

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование процесса плазмохимического синтеза наноструктурных оксидных композиций для уранового дисперсионного ядерного топлива

УДК 621.039.543:66.011:533.9:661.8'02-022.532

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ01	Беляков Дмитрий Михайлович		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Ю.В.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Изотопные технологии и материалы	Видяев Д.Г.	д.т.н.		

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
Универсальные	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК(У)-3	Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен использовать фундаментальные законы в объеме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза новых идей, творческого самовыражения
ПК(У)-2	Способен создавать новые методы расчета современных физических установок и устройств, разрабатывать методы и перспективные технологии
ПК(У)-3	Способен создавать математические и физические модели, описывающие процессы и явления в разделительных каскадах, установках разделения и тонкой очистки веществ, переработки и обезвреживания промышленных отходов
ПК(У)-4	Способен оценить перспективы развития ядерной отрасли, использовать её современные достижения и передовые технологии в научно-исследовательских работах
ПК(У)-5	Способен самостоятельно выполнять экспериментальные и теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современных приборов для научных исследований и математических методов расчета
ПК(У)-6	Способен провести расчет, концептуальную и проектную разработку современных физических установок и приборов
ПК(У)-7	Способен формулировать технические задания, использовать информационные технологии и пакеты прикладных программ при проектировании и расчете физических установок, использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов
ПК(У)-8	Способен к объективному анализу технических и расчетно-теоретических разработок, решений и проектов, учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности, другим нормативным актам на российском и международном уровне, подготовить экспертное заключение
ПК(У)-9	Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования и дополнительного профессионального образования (ДПО)
ПК(У)-10	Способен разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов, управлять программами освоения новой продукции и технологии

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

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии

Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Видяев Д.Г.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
ОАМ01	Белякову Дмитрию Михайловичу

Тема работы:

Исследование процесса плазмохимического синтеза наноструктурных оксидных композиций для уранового дисперсионного ядерного топлива
Утверждена приказом директора (дата, номер) № 32-51/С от 01.02.2022

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2022 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Задание. Литературные источники по основам плазмохимического синтеза оксидных композиций, по матричным материалам. Программное обеспечение «Terra».
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Обзор и анализ литературы по плазмохимическому синтезу оксидных композиций. 2. Определение оптимальных составов водно-органических нитратных растворов. 3. Термодинамическое моделирование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций. 4. Подготовка экспериментального плазменного стенда, модельных водно-органических растворов и проведение экспериментов с получением опытных партий порошков оксидных композиций 5. Исследование свойств порошков, синтезированных в воздушной плазме ВЧФ-разряда

	6. Экономический расчет 7. Охрана труда и техника безопасности 8. Выводы. Заключение
Перечень графического материала	Графики: 1. Схема установки для плазмохимического синтеза оксидных композиций. 2. Технологическая схема получения таблеток композиции «UO ₂ –MgO». 3. Влияние температуры на равновесные составы продуктов плазменной переработки ВОНР-1÷4. 4. Влияние температуры на равновесные составы продуктов плазменной переработки ВОНР-5÷8. 5. Схема лабораторного плазменного стенда на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01. 6. СЭМ-изображение морфологической структуры частиц порошка модельной ОК-3. 7. Характерная микрофотография спеченной керамики из порошка модельной ОК-3 8. Схема определения расхода воздуха с помощью трубки Пито. 9. Влияние входной площади импеллера реактора на расход воздушного теплоносителя в газоходе. 10. Влияние входной площади импеллера реактора на расход воздушного теплоносителя через разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона 11. Влияние входной площади импеллера реактора на расход воздушного теплоносителя через реактор. 12. Влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц в полученных водных суспензиях ОК 13. Влияние содержания матрицы (MgO) на размер и удельную поверхность порошков ОК
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	доцент Отделения социально-гуманитарных наук, к.э.н. Клемашева Е.И.
Социальная ответственность	доцент Отделения ядерно-топливного цикла, к.т.н. Передерин Ю.В.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.02.2022
---	------------

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОАМ01	Беяков Д.М.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM01	Белякову Дмитрию Михайловичу

Школа	ИЯТШ	Отделение	Отделение ядерно-топливного цикла
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, статических 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>	Анализ и оценка конкурентоспособности НИ; SWOT-анализ.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	1.Цели и результат проекта. 2.Организационная структура проекта. 3.Ограничения и допущения проекта.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование плана и графика разработки: - организация работ НИ; - определение структуры работ; - разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на НИ: - материальные затраты; - заработная плата; - отчисления во внебюджетные фонды.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	1.Определение интегрального финансового показателя разработки; 2.Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; 3.Определение интегрального показателя эффективности; 4.Оценка абсолютной эффективности НИ.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. Сегментирование рынка 2. Оценка конкурентоспособности технических решений 3. Матрица SWOT-анализа 4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ 5. Диаграмма Ганта	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.02.22
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Клемашева Елена Игоревна	канд.экон. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Беляков Дмитрий Михайлович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM01	Белякову Дмитрию Михайловичу

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

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места на предмет возникновения:	– вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения); – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы);
2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме	– требования охраны труда при работе на ПЭВМ; – требования охраны труда при работе на ВЧФ-плазмотроне; – электробезопасность; – пожаро-взрывобезопасность; – химическая безопасность.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности	– электробезопасность (причины, средства защиты); – пожаро-взрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.02.2022
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Ю.В.	к.т.н.		01.02.2022

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Беляков Д.М.		01.02.2022

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация включает в себя: 108 страниц, 35 таблиц, 13 рисунков, 47 формул, 20 литературных источников.

