of the concentration range and mass flow rate of an aqueous solution of uranium nitrate are determined by creating conditions for the composition of the thorium oxide powder with the required concentration of the metal contained in it.

Figure 2 shows a schematic diagram of a plasma-chemical technological complex.

The main gas (nitrogen, argon, or a mixture thereof) is heated to a low-temperature plasma state ($5000 \div 6000$ K) with a high-frequency induction discharge in the HFI-2 plasmatron and fed to the reaction zone 4 of the plasma reactor [4].

An aqueous solution of uranium nitrate from the tank 10 is pumped into a plasma reactor.

The solution is injected into the mixing chamber of the reactor using pneumatic nozzles that provide an average dispersion of the sprayed liquid of not more than $(50 \div 70) \cdot 10^{-6}$ m, in addition, the injectors are supplied with compressed gas (nitrogen).

After mixing the coolant, the gas temperature decreases to $2000 \div 3000$ K.

The solution is injected into the reforming zone at an angle to the direction of movement of the heat carrier gas. During the process, the pressure in the conversion zone of the plasma reactor is maintained $10 \div 50$ kPa below atmospheric pressure.

As a result of thermal decomposition of a dispersed aqueous salt solution, an aerosol of uranium oxide with a specific molar ratio O/U is formed in the conversion zone, depending on the potential for gas phase reduction.

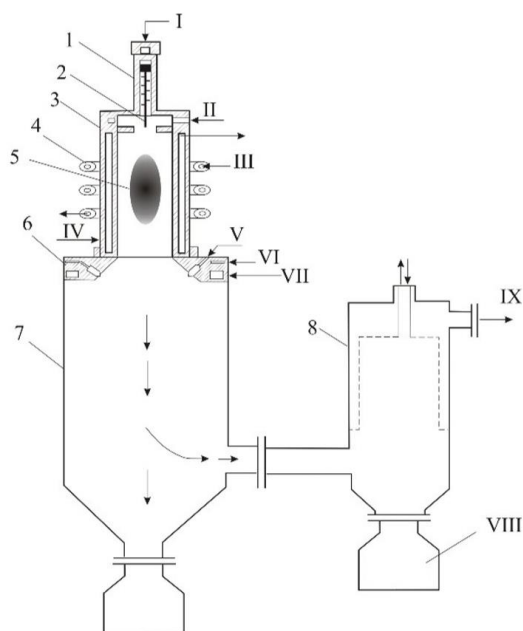


Figure 2. 1-igniter; 2- electrode; 3- plasma torch; 4- inductor; 5- plasma discharge; 6- spraying device; 7- plasma chemical reactor; 8- filter; I- gas to ignite the discharge; II-gas for plasma formation; III- water to cool the inductor; IV- water to cool the plasma torch; V- processed inorganic metal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

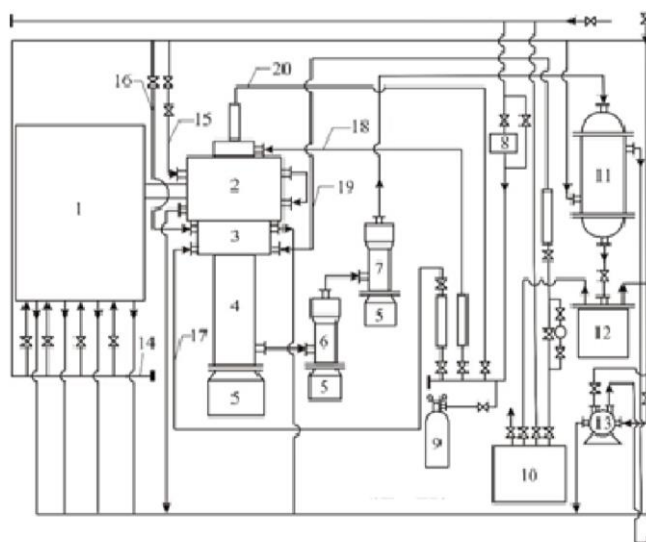


Figure 3. 1- HF generator, 2- the plasma torch, 3- nozzle; 4- plasma-chemical reactor, 5- reception bunker, 6- the first vortex dust collector, 7- second vortex dust collector, 8- filter, 9- plasma gas bottle; 10- feed solution container, 11- condensate container, 12- condensate tank, 13- vacuum pump, 14- cooling water

for generator, 15- cooling water for plasma torch, 16- cooling water for nozzle, 17- gas for solution spraying, 18- gas for plasma formation, 19- the solution, 20- gas for ignition [5].

