

Школа **Инженерная школа ядерных технологий**
 Направление подготовки **14.04.02 Ядерные физика и технологии**
 Отделение **ядерно-топливного цикла**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Плазмохимический синтез и исследование топливных оксидных композиций для перспективных типов ядерного топлива

УДК 621.039.543:66.011:533.9

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Бабаев Ренат Габилевич		

Руководитель ВКР

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

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент ОЯТЦ	И.Ю. Новоселов	—		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН	Е.В. Латышева	к.филос.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

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

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

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

 « ____ » _____ 2019 г. Л.И. Дорофеева

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
0AM71	Бабаеву Ренату Габировичу

Тема работы:

Плазмохимический синтез и исследование топливных оксидных композиций для перспективных типов ядерного топлива	
Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	27.02.2019 №1538/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	07.06.2019 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Исследовать влияние органического компонента на показатели горючести водно-органических растворов на основе нитрата уранила. Определить режимы для плазмохимического синтеза порошков диоксида урана и исследовать их физико-химические свойства.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	При разработке магистерской диссертации должны быть рассмотрены следующие вопросы: 1. Обзор и анализ физических методов получения наноразмерных порошков 2. Определение оптимальных составов водно-органических нитратных растворов 3. Термодинамическое моделирование равновесных составов продуктов плазмохимического синтеза 4. Подготовка экспериментального плазменного стенда 5. Подготовка модельных прекурсоров и проведение экспериментов с получением опытной партии порошка 6. Исследование и анализ свойств полученного порошка, синтезированного в плазме ВЧФ-разряда 7. Экономическое обоснование проведения НИР 8. Выводы по работе. Заключение

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Е.В. Латышева
Социальная ответственность	Т.С. Гоголева

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	11.03.2019 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Р.Г. Бабаев		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM71	Бабаеву Ренату Габилевичу

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

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

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Иерархическая структура работ SWOT-анализ Календарный план-график реализации проекта
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Определение ресурсоэффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Сегментирование рынка</i>
2. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
3. <i>Матрица SWOT</i>
4. <i>График проведения и бюджет НТИ</i>
5. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i>
6. <i>Потенциальные риски</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Латышева Елена Владимировна	к.филос.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Бабаев Ренат Габилевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM71	Бабаев Ренат Габилевичу

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

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной).
<i>2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме</i>	<ul style="list-style-type: none"> – требования охраны труда при работе на ПЭВМ; – электробезопасность; – пожаробезопасность.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Бабаев Ренат Габилевич		

ОГЛАВЛЕНИЕ

РЕФЕРАТ	10
ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	11
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	12
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.....	29
2 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ	32
2.1 Расчет показателей горючести и состава водно-органических нитратных растворов	32
2.2 Термодинамический расчет процесса плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций из растворов ВОНР	33
2.3 Используемые модели для расчета коэффициентов теплопроводности композиционных материалов в виде сложных оксидных композиций	40

2.4 Результаты расчетов коэффициентов теплопроводности композиционного материала в виде сложных оксидных композиций «диоксид урана–оксид магния» и их обсуждение	43
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	45
3.1 Описание плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона.....	45
3.2 Определение расходов воздушного теплоносителя через ВЧФ-плазмотрон и газоход	46
3.3 Определение расходов воздушного теплоносителя через реактор	48
3.4 Плазмохимическая переработка модельных растворов ВОНР.....	50
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	54
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	54
4.2 Анализ конкурентных технических решений.....	55
4.3 SWOT-анализ.....	56
4.4 Планирование научно-исследовательских работ	60
4.4.1 Структура работ в рамках научного исследования	60
4.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	60
4.4.3 Разработка графика проведения научного исследования	62
4.4.4 Бюджет научно-технического исследования	63
4.4.5 Расчет материальных затрат НТИ	64
4.4.6 Амортизация оборудования	65
4.4.7 Основная заработная плата исполнителей темы	65
4.4.8 Отчисления во внебюджетные фонды	67
4.4.9 Накладные расходы	68
4.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	69

4.6	Определение ресурсоэффективности исследования	69
5.	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	72
5.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов при работе в лаборатории	72
5.2	Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на плазменной установке и ПЭВМ.	74
5.2.1	Организационные мероприятия.....	74
5.2.2	Организация рабочего места пользователя ПК	74
5.2.3	Условия безопасной работы	76
5.3	Правила техники безопасности при эксплуатации плазменной установки.....	79
5.4	Электробезопасность	80
5.5	Пожарная безопасность	82
	ВЫВОДЫ.....	84
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	85
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	86
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	89
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	102
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	103
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г	104
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д	105

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 105 страниц, 33 рисунка, 23 таблицы, 30 источников, 5 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 – исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций «диоксид урана–оксид магния (бериллия)» в воздушной плазме из водно-органических нитратных растворов.

В процессе исследований проводились: расчет показателей горючести различных по составу водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих делящийся металл (уран), металл матрицы (магний, бериллий) и органический компонент (этанол, ацетон); термодинамические расчеты процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций урана из растворов ВОНР в воздушной плазме; измерение теплофизических и газодинамических параметров воздушно-плазменного потока при работе плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона.

В результате исследования: определены оптимальные составы 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–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 гомогенных оксидных композиций для различных типов ядерного топлива.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

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

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

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

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

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

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

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

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ЯТ – ядерное топливо.

ЯТЦ – ядерно-топливный цикл.

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент.

ЯЭУ – ядерно-энергетическая установка.

АЭС – атомная электростанция.

ИРТ – исследовательский реактор типовой.

IMF – inert matrix fuel.

ДЯТ – дисперсионное ядерное топливо.

ВНР – водный нитратный раствор.

ВОНР – водно-органический нитратный раствор.

ОК – оксидная композиция.

ВЧФ-плазмотрон – высокочастотный факельный плазмотрон.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Дисперсионное ядерное топливо

Значительную часть атомной энергетики в двадцать первом веке еще будут составлять АЭС, использующие керамическое ядерное топливо (ЯТ) из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, у которого наряду с несомненными достоинствами есть и существенные недостатки: низкая теплопроводность, которая ограничивает удельную мощность реактора по температуре плавления, хрупкость и склонность к растрескиванию, короткий цикл использования (до 3–5 лет), невозможность создания энергетических установок сверхмалой (до 10 МВт) и малой (10–100 МВт) мощности, большие расходы на утилизацию отработавшего ЯТ, ограниченный ресурс изотопа уран-235 [1].

При использовании изотопов уран-238, торий-232 и плутоний-239 отпадает необходимость в дорогостоящем изотопном обогащении, а цикл использования такого ЯТ может быть доведен до 10–15 лет. При этом прогнозных запасов тория в земной коре в 3–5 раз больше, чем урана, а использование керамического ЯТ из оксидных композиций на основе тория даст возможность создания сверхмалых и малых энергетических установок для использования в удаленных и труднодоступных регионах, на рудниках и карьерах. Однако у керамического ЯТ остается существенный недостаток – низкая теплопроводность.

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 металлов [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	$7,0 \cdot 10^{-2}$
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.

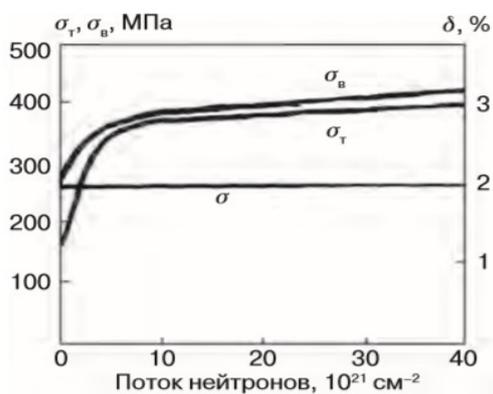
Для повышения механических свойств алюминия его легируют магнием, цинком, кремнием, медью, серебром, литием и галлием. Наибольший эффект повышения механических свойств алюминия достигается при одновременном легировании несколькими элементами. Сплавы алюминия после термообработки с дисперсионным твердением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

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

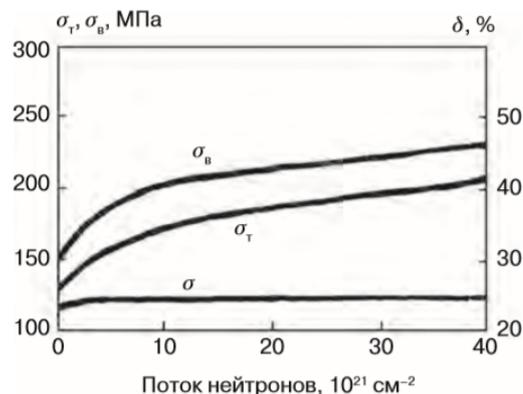
Марка сплава	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
	До/после облучения	До/после облучения	До/после облучения
АД1	95/180	47/120	38/21
САВ – 1	290/330	245/280	11/10
6061 (США)	315/350	270/310	17,5/16

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].



а)



б)

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 $(3-5) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$. 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 ($T > 862$ °С), β ($T = 862$ – 1855 °С) и нестабильная ω -фаза ($P > 6$ 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.

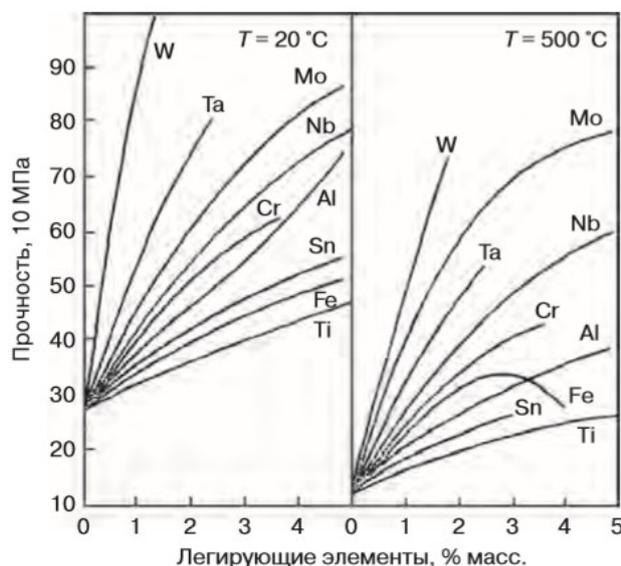


Рисунок 2. Влияние содержания легирующих элементов на прочность циркония при различных температурах

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 сложнолегированные 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].

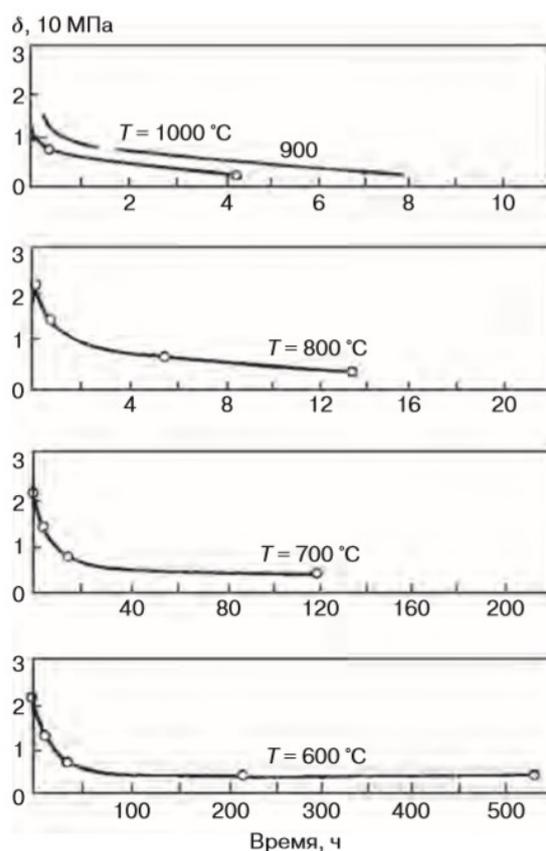


Рисунок 3. Длительная прочность никеля при различной температуре

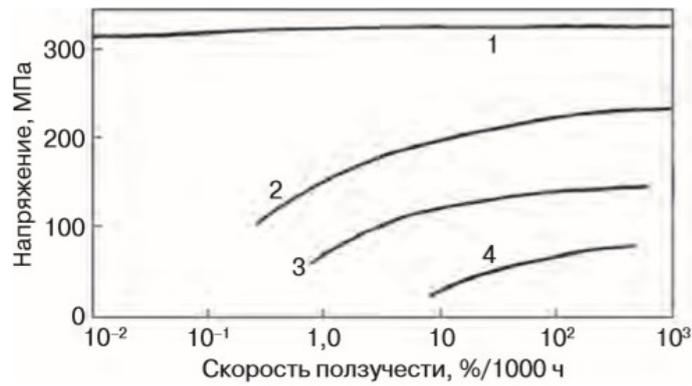


Рисунок 4. Влияние напряжения на скорость ползучести никеля при различной температуре, °С: 1 – 250, 2 – 270, 3 – 480, 4 – 650

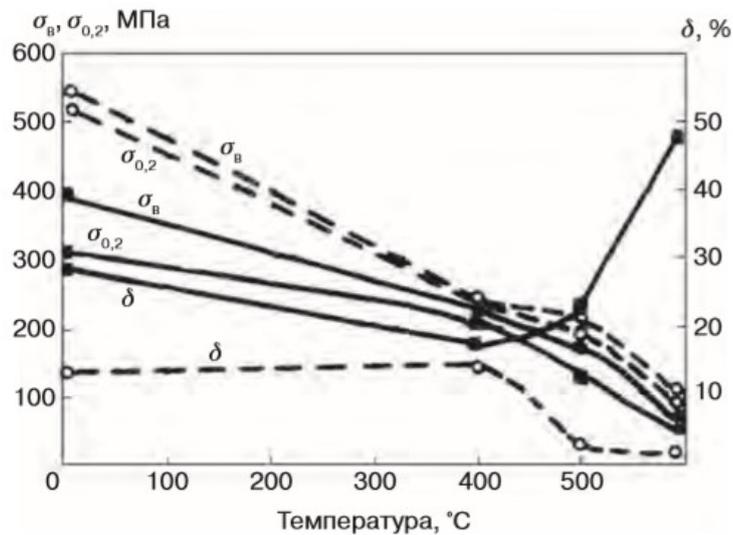


Рисунок 5. Влияние температуры на механические свойства технического никеля: (—) необлученного, (---) облученного

Изучение влияния нейтронного облучения в реакторе на механические свойства никеля показало резкое падение пластичности у облученного никеля при температуре 600 °С 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 °С. Согласно данным рисунка 5, до температуры 400 °С, 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 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и зависит от содержания легирующих компонентов [11]. Среднее значение коэффициента линейного расширения для чистого магния в интервале температур $20\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$ равно $26,86 \cdot 10^{-6}$.

Коэффициент теплопроводности магния при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ равен $172\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$. На рисунке 6 показано влияние температуры на изменение коэффициента теплопроводности магния [11].