The size of aerosol particles is about $(2\div5)\cdot 10^{-6}$ m. The separation of oxide particles from the dust and gas flow is carried out in a separation system 6, 7 and 8, which consists of a cyclone filter and a ceramic filter operating at temperatures of $500\div 600$ °C and $200\div 300$ °C, respectively. Powder is collected in containers 5.

The purified gas, consisting of residual water vapor, nitric acid, nitrogen and hydrogen vapor, is sent to the combined condensation of water vapor and nitric acid in the condenser of the refrigerator 11. Nitrogen (argon) is supplied to the gas purification unit.

Uranium oxide aerosol is also concentrated in the distillation residue and can be processed in a plasma reactor as a solution by adding thorium salts. Then the oxide powder is subjected to heat treatment in a reducing atmosphere to remove residual nitrogen and to bring the molar ratio O/U to $2.06 \div 2.18$.

This technology ensures the exit from the plasma block of a homogeneous mixture of thorium oxide in one stage using a circulating solution.

A2. The laboratory plasmatron facility description

The laboratory plasma bench is based on a high-frequency plasma torch and is designed to study the plasma combustion processes of various combustible compositions under the influence of a high-frequency discharge in air plasma.

The plasma installation includes a HFG 8-60 / 13-01 high-frequency generator (oscillation power up to 60 kW, operating frequency 13.56 MHz) [8], which, through a coaxial output 6 of RF energy, is supplied to a water-cooled boiler by an electrode 4 of a high-frequency plasma torch-3, designed to generate air jets with a weighted average plasma temperature of up to 4000 K. The discharge chamber of a high-frequency plasma plasmatron is made of a quartz tube with a length of 860 mm and a diameter of 50 mm.

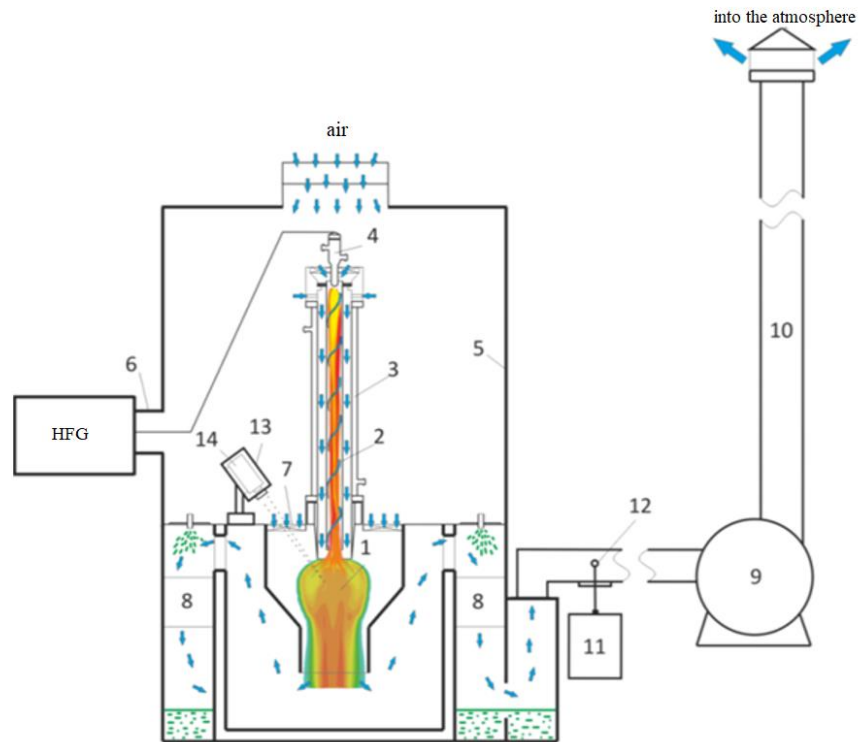


Figure 4. Scheme of the Plasma facility based on the high-frequency plasma torch: 1 - disperser 2 - HFT discharge, 3 - high-frequency plasma torch; 4 - copper electrode, 5 - case; 6 - coaxial output; 7 - reactor impeller; 8 - "wet" flue gas cleaning unit; 9 - exhaust fan (BP 12-26, №4), 10 - duct, 11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

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

The plasma gas input unit mounted at the inlet of the HFT plasma torch is equipped with an impeller that swirls the incoming plasma gas (air) into the discharge chamber of the plasma high-frequency torch.

The impeller of the reactor 7, installed at the entrance to it, is designed to swirl the incoming air and allows you to adjust the area of the inlet of the groove of the impeller.

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

A gas analyzer 11 with a sampling device 12 is used to determine the gas content of the reactor exhaust gas (CO, NO, NO₂, SO₂, C_xH_y) and measurements using a pitot tube of the reactor air flow rate in the duct 250 mm. diameter, as well as measuring the velocity of a plasma gas (air) through an HFT-plasmatron.

Pyrometer 14 is designed for non-contact measurement of the temperature of a plasma reactor based on carbon dioxide absorption lines.

CONCLUSION

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

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

References

1. W. Luther, in Industrial application of nanomaterials-chances and risks, W. Luther (Ed.), Future Technologies Division, Dusseldorf, 2004.
2. K.V. Prashant, D. Meisel, Stud. Surf. Sci. Catal. 103 (1997) 237.
3. J.H. Fendler, Korean J. Chem. Eng. 18 (2001) 1.
4. D. Vollath, Nanomaterials: an introduction to synthesis, properties and applications, Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
5. M.L. Hitchman, K.F. Jensen, Chemical vapour deposition: principles and applications, Academic Press, New York, 1993.