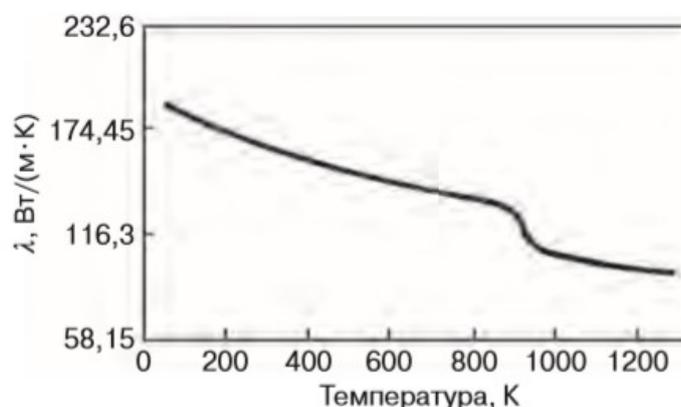


Рисунок 6. Влияние температуры на коэффициент теплопроводности магния

Из-за недостаточно высоких механических свойств магний не может быть использован в качестве конструкционного материала. Для повышения механических свойств магний легируют. Магниево-алюминиевые сплавы обладают выгодным сочетанием плотности и механических свойств. Плотность магниевых сплавов ($1,8\text{--}1,9\text{ г}/\text{см}^3$) 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.

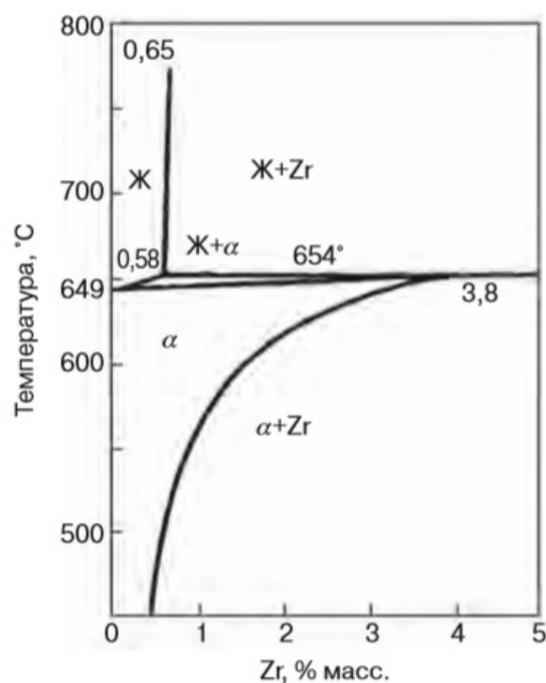


Рисунок 7. Участок диаграммы Mg-Zr

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 4 (Приложение Г) приведены физико-механические свойства оксидных материалов.

Из анализа данных (таблица 4) 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 $2640\text{ }^\circ\text{C}$;
- 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 альювалентными 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 – $1,6\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ при $1500\text{ }^\circ\text{C}$ [16].

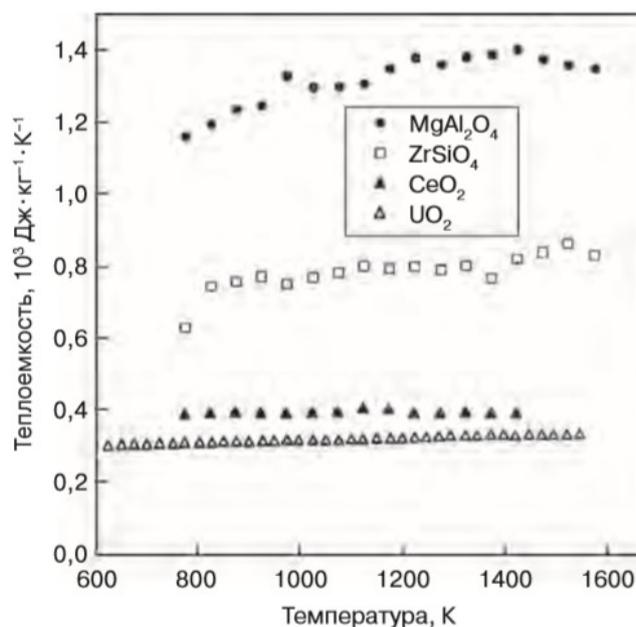


Рисунок 8. Влияние температуры на изменение теплоемкости MgAl₂O₄, ZrSiO₄ и CeO₂

На рисунке 8 приведены данные исследований влияния температуры на изменение теплоемкости шпинели, циркона и оксида церия в сравнении с UO₂, 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. Некоторые свойства нитридов приведены в таблице 5 (Приложение Д).

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].

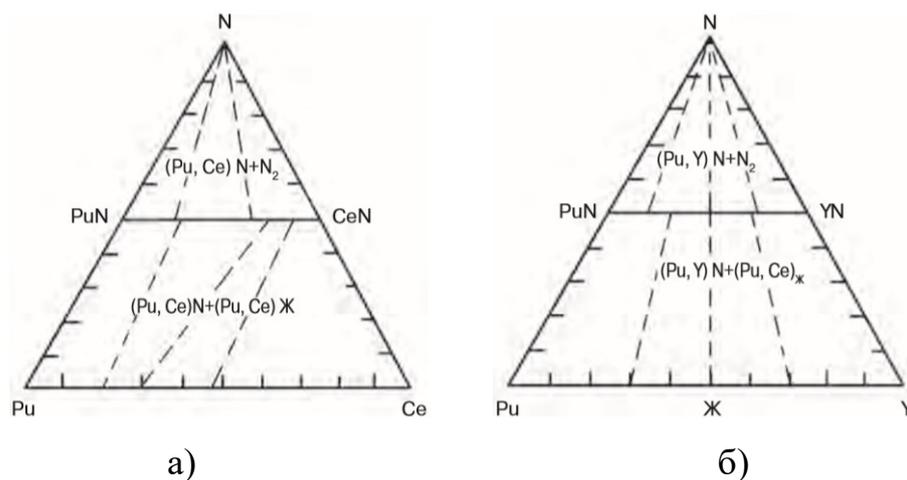


Рисунок 9. Изотермические сечения (1600 °С): система Pu-Ce-N (а); система Pu-Y-N (б)

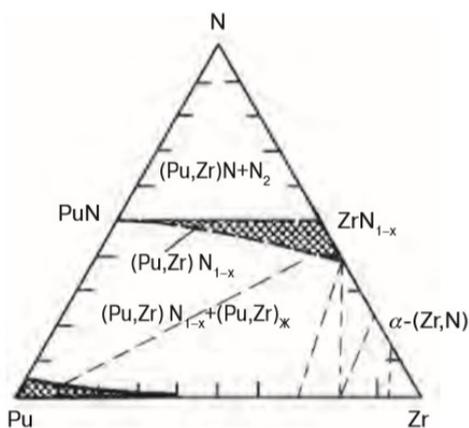


Рисунок 10. Изотермические сечения системы Pu-Zr-N (1500 °С)

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 ($\approx 31\%$ мол.) растворимости в PuN. Нитриды хрома (CrN) имеют высокое парциальное давление азота (≈ 1 мм рт. ст. при 1048 °С), 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

Основные особенности золь-гель процесса заключаются в использовании свойств коллоидных растворов, т.е. растворов, состоящих из твердых частиц субмикронного размера, диспергированных в жидкой фазе. Процесс состоит из трех основных операций: приготовление коллоидных растворов диоксида урана (золя), преобразования и сушки [21].

Коллоидные растворы могут быть получены методом пептизации, диализа, электродиализа или экстракцией аминами. Для получения частиц сферической формы гелеобразование проводят диспергированием золя в органическую жидкую фазу. Образование микросфер происходит под действием сил поверхностного натяжения. Полученный из золя гель состоит из высокоактивных микрокристаллитов, что позволяет снизить температуру спекания на $200-300^{\circ}\text{C}$ по сравнению с обычно используемой для UO_2 [22].

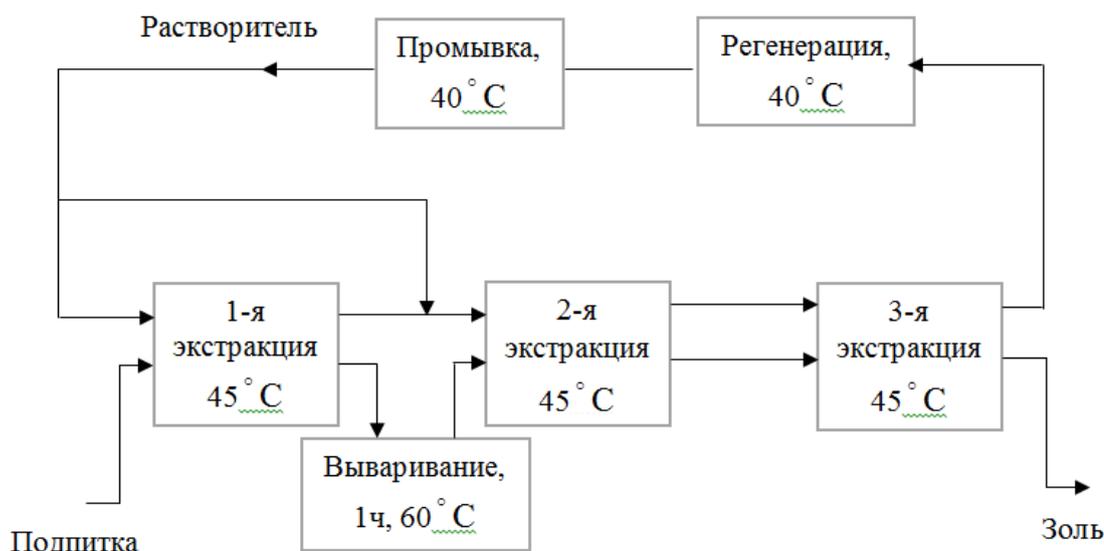


Рисунок 11. Схема процесса приготовления золя из диоксида урана экстракцией растворителя

Исходным материалом для приготовления микросфер являются азотнокислые растворы урана. Используется несколько модификаций золь-гель процесса. В одном из методов используется экстракционный процесс получения золя UO_2 основанный на способности аминов экстрагировать кислоты и комплексы металлов из водных растворов. Амины применяют для денитрации и для приготовления коллоидных суспензий, содержащих уран. Разработан трех- и двухстадийный экстракционный процесс для получения окисного золя UO_3 прямо из водных растворов, содержащих нитраты уранила. Нитрат удаляется из водного раствора экстракцией амином, растворенным в инертном разбавителе. Водная фаза при первой и второй экстракции выдерживается при 95–100 °С [22]. Амин регенерируется водой. Разбавленный золь концентрируют упариванием при температуры не выше 35 °С [22]. Гелирование – образование микросфер проводят методом дегидратации. Диспергированный на капли золь вводится в 2-этилгексанол, где они по мере экстракции воды превращаются в твердые микросферы. Капли золя вводят в коническую колонну, где они поддерживаются во взвешенном состоянии потоком 2-этиленгексанола. По мере экстракции воды частицы оседают вниз. Твердые частицы отщипывают от экстрагента, сушат, прокалывают и спекают. Свежий и очищенный 2-этилгексанол непрерывно добавляют в колонну. Вода из экстрагента удаляется дистилляцией. Для получения однородный по размеру капель золя используют диспергаторы различных конструкций.

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, отдельное 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].

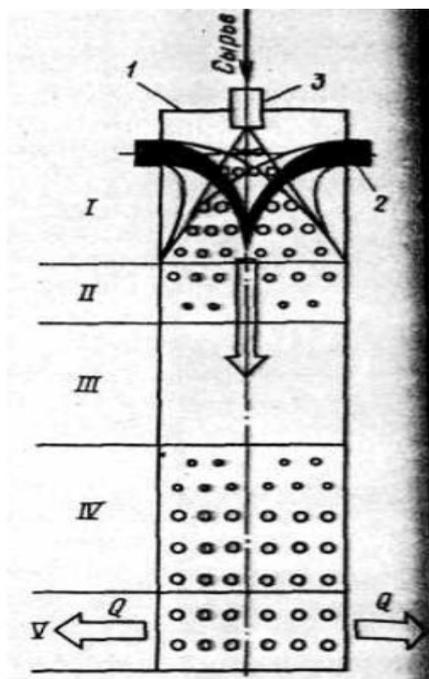


Рисунок 12. Схема плазменной переработки диспергированных растворов:

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

Исходный раствор диспергируется и подается в плазменную струю. Высокая дисперсность капель способствует их более быстрой и глубокой

переработке. Образование целевого продукта может достигаться двумя путями. Первый заключается в том, что капли раствора полностью испаряются, в газовой фазе протекают гомогенные химические реакции, а при охлаждении реакционных газов происходит формирование наноразмерных частиц целевого продукта. Второй путь представляет собой формирование частиц за счет возникновения центров кристаллизации и их последующего роста непосредственно в жидкой капле исходного раствора, что может привести к образованию более крупных частиц.

В качестве исходного сырья применяют смесевые водные растворы или суспензии. 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 (26,1 % H₂O – 34,0 % C₂H₆O – 31,2 % UO₂(NO₃)₂·6H₂O – 8,7 % Mg(NO₃)₂·6H₂O) для композиции «95,0 % UO₂ – 5,0 % MgO»;

– ВОНР-2 (28,1 % H₂O – 29,0 % C₃H₆O – 33,5 % UO₂(NO₃)₂·6H₂O – 9,4 % Mg(NO₃)₂·6H₂O) для композиции «95,0 % UO₂ – 5,0 % MgO»;

– ВОНР-3 (28,4 % H₂O – 34,0 % C₂H₆O – 23,6 % UO₂(NO₃)₂·6H₂O – 14,0 % Mg(NO₃)₂·6H₂O) для композиции «90,0 % UO₂ – 10,0 % MgO»;

– ВОНР-4 (30,6 % H₂O – 29,0 % C₃H₆O – 25,4 % UO₂(NO₃)₂·6H₂O – 15,0 % Mg(NO₃)₂·6H₂O) для композиции «90,0 % UO₂ – 10,0 % MgO».

– ВОНР-5 (27,8 % H₂O – 34,0 % C₂H₆O – 24,6 % UO₂(NO₃)₂·6H₂O – 14,4 % Mg(NO₃)₂·6H₂O) для композиции «85,0 % UO₂ – 15,0 % MgO»;

– ВОНР-6 (29,9 % H₂O – 29,0 % C₃H₆O – 25,6 % UO₂(NO₃)₂·6H₂O – 15,5 % Mg(NO₃)₂·6H₂O) для композиции «85,0 % UO₂ – 15,0 % 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 (300–5000 К) и изменении значений исходной массовой доли плазменного теплоносителя (воздуха) в интервале (0,1–0,9).

ОК «UO₂–MgO»

На рисунках 13-15 показано влияние температуры на равновесные составы в конденсированных фазах основных продуктов плазменной обработки растворов ВОНР-1, ВОНР-3 и ВОНР-5 на основе этанола при массовой доле воздуха 72 % (а) и 74 % (б).

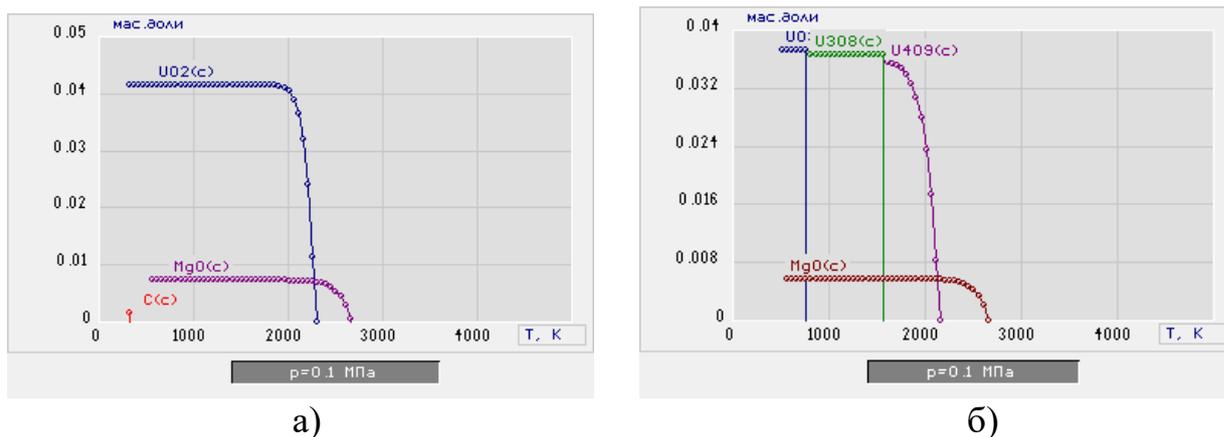
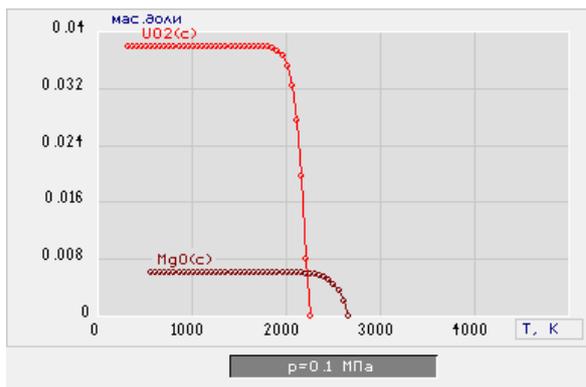
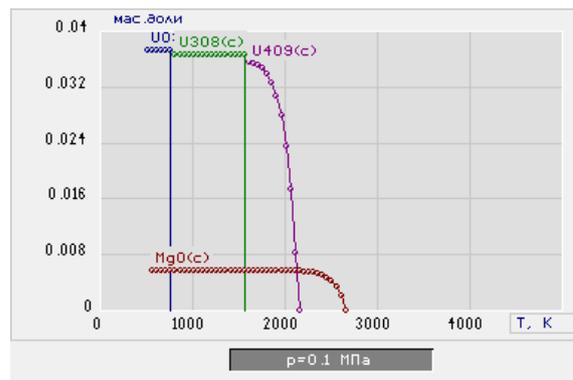


Рисунок 13. Влияние температуры на равновесный состав в конденсированных фазах основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-1 на основе этанола при массовой доле воздуха 72 % (а) и 74 % (б)

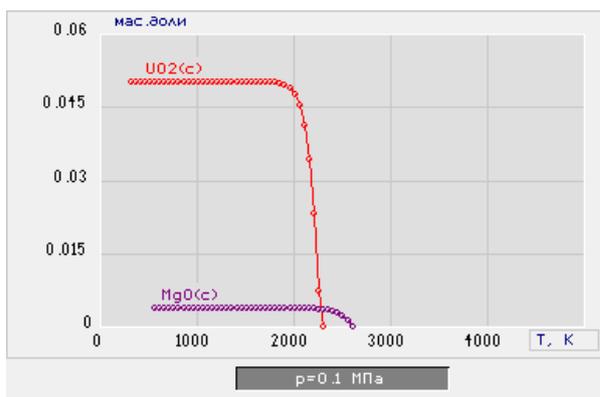


а)

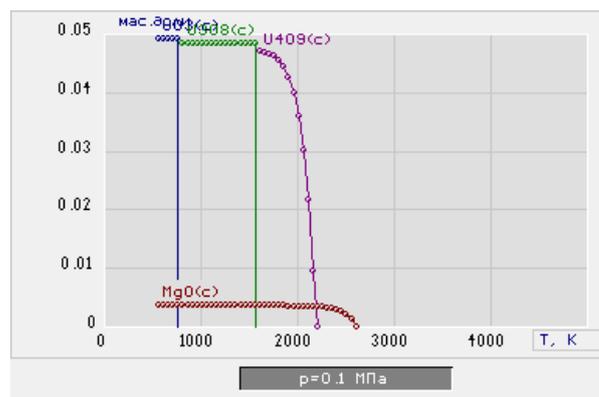


б)

Рисунок 14. Влияние температуры на равновесный состав в конденсированных фазах основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-3 на основе этанола при массовой доле воздуха 72 % (а) и 74 % (б)



а)



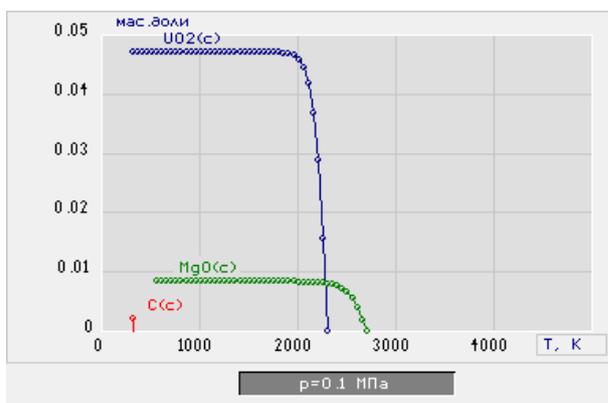
б)

Рисунок 15. Влияние температуры на равновесный состав в конденсированных фазах основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-5 на основе этанола при массовой доле воздуха 72 % (а) и 74 % (б)

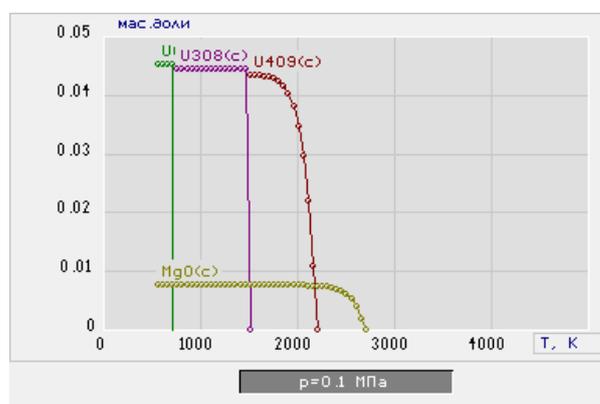
Анализ равновесных составов показывает, что плазменная обработка растворов ВОНР-1, ВОНР-3 и ВОНР-5 на основе этанола при массовой доле воздуха 72 % и температурах до 2000 К (рисунки 13а–15а) приводит к плазмохимическому синтезу в воздушной плазме требуемых ОК: «95,0 %

UO₂ – 5,0 % MgO», «90,0 % UO₂ – 10,0 % MgO» и «85,0 % UO₂ – 15,0 % MgO». Снижение доли воздуха ниже 72 % приводит к образованию и повышению в составе продуктов содержания углерода в конденсированной фазе C(c), а повышение доли воздуха с 72 % до 74 % (рисунки 136–156) приводит в интервале температур 1000–1600 К к образованию ОК «U₃O₈–MgO» вместо требуемой «UO₂–MgO».

На рисунках 16–18 показано влияние температуры на равновесные составы в конденсированных фазах основных продуктов плазменной обработки растворов ВОНР-2, ВОНР-4 и ВОНР-6 на основе ацетона при массовой доле воздуха 69 % (а) и 71 % (б).

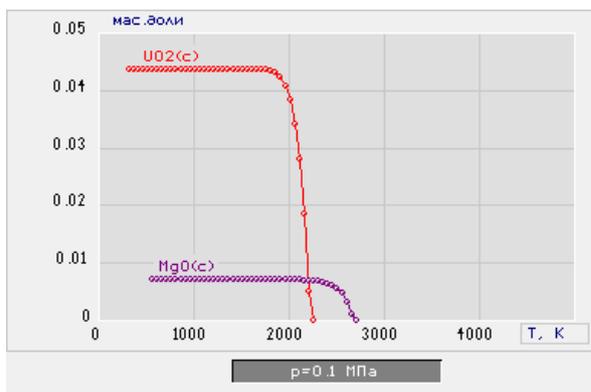


а)

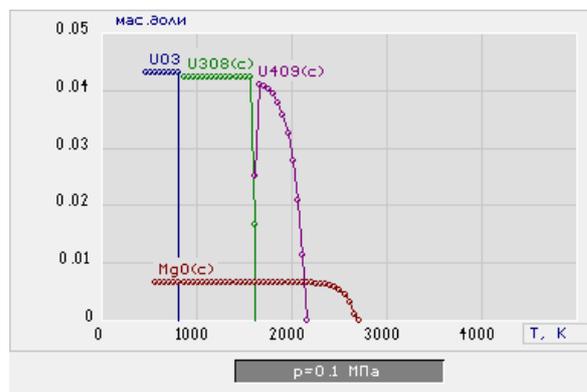


б)

Рисунок 16. Влияние температуры на равновесный состав в конденсированных фазах основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-2 на основе ацетона при массовой доле воздуха 69 % (а) и 71 % (б)

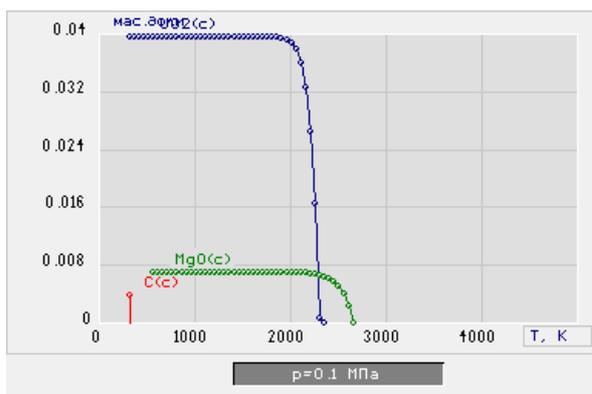


а)

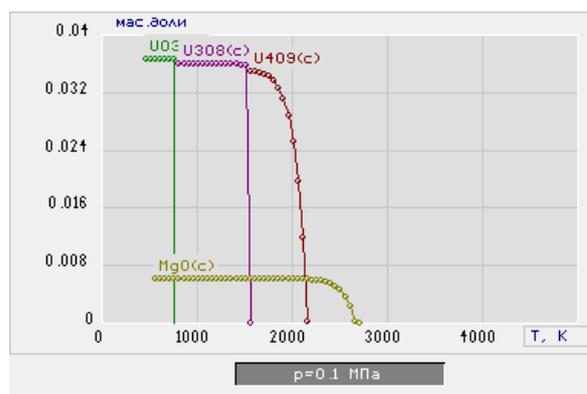


б)

Рисунок 17. Влияние температуры на равновесный состав в конденсированных фазах основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-4 на основе ацетона при массовой доле воздуха 69 % (а) и 71 %



а)



б)

Рисунок 18. Влияние температуры на равновесный состав в конденсированных фазах основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-6 на основе ацетона при массовой доле воздуха 69 % (а) и 71 %

Из анализа равновесных составов следует, что плазменная обработка растворов ВОНР-2, ВОНР-4 и ВОНР-6 на основе ацетона при массовой доле воздуха 69 % и температурах до 2000 К (рисунки 16а–18а) также приводит к плазмохимическому синтезу в воздушной плазме требуемых ОК: «85,0 % UO_2 – 15,0 % MgO », «90,0 % UO_2 – 10,0 % MgO », «95,0 % UO_2 – 5,0 % MgO ».

Снижение доли воздуха ниже 69 % приводит к образованию и повышению в составе продуктов содержания углерода в конденсированной фазе С(с), а повышение доли воздуха до 71 % (рисунки 16б–18б) приводит в интервале температур 1000–1600 К к образованию ОК «U₃O₈–MgO» вместо требуемой «UO₂–MgO». Следует отметить, что замена этанола на ацетон приводит к снижению массовой доли воздуха (увеличению массовой доли обрабатываемого раствора ВОНР) при получении требуемых ОК и ведет к повышению производительности процесса. Учитывая, что ацетон имеет более высокую низшую теплотворную способность (30,5 МДж/кг) по сравнению с этанолом (26,8 МДж/кг), его использование в качестве органического компонента растворов ВОНР является предпочтительным.

ОК «UO₂–BeO»

На рисунках 19–20 показано влияние температуры на равновесные составы в конденсированных фазах основных продуктов плазменной обработки растворов ВОНР-17 и ВОНР-19 на основе этанола при массовой доле воздуха 72 % (а) и 74 % (б).

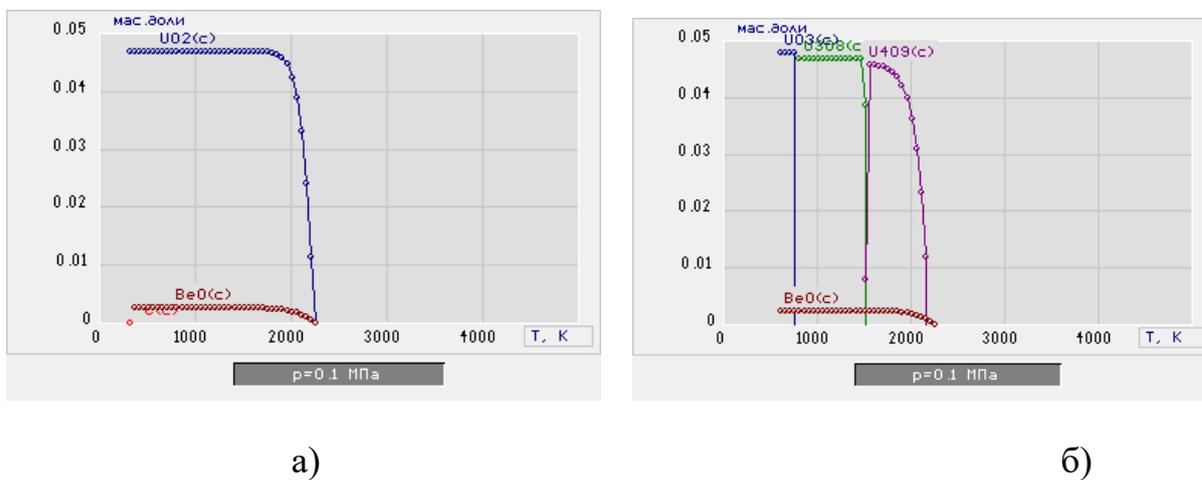
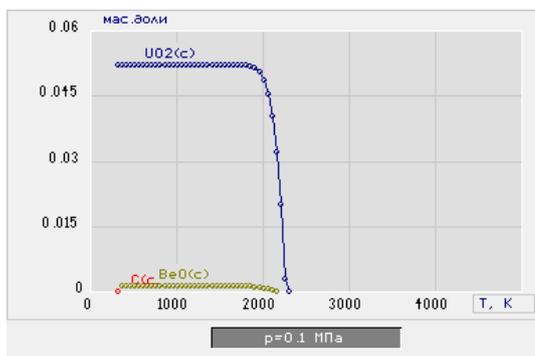
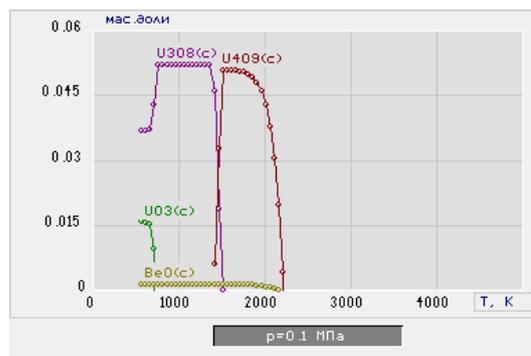


Рисунок 19. Влияние температуры на равновесный состав в конденсированных фазах основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-17 на основе этанола при массовой доле воздуха 72 % (а) и 73 % (б).