Приложение Б

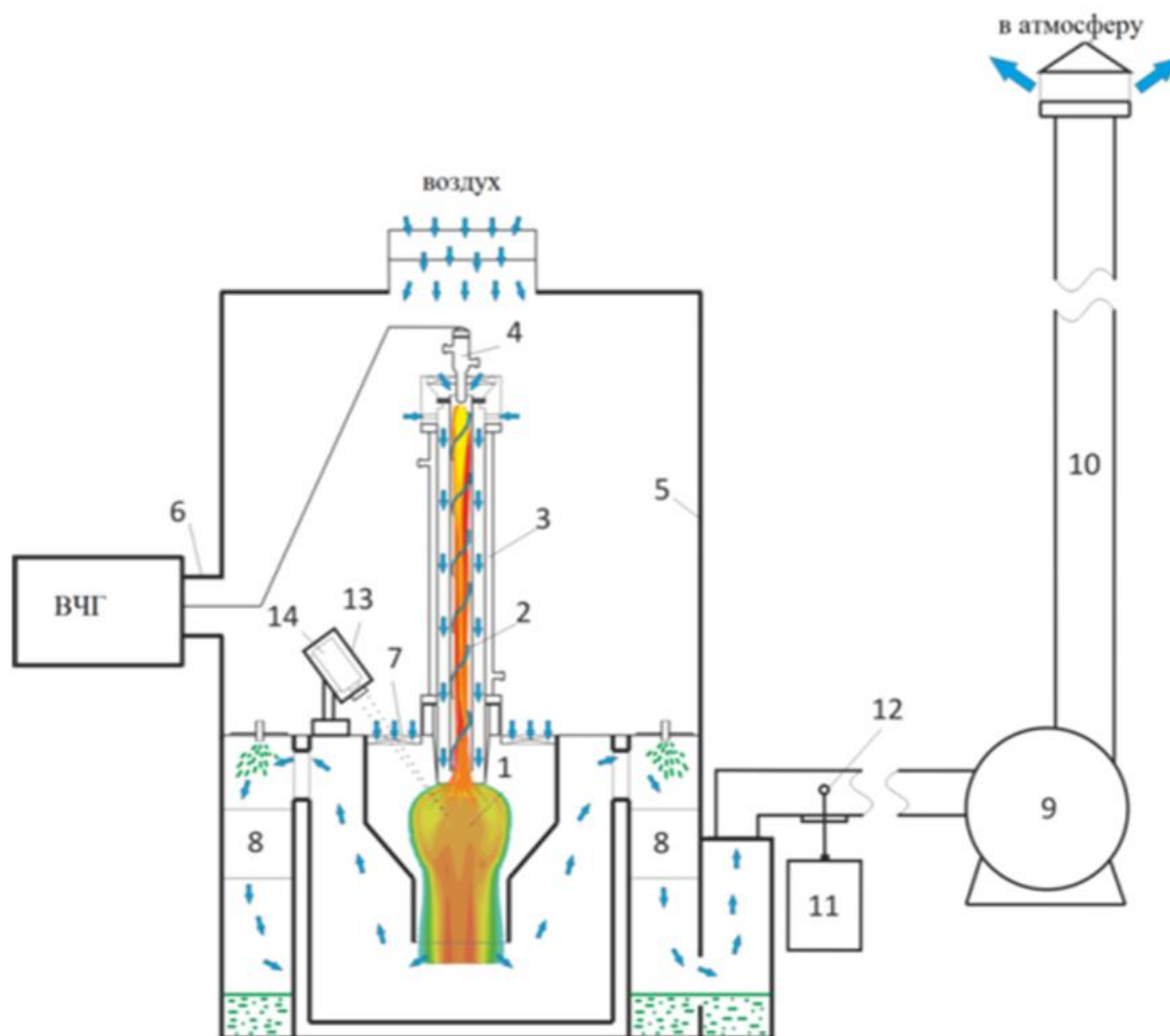


Рисунок Б1 – Схема плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона:
1 – диспергатор, 2 – ВЧФ-разряд, 3 – ВЧФ-плазмотрон; 4 – медный электрод,
5 – корпус; 6 – коаксиальный вывод; 7 – импеллер реактора; 8 – узел
«мокрой» очистки отходящих газов; 9 – вытяжной вентилятор (ВР 12-26,
№4), 10 – воздуховод, 11 – газоанализатор «Quintox» КМ 9106, 12 –
пробоотборник; 13 – защитный кожух пирометра, 14 – пирометр IPE 140/45,
ВЧГ – высокочастотный генератор ВЧГ8-60/13-01

Приложение В

№	Вид работ	Испол нител ь	Тк, кал.дн.	Продолжительность выполнения работ											
				Март			Апрель			Май			Июнь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Р	5	■											
2	Подбор и изучение материалов по теме	И	14	▤	▤	▤									
3	Анализ исходных данных	И	7			▤									
4	Выбор направления исследований	И Р	4 3			▤ ■									
5	Календарное планирование работ по теме	Р	4				■								
6	Расчёт показателей необходимых для проведения эксперимента	И	5				▤								
7	Разработка стенда и экспериментальное исследование	И	14					▤	▤						
8	Оценка эффективности полученных результатов	И Р	4 2						▤ ■						
9	Анализ и обработка полученных результатов	И Р	3 2						▤ ■						
10	Технико-экономические расчеты	И	4							▤					
11	Составление пояснительной записки	И	12							▤	▤				

Рисунок Е1 – Календарный план-график проведения научного исследования.



- инженер,



- руководитель.

Приложение Г

Таблица В1 – Результаты измерений расхода воздуха через газоход без узла ввода ПГ (трубка 50/300 мм)

№	S _{имп}		P _{пр} , мБар							P _{пр}	V _{пр}	Q _{пр}		
	3хп	см ²	1	2	3	4	5	6	7	Па	м/с	м ³ /с	кг/с	м ³ /ч
1	3х10	1650	2,33	2,37	2,35	2,40	2,39	2,41	2,38	236,86	19,86	0,990	1,19	3575,02
2	3х8	1320	2,39	2,41	2,48	2,47	2,48	2,51	2,43	244,55	20,18	1,009	1,21	3632,60
3	3х6	990	2,09	2,14	2,00	2,16	2,10	2,09	2,10	209,09	18,66	0,933	1,12	3358,88
4	3х4	660	2,03	2,06	2,07	1,97	2,07	1,96	1,94	200,82	18,29	0,914	1,10	3291,86
1	3х10	1650	2,47	2,44	2,52	2,46	2,48	2,50	2,49	247,26	20,29	1,014	1,22	3652,64
2	3х8	1320	2,35	2,37	2,42	2,38	2,39	2,33	2,38	236,72	19,86	0,992	1,19	3573,94
3	3х6	990	2,15	2,25	2,12	2,24	2,28	2,29	2,24	221,76	19,22	0,961	1,15	3459,21
4	3х4	660	1,96	1,93	1,96	1,94	1,92	1,89	1,94	192,85	17,92	0,896	1,08	3225,83