а)



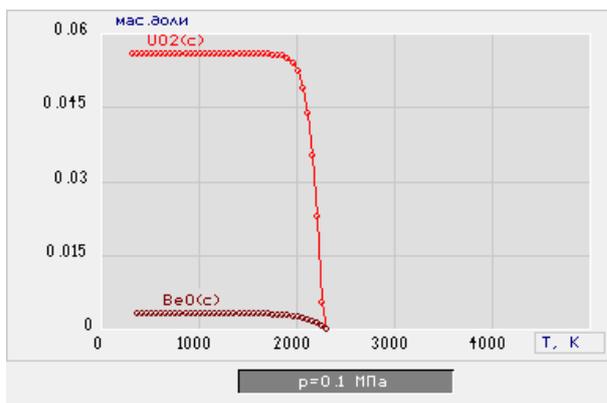
б)

Рисунок 20. Влияние температуры на равновесный состав в конденсированных фазах основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-19 на основе этанола при массовой доле воздуха

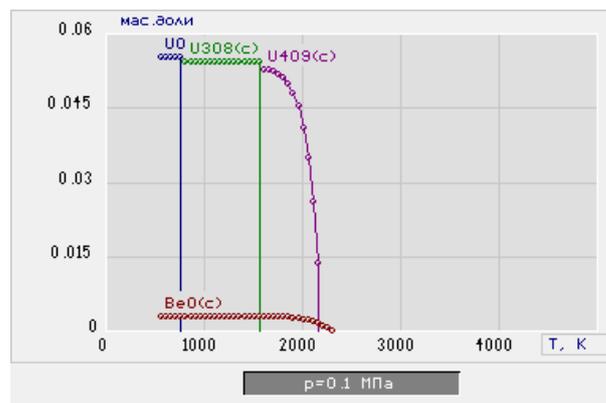
72 % (а) и 74 % (б)

Анализ равновесных составов показывает, что плазменная обработка растворов ВОНР-17 и ВОНР-19 на основе этанола при массовой доле воздуха 72 % и температурах до 2000 К (рисунки 19а–20а) приводит к плазмохимическому синтезу в воздушной плазме требуемых ОК: «95,8 % UO_2 – 4,2 % BeO » и «97,9 % UO_2 – 2,1 % BeO ». Снижение доли воздуха ниже 72 % приводит к образованию и повышению в составе продуктов содержания углерода в конденсированной фазе С(с), а повышение доли воздуха с 72 % до 74 % (рисунки 19б–20б) приводит в интервале температур 1000–1600 К к образованию ОК « U_3O_8 – BeO » вместо требуемой « UO_2 – BeO ».

На рисунках 21–22 показано влияние температуры на равновесные составы в конденсированных фазах основных продуктов плазменной обработки растворов ВОНР-18 и ВОНР-20 на основе ацетона при массовой доле воздуха 69 % (а) и 71 % (б).



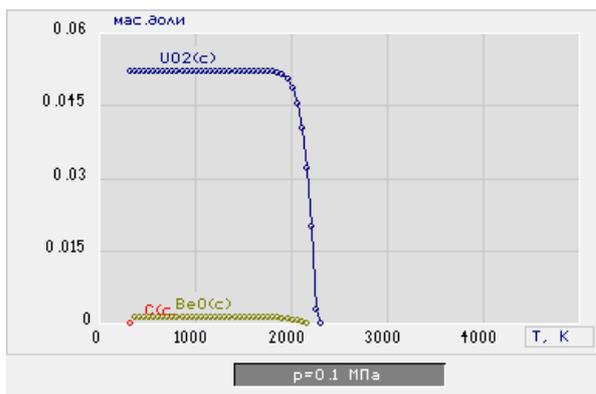
а)



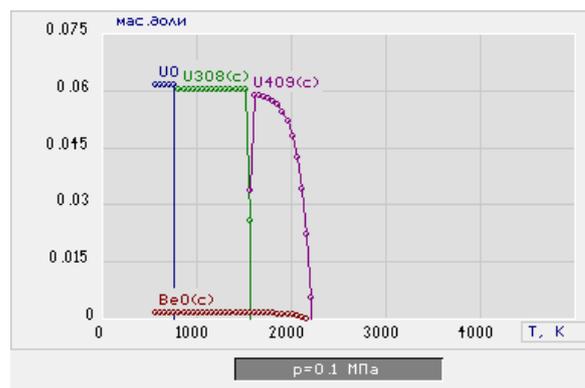
б)

Рисунок 21. Влияние температуры на равновесный состав в конденсированных фазах основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-18 на основе ацетона при массовой доле воздуха

69 % (а) и 71 % (б)



а)



б)

Рисунок 22. Влияние температуры на равновесный состав в конденсированных фазах основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-20 на основе ацетона при массовой доле воздуха

69 % (а) и 71 % (б)

Из анализа равновесных составов следует, что плазменная обработка растворов ВОНР-18 и ВОНР-20 на основе ацетона при массовой доле воздуха 69 % и температурах до 2000 К (рисунки 21а–22а) также приводит к плазмохимическому синтезу в воздушной плазме требуемых ОК: «95,8 % UO_2 – 4,2 % BeO » и «97,9 % UO_2 – 2,1 % BeO ». Снижение доли воздуха ниже

69 % также приводит к образованию и повышению в составе продуктов содержания углерода в конденсированной фазе $C(s)$, а повышение доли воздуха до 71 % (рисунки 21б-22б) приводит в интервале температур 1000-1600 К к образованию ОК « U_3O_8-MgO » вместо требуемой « UO_2-BeO ».

Следует также отметить, что замена этанола на ацетон приводит к снижению массовой доли воздуха (увеличению массовой доли обрабатываемого раствора ВОНР) при получении требуемых ОК и ведет к повышению производительности процесса. Учитывая, что ацетон имеет более высокую низшую теплотворную способность (30,5 МДж/кг) по сравнению с этанолом (26,8 МДж/кг), его использование в качестве органического компонента растворов ВОНР является предпочтительным.

2.3 Используемые модели для расчета коэффициентов теплопроводности композиционных материалов в виде сложных оксидных композиций

Для расчета теплопроводности композиционного материала λ использовалась элементарная ячейка (рисунок 23), коэффициент теплопроводности которой зависит от коэффициента теплопроводности материала матрицы λ_1 и коэффициента теплопроводности материала включения λ_2 . Для эффективного отвода тепла от включения необходимо выполнение условия $\lambda_1 > \lambda_2$.

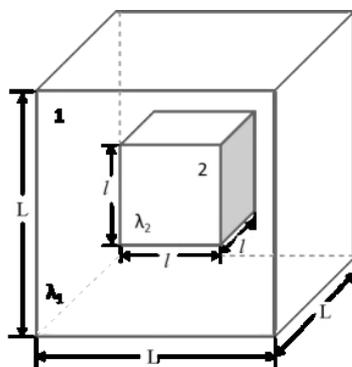


Рисунок 23. Элементарная ячейка оксидной композиции: блок 1 – матрица (MgO), блок 2 – включение (UO_2)

Ниже представлены уравнения для расчета λ с использованием различных моделей. Для описания модели с замкнутыми включениями с дроблением ячейки адиабатическими (непроницаемыми для линий тока) плоскостями (ВАД) используется уравнение [25]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{v - (v-1) \cdot (1 - m_2^{2/3}) \cdot m_2^{1/3}}{v - m_2^{1/3} \cdot (v-1)} \quad (2)$$

где m_2 – объемную концентрацию материала блока 2 и v – отношение коэффициентов теплопроводности λ_2 к λ_1 – можно выразить по формулам:

$$m_2 = \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{l}{L}\right)^3, \quad v = \frac{\lambda_2}{\lambda_1},$$

где λ_1 и λ_2 – соответственно коэффициенты теплопроводности материалов непрерывной компоненты блока 1 и включения блока 2, L – размер блока 1, l – размер блока 2, V_1 – объем блока 1, V_2 – объем блока 2.

Модель с замкнутыми включениями с дроблением ячейки изотермическими (проницаемыми для линий тока) плоскостями (ВИД) описывается уравнением [25]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{1 + (v-1) \cdot m_2^{2/3}}{1 + (v-1) \cdot m_2^{2/3} \cdot (1 - m_2^{1/3})} \quad (3)$$

Предложено применять для расчета эффективной теплопроводности смесей с замкнутыми включениями уравнение (модель Оделевского):

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = 1 - \frac{m_2}{\frac{1}{1-v} - \frac{1-m_2}{3}} \quad (4)$$

В работах Лихтенеккера исследуется теплопроводность различных упорядоченных структур с включениями, в которых описываются два типа структур: равноправные и неравноправные [26]. В структуре с неравноправными компонентами форма включения может быть квадратной или эллиптической (на плоскости), а также параллелепипедной, сферической или эллипсоидной (в пространстве). Лихтенеккер вводит понятие пластины,

под которым понимают плоскую границу между двумя материалами: матрицей и включением. Если тепловой поток направлен параллельно пластине, то говорят о ее параллельной ориентации, если перпендикулярно – соответственно о перпендикулярной ориентации [25].

Модель обобщенной теплопроводности Лихтенеккера для смесей с неравноправными компонентами при параллельной ориентации пластин (ЛихтеПАР) описывается уравнением [25]:

$$\lambda_{//} = (1 - m_2) \cdot \lambda_1 + m_2 \cdot \lambda_2 \quad (5)$$

Для описания модели обобщенной проводимости Лихтенеккера для смесей с неравноправными компонентами при перпендикулярной ориентации пластин (ЛихтеПЕР) описывается уравнением [25]:

$$\lambda_{\perp} = \left(\frac{1 - m_2}{\lambda_1} + \frac{m_2}{\lambda_2} \right)^{-1} \quad (6)$$

Модель обобщенной теплопроводности Лихтенеккера для смесей с равноправными (форма включения – квадрат) компонентами (Лихте2) описывается уравнением [25]:

$$\lambda = \lambda_1^{1 - m_2} \cdot \lambda_2^{m_2} \quad (7)$$

В случае, когда смесь состоит из трех или более компонентов, применяется модель для многокомпонентных смесей, которая описывается уравнением [25]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \left\{ \frac{m_2}{1 - m_1} \left[1 - \frac{1 - m_1}{\frac{1}{1 - v_{12}} - \frac{m_1}{3}} \right] + \frac{m_3}{1 - m_1} \left[1 - \frac{1 - m_1}{\frac{1}{1 - v_{13}} - \frac{m_1}{3}} \right] \right\} \quad (8)$$

где v_{12} – отношение коэффициентов теплопроводности λ_2 к λ_1 , v_{13} – отношение коэффициентов теплопроводности λ_3 к λ_1 .

2.4 Результаты расчетов коэффициентов теплопроводности композиционного материала в виде сложных оксидных композиций «диоксид урана–оксид магния» и их обсуждение

Для проверки адекватности моделей были проведены расчеты коэффициентов теплопроводности λ для элементарных ячеек, состоящих из матрицы в виде оксида магния (блок 1) и включения в виде диоксида урана (блок 2) и их сравнение с экспериментальными данными.

В таблице 5 и на рисунке 24 представлены экспериментальные данные и результаты расчетов λ для диоксида урана и различных по составу композиционных материалов в виде сложных оксидных композиций «диоксид урана–оксид магния», полученные с использованием модели обобщенной теплопроводности Лихтенеккера для смесей с равноправными компонентами (модель Лихте 2).

Таблица 5 – Влияние температуры на коэффициент теплопроводности λ композиционного материала в виде сложных оксидных композиций «диоксид урана–оксид магния»

Состав оксидной композиции	λ , Вт/(м·К)					
	600 К	800 К	1000 К	1200 К	1400 К	1600 К
100 % UO_2 (экспер.)	5,38	4,10	3,65	3,00	2,15	1,77
95 % UO_2 –5 % MgO (расч.)	6,01	4,60	3,99	3,30	2,37	1,97
95 % UO_2 –5 % MgO (экспер.)	5,80	4,60	3,90	3,30	2,90	2,60
90 % UO_2 –10 % MgO (расч.)	6,72	5,05	4,36	3,50	2,62	2,19
90 % UO_2 –10 % MgO (экспер.)	6,00	4,85	4,05	3,50	3,00	2,70
85 % UO_2 –15 % MgO (расч.)	7,52	5,59	4,77	3,90	2,88	2,43
85 % UO_2 –15 % MgO (экспер.)	6,60	5,30	4,45	3,70	3,20	3,00

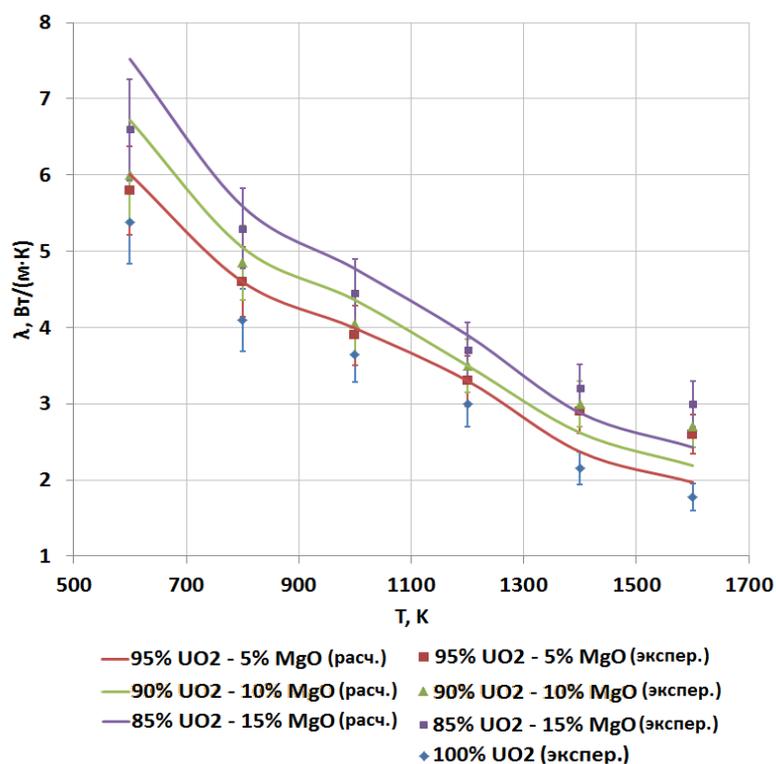


Рисунок 24 – Влияние температуры на коэффициент теплопроводности λ композиционного материала в виде сложных оксидных композиций «диоксид урана–оксид магния»

Из анализа данных таблицы 5 и полученных графиков (рисунок 24) следует, что модель обобщенной теплопроводности Лихте 2 наиболее точно описывает экспериментальные данные для коэффициента теплопроводности λ композиционных материалов в виде оксидных композиций «диоксид урана–оксид магния» различного состава.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Описание плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона

Экспериментальные исследования с целью наработки опытных партий оксидных порошков из модельных СНР осуществлялись с использованием плазмохимической установки. Установка разработана для осуществления процессов плазменной обработки диспергированных водно-солевых растворов различного состава в плазме высокочастотного факельного разряда, где плазменным теплоносителем выступает воздух. Схема установки приведена в приложении Б.

Высокочастотный ток подается от высокочастотного генератора через коаксиальный вывод 6 к электроду 4, выполненному из меди и охлаждаемому водой. Электрод конструкционно располагается в ВЧФ-плазмотроне 3, который непосредственно генерирует плазменную струю (среднемассовая температура ≈ 4000 К). Плазменная струя горит внутри разрядной камеры плазмотрона, которая изготовлена из кварцевого стекла ($d = 50$ мм, $l = 860$ мм).

Мощный вентилятор 9 производит откачку воздуха через газоход из следующих узлов плазмохимической установки: ВЧФ-плазмотрон 3 и плазмохимический реактор.

Над плазмохимическим реактором располагается импеллер, который имеет пропускную площадь $S_{\text{ип}} = 25$ см². Конструкционно импеллер необходим для осуществления закрутки входного потока, который прокачивается через реактор. Над импеллером находится шибер 7, позволяющий контролировать расход прокачиваемого воздуха. Входная площадь реакторного шибера $S_{\text{шиб}}$ регулируется в интервале 0–1650 см².

Для контроля концентрации вредных газообразных веществ (например, CO, NO, NO₂) в отходящих газах используется газоанализатор 11, снабженный пробоотборником 12. Дополнительно при помощи газоанализатора и трубки Пито возможно определять такие параметры

воздушного потока, как напор, скорость и расход. Для контроля температуры воздушно-плазменного потока в плазмохимической реакторе используется бесконтактный пирометр 14.

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 f входящего потока по следующему выражению:

$$f = \frac{(\rho V^2)}{2} = P_{\Pi} - P_{CT} \quad (9)$$

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 :

$$V = \left[\frac{2 \cdot (P_{\Pi} - P_{CT})}{\rho} \right]^{0,5} \quad (10)$$

Величина объёмного расхода воздуха через воздуховод определяется выражением:

$$Q = S \cdot V \quad (11)$$

где S – площадь поперечного сечения воздуховода.

Результаты экспериментальных исследований с расчетом указанных выше параметров представлены в таблицах Б13 и Б14 приложения Б. Полученные данные были обработаны и построены графики зависимостей расхода плазменного теплоносителя через плазмотрон ($Q_{ПТ}$), и газоход ($Q_{ГХД}$) от входной площади реакторного шиберов. Влияние входной площади реакторного шиберов на объемные расходы воздуха через плазмотрон и газоход представлено на рисунках 3.1 и 3.2, а на массовые расходы – на рисунках Б4 и Б5 приложения Б.

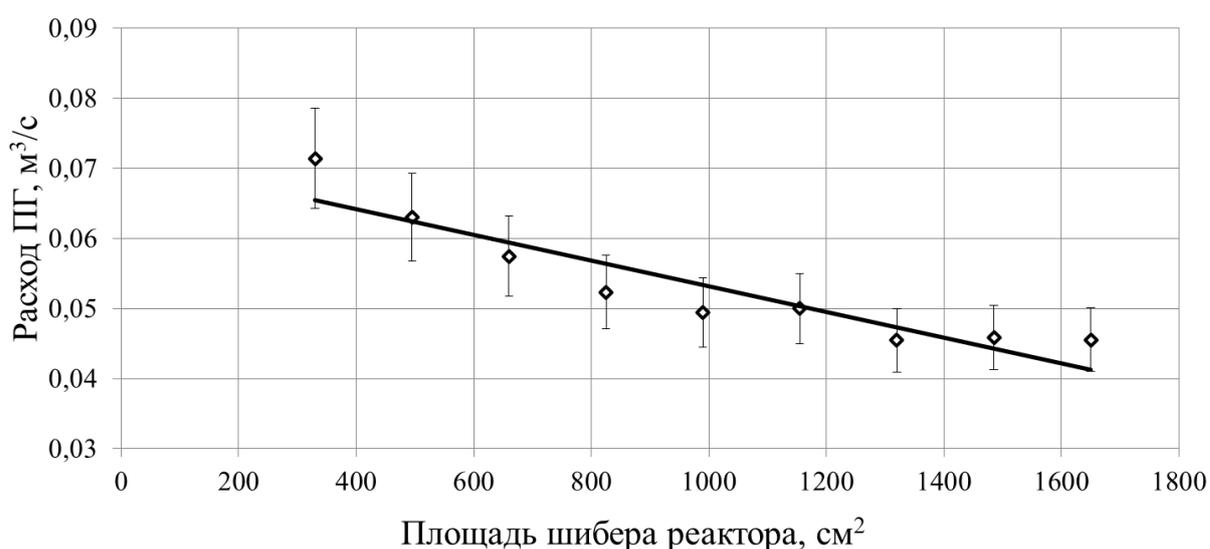


Рисунок 25. Влияние входной площади реакторного шиберов на объемный расход плазменного теплоносителя через ВЧФ-плазмотрон

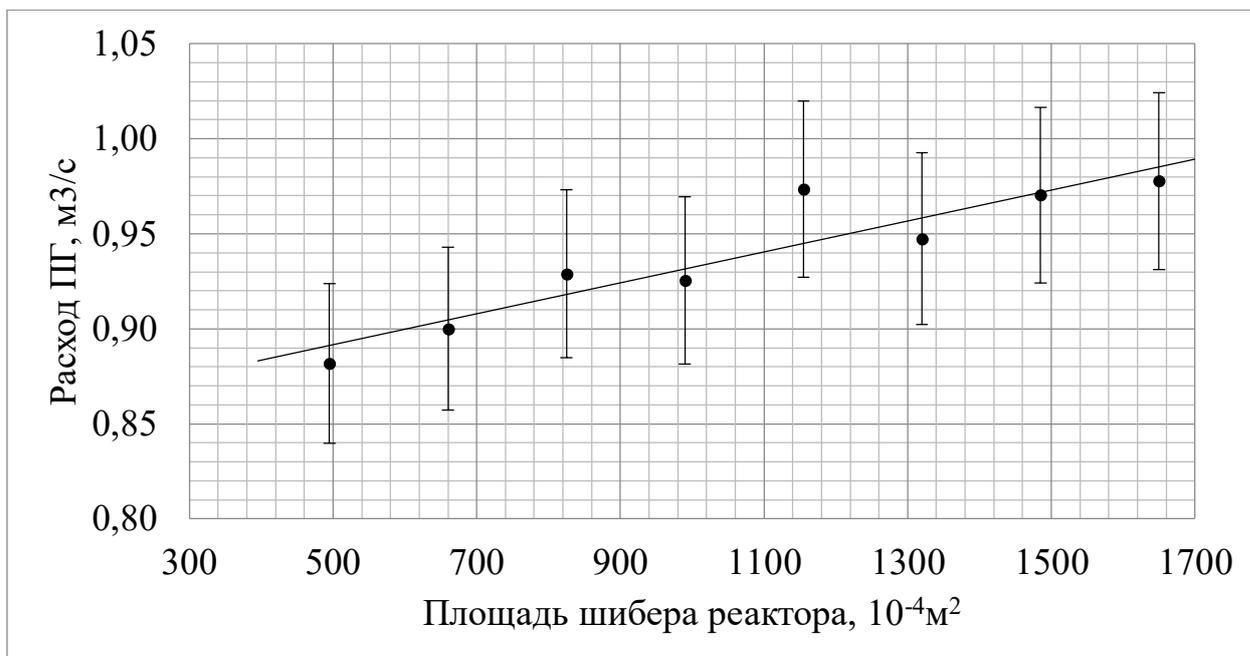


Рисунок 26. Влияние входной площади реакторного шибера на объемный расход плазмообразующего газа через газоход

Анализ полученных данных позволяет определить расход плазменного теплоносителя через плазмохимический реактор.

3.3 Определение расходов воздушного теплоносителя через реактор

Расход плазменного теплоносителя через плазмохимический реактор может быть вычислен косвенно. Для его расчета использовалась формула:

$$Q_P = Q_{ГХД} - Q_{ПТР} \quad (12)$$

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

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

$Q_{ПТР}$ – расход плазменного теплоносителя через плазмотрон, $\text{ м}^3/\text{ с}$.

На основе расчетов построены графики зависимости расходов плазменного теплоносителя через плазмохимический реактор в зависимости от входной площади реакторного шибера. Полученные зависимости представлены на рисунках 27 и 28.

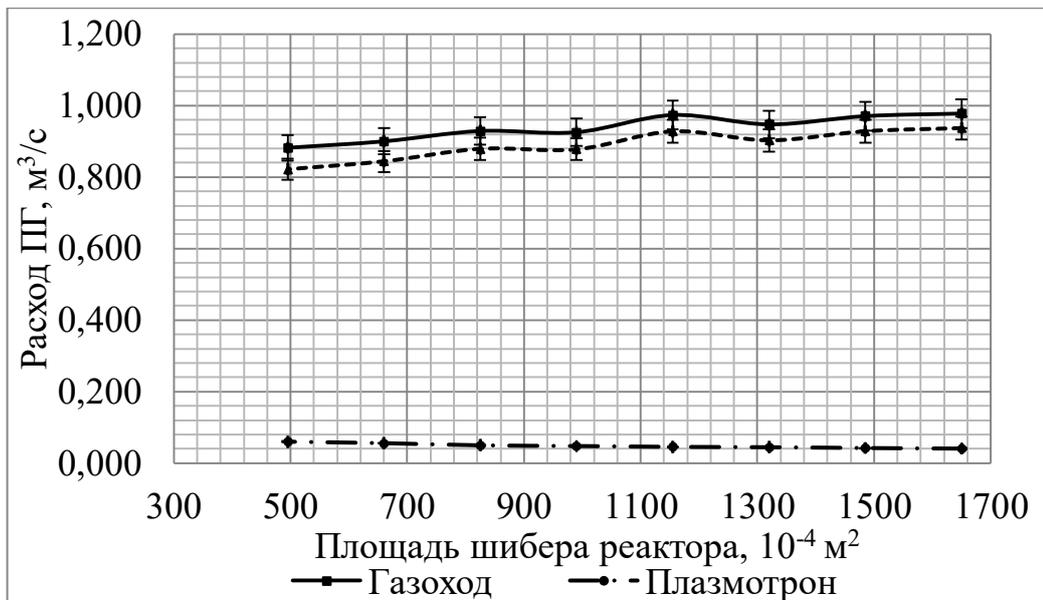


Рисунок 27. Влияние входной площади импеллера реактора на объемный расход воздушного теплоносителя через реактор

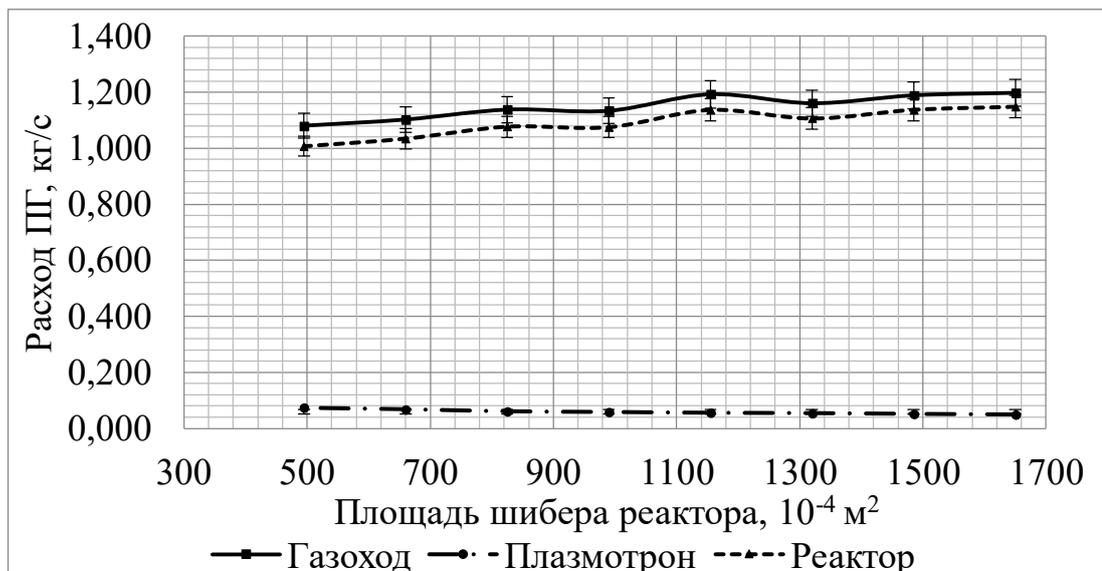


Рисунок 28. Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход через реактор

Изменение шибром входной площади позволяет осуществлять плавную регулировку расхода плазменного теплоносителя через реактор и плазмотрон.

3.4 Плазмохимическая переработка модельных растворов ВОНР

Для исследования возможности проведения процесса синтеза порошков высокой степени дисперсности в воздушной высокочастотной плазме в форме гомогенных по составу уран-ториевых оксидных композиций было проведено экспериментальное изучение процесса на модельных азотнокислых растворах с использованием имитаторов. Для подготовки модельных растворов использовались нитрат неодима $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (имитатор нитрата уранила) и нитрата магния $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Использование азотнокислого 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.

В таблице 6 представлен состав модельной ВСОК.

Таблица 6. Соотношение компонентов перерабатываемой ВСОК

Массовое отношение фаз	Соль, %		H_2O , %	Ацетон, %
	$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$		
31% ВОНР/69 % воздух	29	12,6	29,9	29

Объем подготовленной модельной ВСОК составил 5 л.

Розжиг плазмохимического реактора осуществлялся воздушной плазменной струей ($T_{\text{стр}} \approx 565 \text{ K}$), на чистом горючем компоненте – ацетоне при анодном токе $I = 3,5 \text{ A}$ и площади реакторного шибера $S_{\text{шиб}} = 1320 \text{ см}^2$. После того, как в плазмохимическом реакторе устанавливалась температура на уровне $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, подача ацетона прекращалась и одновременно начиналась подача подготовленного модельного раствора ВОНР.