Таблица В2 – Результаты измерений расхода воздуха через ВЧФП без узла ввода ПГ (трубка 50/300 мм)

№	S _{имп}		P _{пр} , мБар							P _{пр}	V _{пр}	Q _{пр}		
	3хп	см ²	1	2	3	4	5	6	7	Па	м/с	м ³ /с	кг/с	м ³ /ч
1	3х10	1650	1,75	1,79	1,80	1,78	1,79	1,78	1,80	177,89	17,21	0,089	0,11	322,22
2	3х8	1320	2,11	2,12	2,19	2,10	2,20	2,11	2,14	213,22	18,84	0,097	0,12	352,76
3	3х6	990	2,83	2,78	2,81	2,83	2,80	2,79	2,80	279,73	21,58	0,112	0,13	404,05
4	3х4	660	3,62	3,56	3,6	3,57	3,56	3,61	3,58	357,50	24,40	0,126	0,15	456,78
1	3х10	1650	1,79	1,75	1,82	1,89	1,82	1,88	1,80	181,60	17,39	0,091	0,11	325,55
2	3х8	1320	2,15	2,19	2,15	2,10	2,09	2,12	2,17	213,22	18,84	0,098	0,12	352,76
3	3х6	990	2,33	2,37	2,35	2,42	2,41	2,37	2,41	237,29	19,88	0,103	0,12	372,14
4	3х4	660	3,31	3,35	3,31	3,37	3,29	3,35	3,32	331,86	23,51	0,122	0,15	440,09

Приложение Д

Таблица Г3 – Результаты измерений расхода воздуха через реактор

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

Приложение Е

Таблица Д1 – 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	
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 _{bet} , нм	ρ _{нас} , г/см ³	ρ _{нас} , %
ОК-1 (100% Ce ₂ O ₃)	ВОНР-1	-	300,0	-	64,9	35	2,8	9,0	10,3	76	-	-
ОК-2 (100% Ce ₂ O ₃)	ВОНР-2	-	500,0	-	64,5	35	2,8	6,1	5,2	151	-	-
ОК-3 (100% Ce ₂ O ₃)	ВОНР-3	-	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-4 (90% Ce ₂ O ₃ –10% Nd ₂ O ₃)	ВОНР-4	32,6	297,6	-	64,3	35	2,8	10,7	-	-	-	-
ОК-5 (85,5% Ce ₂ O ₃ –9,5% Nd ₂ O ₃ –5,0% MgO)	ВОНР-5	31,0	282,7	80,1	63,3	35	2,8	10,2	-	-	-	-
ОК-6 (81,0% Ce ₂ O ₃ –9,0% Nd ₂ O ₃ –10,0% MgO)	ВОНР-6	29,3	267,9	160,3	62,2	35	2,8	12,4	-	-	-	-
ОК-7 (76,5% Ce ₂ O ₃ –8,5% Nd ₂ O ₃ –15,0% MgO)	ВОНР-7	27,7	253,0	240,4	61,2	35	2,8	12,5	12,5	78	-	-
ОК-8 (72,0% Ce ₂ O ₃ –8,0% Nd ₂ O ₃ –20,0% MgO)	ВОНР-8	26,1	238,1	320,5	60,6	35	2,8	14,7	12,8	76	0,462	7,5
ОК-9 (63,0% Ce ₂ O ₃ –7,0% Nd ₂ O ₃ –30,0% MgO)	ВОНР-9	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-10 (45,0% Nd ₂ O ₃ –45,0% Ce ₂ O ₃ –10,0% MgO)	ВОНР-10	146,7	148,8	160,3	62,3	50	2,8	9,8	13,1	68	0,84	12,5
ОК-11 (40,0% Nd ₂ O ₃ –40,0% Ce ₂ O ₃ –20,0% MgO)	ВОНР-11	130,7	132,3	320,5	60,3	50	2,8	9,6	14,5	67	-	-
ОК-12 (35,0% Nd ₂ O ₃ –35,0% Ce ₂ O ₃ –30,0% MgO)	ВОНР-12	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-13 (54,0% Nd ₂ O ₃ –36,0% Ce ₂ O ₃ –10,0% MgO)	ВОНР-13	176,0	119,1	160,3	62,3	50	2,8	8,9	-	-	-	-
ОК-14 (48,0% Nd ₂ O ₃ –32,0% Ce ₂ O ₃ –20,0% MgO)	ВОНР-14	156,5	105,8	320,5	60,3	50	2,8	7,5	-	-	-	-
ОК-15 (42,0% Nd ₂ O ₃ –28,0% Ce ₂ O ₃ –30,0% MgO)	ВОНР-15	136,9	92,6	480,8	58,4	50	2,8	6,8	-	-	-	-