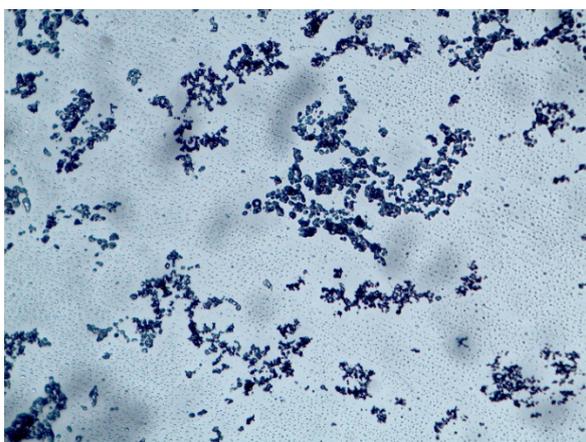
Раствор ВОНР поступал на вращающуюся от двигателя форсунку, которая конструкционно имела коническую форму. Форсунка диспергировала ВОНР в область горения плазменной струи, где капли

подвергались обработке в условиях высокочастотной воздушной плазмы. На первом этапе происходил их нагрев до температуры испарения растворителя (воды), затем наступала стадия испарения растворителя с повышением концентрации соли (градиент – в сторону центра капли). Кристаллизованная соль, оставшаяся без растворителя, продолжала нагреваться в плазменной струе до температуры термоллиза – процесса, при котором структура соли разрушается с высвобождением кислотного остатка в виде газа и образованием оксида.

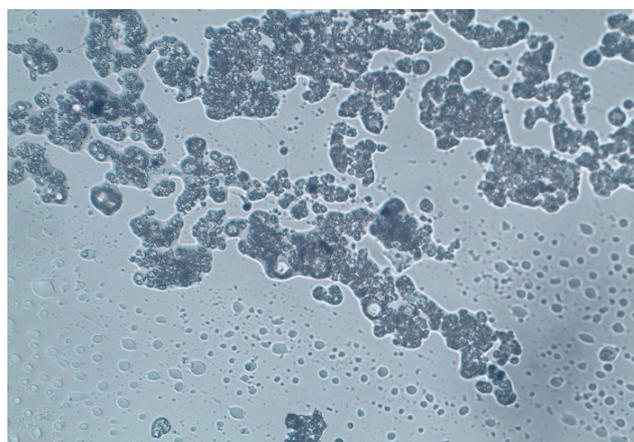
Образовавшиеся в плазмохимическом реакторе дисперсные оксидные продукты плазменной переработки модельных растворов ВОНР поступали в узел «мокрой» очистки (УМО) плазмохимического стенда. На данной стадии осуществлялась закалка продуктов реакции водой (объем 155 л). Осажденные водой порошки формировали водную суспензию.

После завершения эксперимента образовавшаяся суспензия перекачивалась насосом в осадительную емкость объемом 250 л. По прошествии некоторого времени порошок оседал на дно емкости. Осадок собирался, высушивался и отправлялся на анализ основных физико-химических свойств.

На рисунках 29 и 30 представлены микрофотографии полученных порошков, полученные с использованием микроскопа Motic BA 310.



а)



б)

Рисунок 29. Микрофотографии полученного порошка:

а) увеличение x10; б) увеличение x40

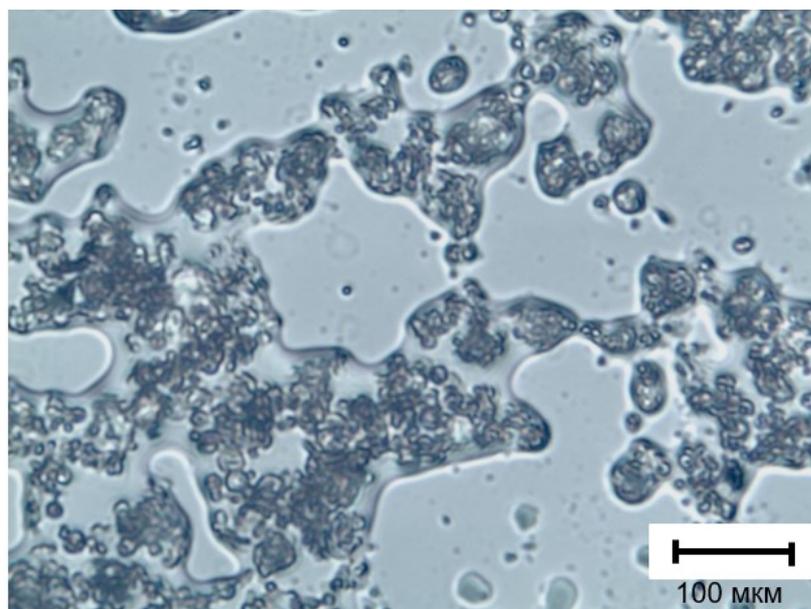


Рисунок 30. Микрофотографии порошка (увеличение x100)

Анализ результатов микроскопии позволяет утверждать, что полученные порошки имеют хорошую гомогенность по структуре. Следует отметить, что форма частиц однородна, но наблюдается образование рыхлых по структуре объемных агломератов.

Гранулометрический анализ (рисунок 31) с измерением распределения размера частиц порошка определялся на приборе DeslaMax PRO. Диапазон изменения прибора 0,4-10000 нм.

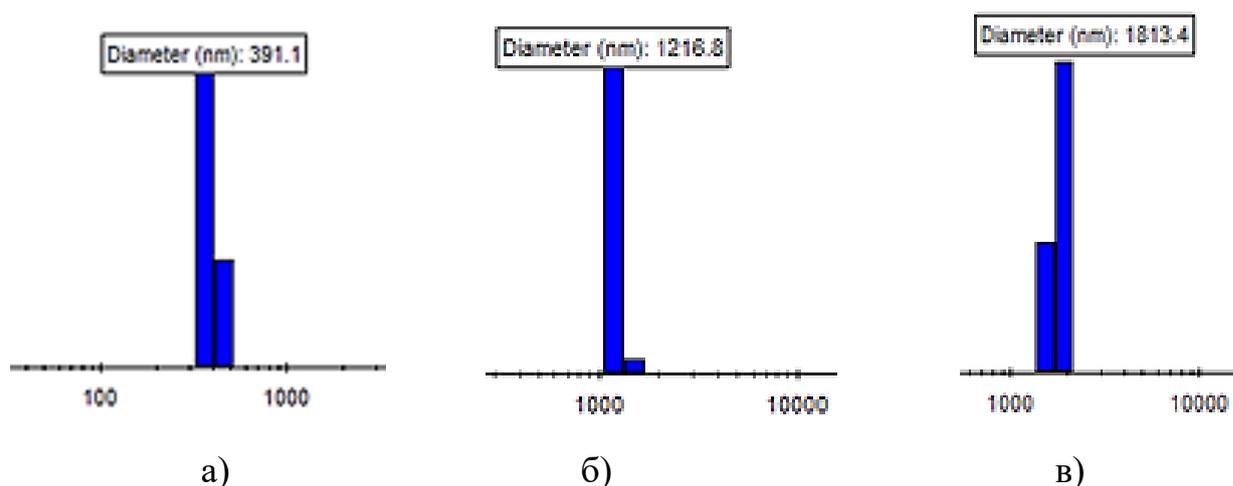


Рисунок 31. Результаты гранулометрического анализа: а) 5% MgO, б) 10% MgO, в) 15% MgO

Из полученных графиков видно, что с увеличением доли матричного материала (оксида магния), средний размер агломератов частиц также увеличивался (с 390 нм при 5 % матрицы до 1,8 мкм при 15 % матрицы).

Для определения элементного состава использовался рентгенофлуоресцентный анализ. Использовался спектрометр QUANT'X EDXRF ANALYZER. Спектрограмма анализа приведена на рисунке 32.

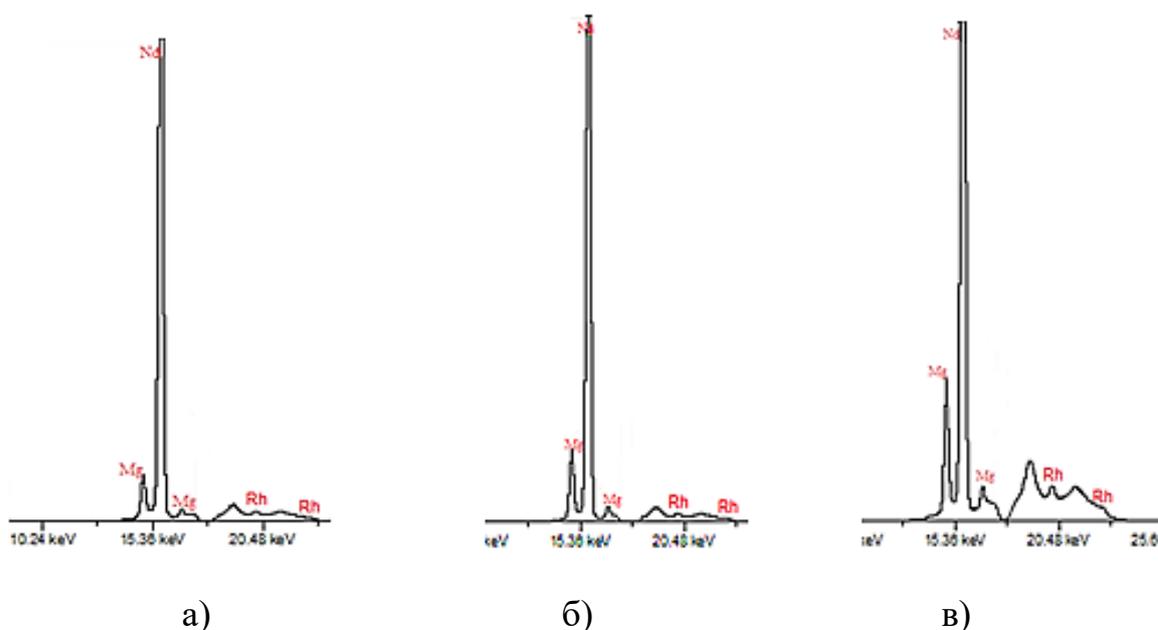


Рисунок 32. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа:

а) 5% MgO, б) 10% MgO, в) 15% MgO.

Идентифицированы элементы неодим (который в экспериментах использовался в качестве имитатора урана) и магний. Массовое отношение металлов в полученных оксидных композициях соответствует их содержанию в растворах ВОНР.

Гомогенность структуры порошка во всем объеме позволяет оценить отношение элементов в пробе для сравнения с расчетным значением. Оценка проводилась по сопоставлению максимальных рефлексов для неодима и магния $Nd/(Nd+Mg)$ в полученном порошке. По результатам спектрограммы видно, что отношение высот рефлексов $Nd/(Nd+Mg) \approx 0,29$, что удовлетворительно согласовывается с результатом расчетов (0,31).

4.2 Анализ конкурентных технических решений

Основными конкурентами плазмохимического синтеза являются: метод золь-гель, метод отдельного получения и механического смешения, химическое осаждение, лазерная сублимация. Все вышеперечисленные методы, кроме метода золь – гель, требуют большого количества химических реагентов, что напрямую сказывается на их стоимости. Поэтому, основным конкурентом плазмохимии будем рассматривать метод золь – гель. Рассмотрим основные достоинства и недостатки данных методов.

Плазмохимический синтез. Высокая производительность, отсутствие необходимости в использовании большого количества химических реагентов, частота получаемых нанопорошков. Неоднородность распределения по размерам.

Метод золь-гель. Простота метода, однородность по размерам получаемых порошков. Высокая продолжительность процесса.

Таблица 7. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений.

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{к1}	К _ф	К _{к1}
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,05	5	3	0,25	0,15
2. Удобство в эксплуатации	0,02	5	4	0,1	0,08
3. Помехоустойчивость	0,02	5	5	0,1	0,1
4. Энергоэкономичность	0,05	4	5	0,2	0,25
5. Надежность	0,1	5	4	0,5	0,4
6. Уровень шума	0,05	3	5	0,15	0,25

Продолжение таблицы 7

7. Безопасность	0,12	5	3	0,6	0,36
8. Функциональная мощность	0,1	5	3	0,5	0,3
9. Простота эксплуатации	0,05	5	4	0,25	0,2
10. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,02	5	2	0,1	0,04
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	5	4	0,5	0,4
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	2	5	0,1	0,25
3. Цена	0,12	5	3	0,6	0,36
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	3	0,25	0,15
5. Финансирование научной разработки	0,1	5	2	0,5	0,2
Итого	1	68	55	4,7	3,49

К преимуществам плазмохимического синтеза порошков следует отнести: удобство в эксплуатации установки, высокую скорость процесса, перспективность технологии, высокую конкурентную способность (вследствии чистоты получаемых порошков), относительно низкую себестоимость сырья, одностадийность процесса. Однако плазменная обработка имеет ряд недостатков в сравнении с методом золь – гель, а именно: высокое потребление электроэнергии, высокий уровень шума, не изученность процесса.

4.3 SWOT-анализ

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

Проведем SWOT-анализ исследования плазмохимического синтеза нанопорошков. Результаты первого этапа, а именно описание сильных и

слабых сторон проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 8.

Таблица 8. Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Низкая себестоимость данного метода диагностирования С2. Экономичное использование электроэнергии. С3. Компактность установки С4. Простота монтажа установки и эксплуатации.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Незнученность метода и сложность в его развитии Сл2. Низкая актуальность исследований
Возможности: В1. Проведение дальнейших исследований и открытие новых перспектив В2. Усовершенствование установки В3. Сотрудничество с научными исследовательскими центрами		
Угрозы: У1. Появление более актуальных методик У2. Малый спрос на установку.		

Второй этап заключается в том, что необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Результаты приведены в таблице 9.

Таблица 9. Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	+	+
	B2	-	+	+	+
	B3	-	-	-	-
Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл1		Сл2	
	B1	-		-	
	B2	-		-	
	B3	-		-	
Сильные стороны проекта					
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4
	У1	-	-	-	-
	У2	-	-	-	-
Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл1		Сл2	
	У1	+		+	
	У2	-		-	

Таблица 10. SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Низкая себестоимость плазмоподавляющих добавок. С2. Экономичное использование электроэнергии. С3. Компактность установки С4. Простота монтажа установки и эксплуатация.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Неизученность метода и сложности в его развитии Сл2. Низкая актуальность исследований</p>
<p>Возможности: В1. Проведение дальнейших исследований и открытие новых перспектив В2. Усовершенствование установки В3. Сотрудничество с научными исследовательскими центрами</p>	<p>Проведение дальнейших исследований и открытие новых перспектив, по усовершенствованию установки и сотрудничеству с научными исследовательскими центрами могут способствовать выше перечисленные сильные стороны НИП, такие как дешевизна, простота и компактность.</p>	<p>В свою очередь не изученность метода, а также низкая актуальность может внести много трудностей при работе с установкой и разработке новых проектов.</p>
<p>Угрозы: У1. Появление более актуальных методик У2. Малый спрос на установку.</p>	<p>Угрозы слабо влияют на сильные стороны проекта, так как присутствует возможность ее усовершенствования и проведения новых опытов.</p>	<p>Угрозы могут отрицательно сказаться на реализации данной установки в научно-исследовательской деятельности, так как малый спрос и появление более актуальных методик могут сыграть свою роль.</p>

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

4.4 Планирование научно-исследовательских работ

4.4.1 Структура работ в рамках научного исследования

Таблица 11. Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель
	3	Выбор направления исследований	Руководитель
	4	Проведение патентных исследований	Руководитель
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, студент
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель, студент
	7	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Руководитель, студент
	8	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель, студент
	9	Анализ и обработка полученных результатов	Руководитель, студент
Обобщение и оценка результатов	10	Оценка эффективности полученных результатов	Студент

4.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ

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

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к.

зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (13)$$

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.

$$t_{ож1} = \frac{3 \cdot 5 + 2 \cdot 8}{5} = 6,2 \text{ дн.}$$

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 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (14)$$

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.

$$T_{pi} = \frac{6,2}{1} = 6,2 \text{ раб.дн.}$$

4.4.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (15)$$

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

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

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (16)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году; 365

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году; 104

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году; 14

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

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} \approx 1.48$$

Таблица 12. Временные показатели проведения научного исследования

Этап	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ожг}$, чел-дни			
1	5	8	6,2	Руководитель	6,2	10
2	10	14	11,6	Студент	11,6	18
3	3	5	3,8	Студент	3,8	6
4	5	7	5,8	Студент	5,8	9
5	1	3	1,8	Руководитель, студент	0,9	2
6	14	20	16,4		8,2	13
7	5	7	5,8		2,9	5
8	3	5	3,8	Руководитель, студент	1,9	3
9	5	8	6,2		3,1	5
10	1	3	1,8	Студент	0,9	2
Итого:			64		14,6/30,5	73

Результаты разработки графика занесены в таблицу 13 (приложение В).

4.4.4 Бюджет научно-технического исследования

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

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

- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

4.4.5 Расчет материальных затрат НИИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{расxi}, \quad (17)$$

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

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

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

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Величина коэффициента (k_T), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 14.

Таблица 14. Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Электроэнергия	кВт/ч	315	2,51	790,65
Баллон со сжатым воздухом	м ³	1	290	290
Баллон с углекислым газом	м ³	1	250	250
Итого			542,51	1330,65

4.4.6 Амортизация оборудования

Рассчитаем амортизацию оборудования:

$$C_{аморт} = \frac{C_{об}}{T}, \quad (18)$$

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

T – срок службы (дней).

$$C_{аморт} = \frac{2500000}{2920} = 856,2$$

$$C_{аморт} = 856,2 \cdot 2 = 1712,4 \text{ рублей}$$

4.4.7 Основная заработная плата исполнителей темы

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

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

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

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата;

Основную заработную плату руководителя НИР можно рассчитать по следующей формуле:

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

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (21)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 15. Расчетный годовой фонд рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
-выходные дни	104	104
-праздничные дни	14	14
Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Потери рабочего времени: - отпуск	56	56
- невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	191	191

Количество месяцев работы без отпуска в течение года при отпуске в 56 дней составляет $M = 10,4$ месяца. Тогда,

$$\text{для руководителя: } Z_{\text{дн}} = \frac{43001 \cdot 10,4}{191} = 2341 \text{ рублей}$$

$$\text{для инженера: } Z_{\text{дн}} = \frac{19291 \cdot 10,4}{191} = 1050 \text{ рублей}$$

Основная заработная плата:

$$\text{Для руководителя: } Z_{\text{осн}} = 2341 \cdot 7,4 = 17323 \text{ рублей}$$

$$\text{Для инженера: } Z_{\text{осн}} = 1050 \cdot 15,95 = 16747 \text{ рублей}$$

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (22)$$

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

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

$k_{д}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5

Для руководителя: $Z_{м} = 22052 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 43001$

Для инженера: $Z_{м} = 9893 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 19291$

Таблица 16. Результаты расчета основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	$k_{пр}$	$k_{р}$	$k_{д}$	$Z_{м}$, руб	$Z_{дн}$, руб.	Т раб раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	22052	0,3	1,3	0,2	43001	2341	14,6	34178
Инженер	9893	0,3	1,3	0,2	19291	1050	30,5	32025

Таблица 17. Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Руководитель	Магистр
Основная зарплата, руб	34178	32025
Итого по статье $C_{зн}$, руб	66203	

4.4.8 Отчисления во внебюджетные фонды

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды;

На 2019 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%

$$Z_{внеб} = 0,271 \cdot 66203 = 17941 \text{ рублей}$$

Таблица 18. Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	Сумма отчислений
Руководитель проект	34178	0,271	9262
Инженер	32025	0,271	8678
Итого			17941

4.4.9 Накладные расходы

Экспериментальные исследования проводились 9 дней по одному часу, мощность установки 35 кВт/час.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле

$$C_{эл} = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об}, \quad (24)$$

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

P – мощность оборудования, кВт;

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

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

$$C_{эл} = 5,8 \cdot 9 \cdot 35 = 1827 \text{ руб.}$$

Затраты на водоснабжение:

$$C_{вод} = C_{вод} \cdot Q \cdot F_{об}, \quad (25)$$

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

Q – расход воды, м³;

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

$$C_{вод} = 24,66 \cdot 1,8 \cdot 9 = 400 \text{ руб.}$$

4.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Расчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта. Бюджет затрат приведен в таблице 19.

Таблица 19. Затраты научно-исследовательской работы

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	1330,65
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	1712,4
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	66203
4. Отчисления во внебюджетные фонды	17941
5. Накладные расходы	2227
6. Бюджет затрат НТИ	89414

4.6 Определение ресурсоэффективности исследования

Определение ресурсоэффективности происходит на основе расчета интегрального показателя ресурсоэффективности научного исследования. Данный показатель можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum_i^n a_i \cdot b_i, \quad (26)$$

где

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности заносим в таблицу 20.

Таблица 20. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

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

$$I_{p-исл} = 5 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,4 + 4 \cdot 0,1 = 4,7$$

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (27)$$

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

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

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

Таблица 21. Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,7
3	Интегральный показатель эффективности	0,21

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

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Одно из основных направлений профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда.

Охрана труда – система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [27].

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредный производственный фактор – фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности [27].

Эксперименты проводились в лаборатории отделения ядерно-топливного цикла.

5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов при работе в лаборатории

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

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

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

Физические:

– температура и влажность воздуха;

- шум;
- статическое электричество;
- электромагнитное поле низкой чистоты;
- освещённость;
- наличие излучения.
- химические: вредные вещества (оксиды азота и углерода).

Психофизиологические:

- физические перегрузка (статическая, динамическая);
- нервно-психические перегрузки (умственные перегрузки, перегрузки анализаторов, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

Таблица 22. Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы.

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на плазменной установке. Обработка результатов на ПЭВМ	Электромагнитное излучение	Электрический ток	ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»
		Пожарная	ГОСТ Р 12.3.047-2012 ССБТ. Пожарная безопасность.

5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на плазменной установке и ПЭВМ.

5.2.1 Организационные мероприятия

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

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

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

5.2.2 Организация рабочего места пользователя ПК

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 33 [27].

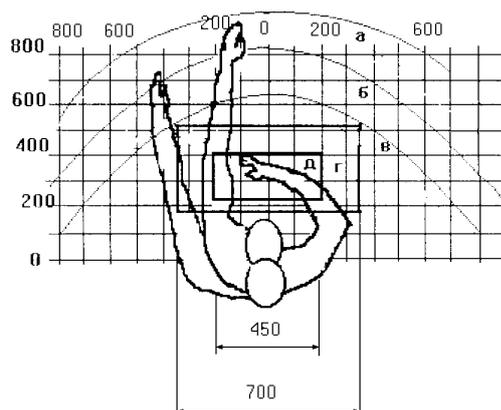


Рисунок 33. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости, а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация:

- в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе;

- в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

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

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым

по высоте и углам наклона сиденья и спинки.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше – если угол обзора будет составлять 30° .

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

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

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100–300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15° .

5.2.3 Условия безопасной работы

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

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

Таблица 23. Оптимальные и допустимые параметры микроклимата.

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

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в

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

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

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

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого

ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. Шум компрессора высокочастотного генератора используемой установки не превышает 40 дБ, что так же соответствует.

Высокочастотный генератор плазменной установки производит электромагнитное излучение, которое может быть сведено к нулю за счет экранирования.

Экран и системные блоки ПК так же производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц – 2кГц – 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц – 400кГц – 2,5В/м.
- плотность магнитного потока должна быть не более:
- в диапазоне частот 5Гц – 2кГц – 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц – 400кГц – 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от действия электромагнитного излучения:

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

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. Конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы

рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

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

5.3 Правила техники безопасности при эксплуатации плазменной установки

Для исключения аварийных ситуаций и безопасного выполнения работ необходимо строго соблюдать указанную последовательность запуска установки:

- во время работы установки запрещается открывать, снимать ограждения, отключать предохранительные и блокирующие устройства. Все работы производить при закрытых дверях генератора и технологического блока.

- во время работы установки следить за индикаторными лампами «ОХЛАЖДЕНИЕ», «НАКАЛ», «НАГРЕВ» на генераторе и датчиками расхода плазмообразующего газа, охлаждающей воды на пульте управления технологического блока.

- периодически снимать режимные параметры работы установки и заносить их в рабочий журнал. При необходимости производить корректировку этих параметров в соответствии с плановым заданием.

- во время работы установки следить за сигнальной лампой режима «РАБОТА», расположенной на пульте управления и контроля за технологическим процессом, при сбое технологического режима, автоматически выключается режим «НАГРЕВ» генератора и электроприводы подачи шлама, что сопровождается сигналом звонка.

- в случае возникновения аварийной ситуации: локальный прогар стенок реактора при «закорачивании» высокотемпературного канала высокочастотного факельного разряда на металлическую поверхность

внутренних стенок реактора, – термомпара показывает всплеск температуры.

5.4 Электробезопасность

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества [28].

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ или другими электрическими приборами и установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

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

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

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

- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;

- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпус токоведущих и электропоражающих частей) [28].

Электрозащитные средства – это переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих с электроустановками, от поражения электрическим током, от воздействия электрической дуги [28]. Эти средства должны обеспечивать высокую степень защиты и удобство при эксплуатации. Их выбирают с учетом требований безопасности для данного вида работ. В первую очередь безопасность обеспечивается применением средств коллективной защиты, а затем, если она не может быть обеспечена, применяют средства индивидуальной защиты.

К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся [28]:

- оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть заблокированы с устройствами, отключающими рабочее напряжение при снятии;

- изолирующие устройства и покрытия;

- устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения;

- устройства дистанционного управления;

- предохранительные устройства и др.

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

При использовании данного оборудования строго выполнялись требования по электробезопасности, все операции выполнялись руководителем, имеющим допуск к работе с напряжениями свыше 1000 В.

5.5 Пожарная безопасность

Согласно нормам пожарной безопасности, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д [29,30]. Так как помещение лаборатории по степени пожароопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

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

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

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

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

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности

[30]:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел.

112;

- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных расчетов определены оптимальные составы растворов ВОНР, обеспечивающие их энергоэффективную переработку в воздушной плазме.

2. По результатам термодинамических расчетов определены оптимальные режимы, обеспечивающие в воздушной плазме синтез оксидных композиций «UO₂-MgO» и «UO₂-BeO» требуемого состава.

3. В результате проведенных расчетов и сравнения с экспериментальными данными показано, что повышение объемного содержания матрицы (оксида магния) в составе диоксида урана до 5 %, 10 % и 15 % приводит при температуре 1400 К к увеличению коэффициента теплопроводности оксидных композиций «UO₂-MgO» в 1,35, 1,40 и 1,50 раза соответственно, а при температуре 1600 К – в 1,47, 1,53 и 1,70 раза соответственно.

4. При рекомендованных режимах реализован в воздушной плазме ВЧФ-разряда процесс плазмохимического синтеза модельных оксидных композиций «Nd₂O₃-MgO» из диспергированных растворов ВОНР.

5. Определены физико-химические свойства (элементный состав, размер частиц) полученных порошков модельных оксидных композиций «Nd₂O₃-MgO».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза из растворов ВОНР оксидных композиций для различных 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. Бескорвайный 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.: Metallurgia, 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.: Metallurgia, 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
(обязательное)

**PLASMOCHEMICAL SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF FUEL
OXIDE COMPOSITIONS FOR ADVANSED NUCLEAR FUELS**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Бабаев Ренат Габилевич		

Консультант кафедры ТФ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Новоселов Иван Юрьевич			

Консультант – лингвист ОИЯ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шайкина Ольга Игоревна			

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 as large as uranium ones 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. By the way using sol-gel method for obtaining microspheres from mixed water nitric solutions connected with following disadvantages: multistage process, long process duration, low productivity, need in chemicals, additional hydrogen reduction, high prime cost. For another thing separable obtaining and mechanical mixing microspheres and matrix material do not ensure homogeneous phase distribution in such NF.

Plasmachemical method could be alternative to sol-gel process. Doubtless advantages of plasma application for plasmachemical 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 plasmachemical 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 MW-h/ton), it increases plant productivity. Also it ensures conditions in plasmachemical 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 fabrication 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 it gradually evolves towards the formation of a gel-like diphasic system containing

both a liquid phase and solid phase whose morphologies range from discrete particles to continuous polymer networks. In the case of the colloid, the volume fraction of particles (or particle density) may be so low that a significant amount of fluid may need to be removed initially for the gel-like properties to be recognized. This can be accomplished in any number of ways. The simplest method is to allow time for sedimentation to occur, and then pour off the remaining liquid. Centrifugation can also be used to accelerate the process of phase separation.

Removal of the remaining liquid (solvent) phase requires a drying process, which is typically accompanied by a significant amount of shrinkage and densification. The rate at which the solvent can be removed is ultimately determined by the distribution of porosity in the gel. The ultimate microstructure of the final component will clearly be strongly influenced by changes imposed upon the structural template during this phase of processing.

Afterwards, a thermal treatment, or firing process, is often necessary in order to favor further polycondensation and enhance mechanical properties and structural stability via final sintering, densification, and grain growth. One of the distinct advantages of using this methodology as opposed to the more traditional processing techniques is that densification is often achieved at a much lower temperature.

The precursor sol can be either deposited on a substrate to form a film (e.g., by dip-coating or spin coating), cast into a suitable container with the desired shape (e.g., to obtain monolithic ceramics, glasses, fibers, membranes, aerogels), or used to synthesize powders (e.g., microspheres, nanospheres) [2]. The sol-gel approach is a cheap and low-temperature technique that allows the precise control of the product's chemical composition. Even small quantities of dopants, such as organic dyes and rare-earth elements, can be introduced in the sol and end up uniformly dispersed in the final product. It can be used in ceramics processing and manufacturing as an investment casting material, or as a means of producing very thin films of metal oxides for various purposes. Sol-gel derived materials have diverse applications in optics, electronics, energy, space, (bio) sensors, medicine

(e.g., controlled drug release), reactive material, and separation (e.g., chromatography) technology [2].