Продолжение таблицы Д1

$\alpha = \text{Nd}_2\text{O}_3 / (\text{Nd}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3) = 0,7$												
ОК-16 (63,0% Nd_2O_3 –27,0% Ce_2O_3 –10,0% MgO)	ВОHP-16	205,4	89,3	160,3	62,3	50	2,8	9,3	13,9	64	-	-
ОК-17 (56,0% Nd_2O_3 –24,0% Ce_2O_3 –20,0% MgO)	ВОHP-17	182,5	79,4	320,5	60,3	50	2,8	8,9	16,8	58	-	-
ОК-18 (49,0% Nd_2O_3 –21,0% Ce_2O_3 –30,0% MgO)	ВОHP-18	159,7	69,4	480,8	58,4	50	2,8	8,1	15,4	69	-	-

Приложение Ж

Таблица Ж1. Основные физико-механические свойства оксидных материалов

Свойства	Соединение оксидов						
	Al ₂ O ₃	MgO	CeO ₂	Y ₂ O ₃	ZrO ₂	MgAl ₂ O	ZrSiO ₄
Температура плавления, °C	2054	2827	2400	2430	2710	2105	1676, формирование эвтектики
Давление пара, мм рт.ст.	~10 ⁻⁹ (1950 °C)	~10 ⁻⁴ (1727°C)	2·10 ⁻⁷ (1500 °C) 6·10 ⁻⁵ (2000 °C)	2·10 ⁻⁷ (2000°C)	2·10 ⁻⁸ (2000°C)	—	—
Теплопроводность, Вт/(м·К)	13,3 (500 °C) 8,2 (1000°C) 5,8 (1500°C)	20,0 (500°C) 13,0 (1000°C) 6,0 (1500°C)	1,2 (1000 °C) 0,9 (1500 °C) 1,2 (2000 °C)	4,1 (500 °C) 2,5 (1000 °C) 2,9 (1500 °C)	2,2 (1000°C) 1,5 (1500°C) 1,8 (2000 °C)	9,0 (500°C) 7,7 (1100 °C) ~8,0 (1500 °C)	5,4 (500 °C) 4,5 (1000 °C) 4,2 (1500 °C)
Модуль нормальной упругости E, ГПа	374,63– 147,10 (293–1773 K)	295,20–219,68 (298–1573 K)	162,4 (293 K)	180,1 (293 K)	168,68–94,15 (293–1635 K)	274,0 (293 K)	154,0 (293 K)
Модуль сдвига G, ГПа	124,55– 105,92 (298– 1323 K)	113,76–35,31 (573–1673 K)	62,74–34,32 (303–1373 K)	—	60,80–97,09 (293–1573 K)	—	64,4
Коэффициент Пуассона	0,26–0,45 (298–1473 K)	0,36–0,47 (298–1373K)	0,515 (293 K)	—	0,36 (293 K)	—	0,19