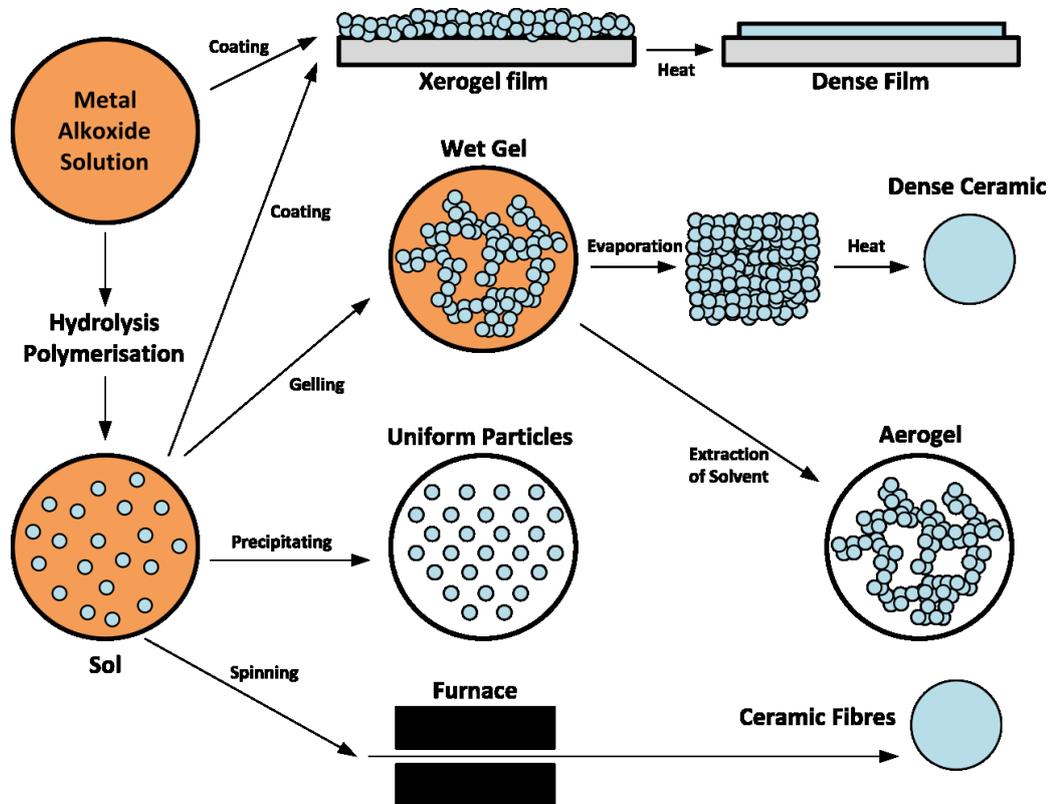


Figure 1. Schematic representation of the different stages and routes of the sol-gel technology.

In the processing of fine ceramics, the irregular particle sizes and shapes in a typical powder often lead to non-uniform packing morphologies that result in packing density variations in the powder compact. Uncontrolled flocculation of powders due to attractive van der Waals forces can also give rise to microstructural heterogeneities [3].

Differential stresses that develop as a result of non-uniform drying shrinkage are directly related to the rate at which the solvent can be removed, and thus highly dependent upon the distribution of porosity. Such stresses have been associated with a plastic-to-brittle transition in consolidated bodies, [3] and can yield to crack propagation in the unfired body if not relieved.

In addition, any fluctuations in packing density in the compact as it is prepared for the kiln are often amplified during the sintering process, yielding heterogeneous densification. Some pores and other structural defects associated with density variations have been shown to play a detrimental role in the sintering process by growing and thus limiting end-point densities. Differential stresses arising from heterogeneous densification have also been shown to result in the propagation of internal cracks, thus becoming the strength-controlling flaws.

It would appear desirable to process a material in such a way that it is physically uniform with regard to the distribution of components and porosity, rather than using particle size distributions which will maximize the green density. The containment of a uniformly dispersed assembly of strongly interacting particles in suspension requires total control over particle-particle interactions. Monodisperse colloids provide this potential.

A1.2 Plasma-chemical technique

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

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

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

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

areas.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

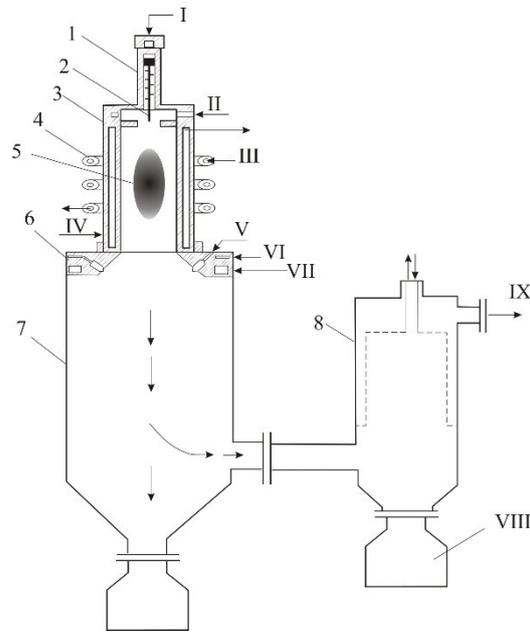


Figure 2. 1-igniter; 2- electrode; 3- plasma torch; 4- inductor; 5- plasma discharge; 6- spraying device; 7- plasma chemical reactor; 8- filter; I- gas to ignite the discharge; II-gas for plasma formation; III- water to cool the inductor; IV- water to cool the plasma torch; V- processed inorganic metal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

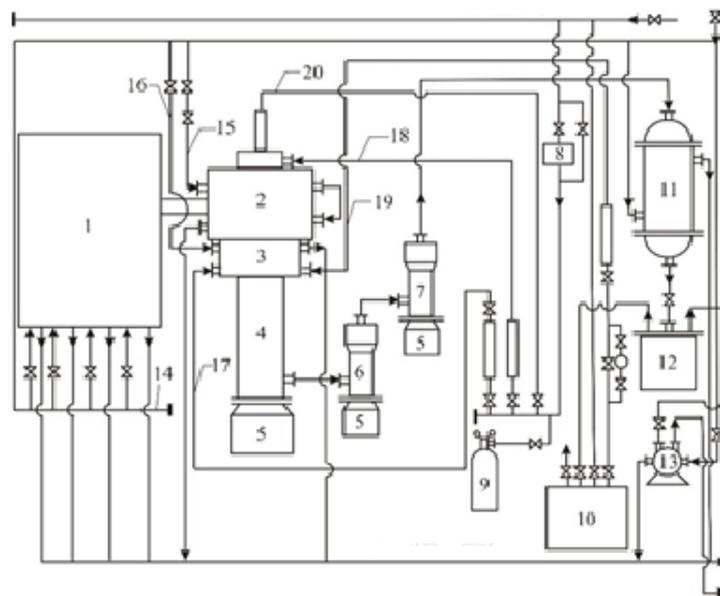


Figure 3. 1- HF generator, 2- the plasma torch, 3- nozzle; 4- plasmachemical reactor, 5- reception bunker, 6- the first vortex dust collector, 7- second vortex dust collector, 8- filter, 9- plasma gas bottle; 10- feed solution container, 11- condensate container, 12- condensate tank, 13- vacuum pump,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

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

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

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

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

This technology provides the outlet of the plasma unit homogenous mixture of thorium oxide in a single step with utilization of circulating solution.

A2. The laboratory plasmatron facility description

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

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

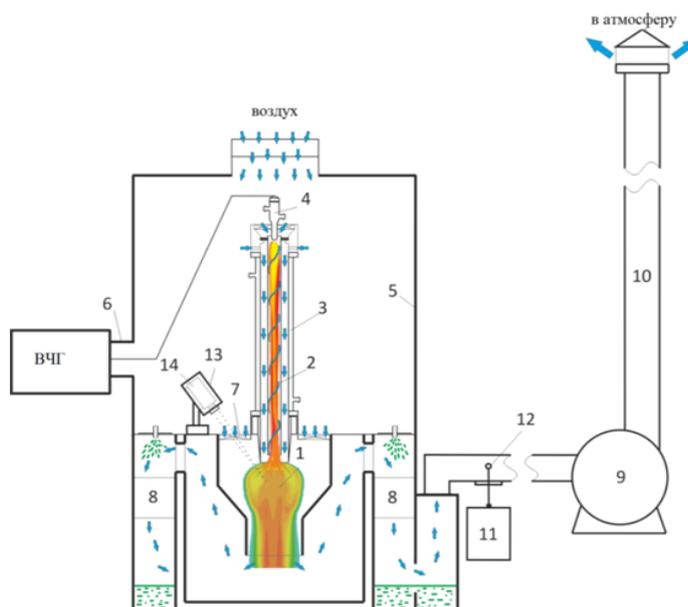


Figure 4. Scheme of the Plasma facility based on the high-frequency plasma torch: 1 - disperser 2 - HFT discharge, 3 - high-frequency plasma torch; 4 - copper electrode, 5 - case; 6 - coaxial output; 7 - reactor impeller; 8 - "wet" flue gas cleaning unit; 9 - exhaust fan (BP 12-26, №4), 10 - duct, 11 - 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.

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

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

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

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

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

HFT-plasmatron.

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

CONCLUSION

A literature review on the 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

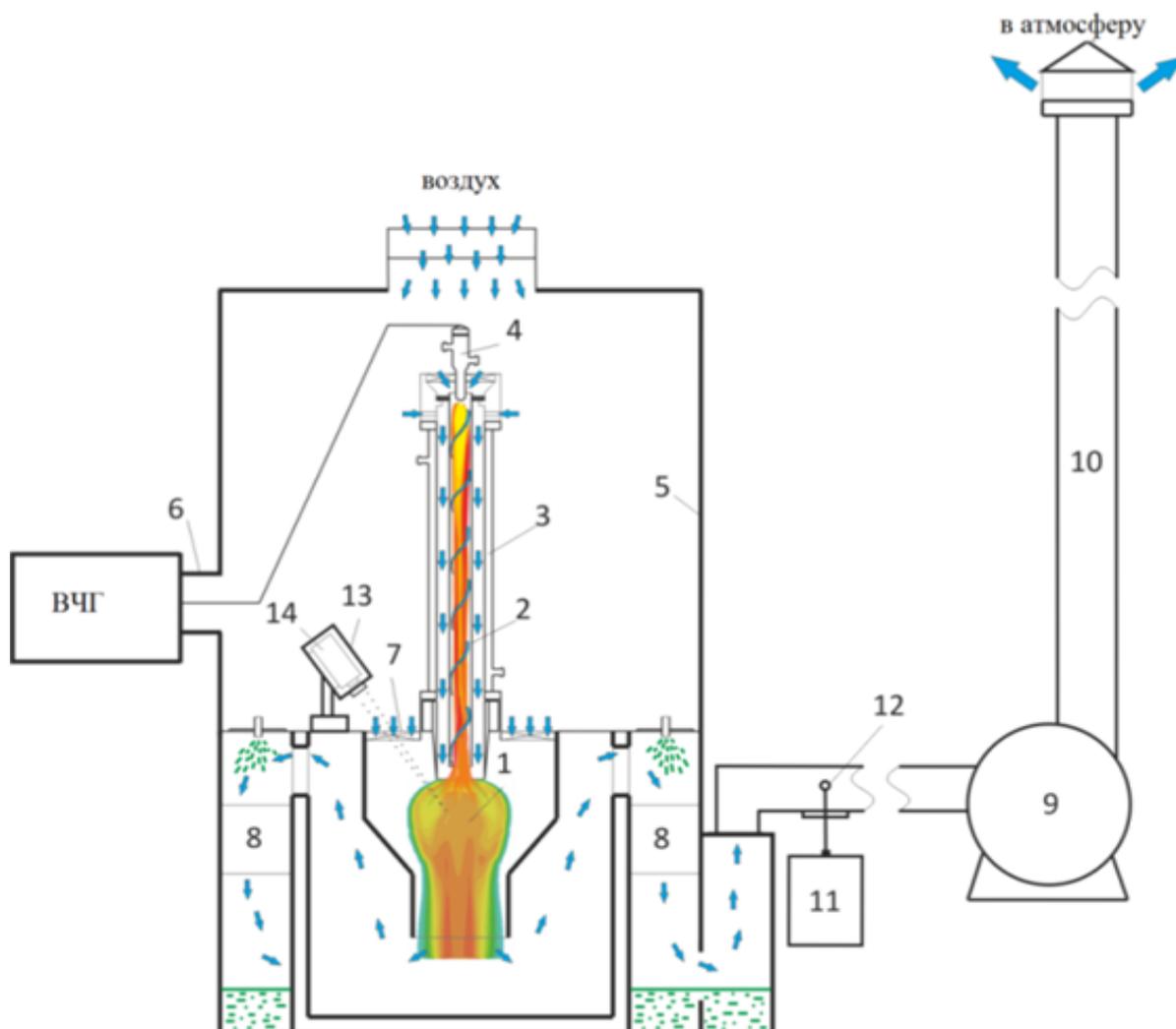


Рисунок Б2 – Схема плазменного стенда на базе ВЧФ-плазматрона:

1 – диспергатор, 2 – ВЧФ-разряд, 3 – ВЧФ-плазматрон; 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

Таблица 13 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Март			Апрель			Май			Июнь			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	10	■												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель	18		■	■										
3	Выбор направления исследований	Руководитель	6			■										
4	Проведение патентных исследований	Руководитель	9				■									
5	Календарное планирование работ по теме	Студент, Руководитель	2					■								
6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель, студент	13					■	■							
7	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Руководитель, студент	5						■	■						
8	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель, студент	3							■	■					
9	Анализ и обработка полученных результатов	Руководитель, студент	5							■	■					
10	Оценка эффективности полученных результатов	Студент	2								■					

 – Руководитель
  – Студент

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

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

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Таблица 5. Основные физико-механические свойства нитридов

Свойства	Соединение оксидов					
	AlN	Si ₃ N ₄	Mg ₃ N ₂	CeN	YN	ZrN
Температура плавления, °C	Инконгруэнтное	Инконгруэнтное	Инконгруэнтное	2480	2670	2960
Давление азота, мм рт.ст.	~10 ⁻³ (2000 °C)	5 · 10 ⁻³ (1500 °C)	10 ⁻⁸ (1000 °C)	4 · 10 ⁻⁸ (1500 °C) 4 · 10 ⁻⁴ (2000 °C)	~10 ⁻⁷ (1500 °C) ~10 ⁻³ (2000 °C)	~10 ⁻¹² (1500 °C) ~10 ⁻⁷ (2000 °C)
Температура разложения при давлении N ₂ 1 атм., °C	2417	1878	1500	–	–	–
Теплопроводность Вт/(м · К)	62 (500 °C) 36 (1000 °C) 27 (1500 °C)	12 (500 °C) 9 (1000 °C) 10 (500 °C) 12 (2000 °C)	–	5 (800-2000 °C)	–	17 (500 °C) 23 (1000 °C) 26 (1500 °C) 24 (2000 °C)
Модуль нормальной упругости E, ГПа	370	320	–	–	300	328