Ключевые слова: высокочастотный факельный разряд, плазма, ВЧФ-плазмотрон, реактор, матрица, дисперсионное ядерное топливо.

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

Цель работы – оптимизация процесса прямого синтеза в воздушной плазме топливных оксидных композиций « $\text{UO}_2\text{--MgO}$ » и « $\text{UO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ » для уранового дисперсионного ядерного топлива из водно-органических нитратных растворов, включающих органический компонент (ацетон), водные нитратные растворы делящегося металла (уран) и металла матрицы (магний, иттрий).

В рамках изучения проводились расчет и оптимизация показателей горючести и состава водно-органических нитратных растворов и режимов их плазменной переработки в воздушной плазме.

В результате расчетов определены оптимальные составы растворов ВОНР, имеющие адиабатическую температуру горения не менее 1500 К, и режимы их плазменной переработки, которые подтверждены экспериментальным путем на модельных растворах.

Область применения: результаты проведенных исследований будут использованы для создания энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза наноструктурных топливных оксидных композиций для уранового дисперсионного ядерного топлива.

В будущем планируется продолжить исследования по созданию и совершенствованию технологии и оборудования для плазмохимического синтеза топливных оксидных композиций для других перспективных типов дисперсионного ядерного топлива.

Определения

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

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

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

Наноструктурный порошок – порошок с размерами частиц менее 100 нм.

Сканирующая электронная микроскопия – способ получения изображения с высоким пространственным разрешением, основанное на принципе взаимодействия электронного пучка с исследуемым объектом.

Просвечивающая электронная микроскопия – способ получения изображения ультратонкого образца путём пропускания через него пучка электронов.

Рентгенофазовый анализ – метод исследования структурных характеристик материала при помощи дифракции рентгеновских лучей. БЭТ-анализ – метод математического описания физической адсорбции, основанный на теории полимолекулярной (многослойной) адсорбции.

Обозначения и сокращения

ВЧФ-разряд – высокочастотный факельный разряд.

ВЧФ-плазмотрон – высокочастотный факельный плазмотрон.

ВЧГ – высокочастотный генератор.

ВНР – водный нитратный раствор.

ВОНР – водно-органический нитратный раствор.

ТОК – топливная оксидная композиция.

БЭТ-анализ – метод определения удельной поверхности дисперсных материалов, предложенный Брунауэром, Эммитом и Тэллером.

ПЭМ – просвечивающая электронная микроскопия.

СЭМ – сканирующая электронная микроскопия.

РФА – рентгенофазовый анализ.

Оглавление

Введение	12
1 Обзор литературы	14
1.1 Области применения и свойства высокотемпературного ядерного топлива	14
1.1.1 Термодинамическая устойчивость	15
1.1.2 Теплопроводность	16
1.1.3 Электрические свойства	17
1.2 Матричные материалы	18
1.2.1 Матричные материалы в виде оксидов металлов	19
1.3 Плазмохимический синтез	20
1.3.1 Плазмохимический синтез оксидных композиций из водных нитратных растворов	21
1.4 Методы отдельного и совместного получения топливных оксидных композиций для дисперсионного уранового ядерного топлива	22
1.4.1 Оксид урана	22
1.4.2 Оксид магния: свойства и получение	23
1.4.3 Получение топливных оксидных композиций «UO ₂ –MgO»	23
2 Расчетная часть	25
2.1 Расчет показателей горючести ВОНР	25
2.2 Термодинамическое моделирование процесса плазмохимической переработки растворов ВОНР	27
2.3 Расчет параметров получения модельных топливных оксидных композиций из растворов ВОНР	30
2.4 Рекомендации для практической реализации процесса	31
3 Экспериментальная часть	33
3.1 Описание экспериментальной установки на базе ВЧФ – плазмотрона	33
3.2 Расчет расхода плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон	34
3.3 Расчет расхода газа через реактор	36
3.4 Расчет основных технологических параметров установки	37
3.5 Подготовка и плазменная переработка растворов ВОНР	38
3.6 Анализ полученных оксидных композиций	39
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	44
4.1 Предпроектный анализ	45
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	45
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений	46
4.1.3 SWOT-анализ	47
4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации	49

4.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	51
4.2 Инициация проекта.....	51
4.2.1 Реестр рисков проекта	54
4.2.2 Планирование научно-исследовательского проекта	54
4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	57
4.3.1 Расчет материальных затрат.....	57
4.3.2 Расчет амортизации оборудования для экспериментальных работ	58
4.3.3 Затраты на оплату труда исполнителей научно-технического исследования.....	60
4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды	63
4.3.5 Накладные расходы.....	63
4.4 Определение ресурсной эффективности проекта	64
4.5 Оценка абсолютной эффективности НИ	66
Выводы по разделу	69
5 Социальная ответственность.....	71
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	71
5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ВЧФ-плазмотроне и ПЭВМ	73
5.2.1 Организационные мероприятия.....	73
5.2.2 Технические мероприятия.....	73
5.2.3 Микроклимат	75
5.2.4 Шум и вибрация	76
5.2.5 Электромагнитное излучение	77
5.2.6 Освещенность	78
5.2.7 Психофизиологические факторы.....	82
5.3 Химическая безопасность	82
5.4 Электробезопасность.....	83
5.5 Пожарная и взрывная безопасность	85
5.6 Экологическая безопасность	88
5.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	89
Выводы по разделу	89
Выводы	91
Список используемой литературы.....	92
Приложение А.....	94
Приложение Б	106

Введение

Основу атомной энергетики в России в XXI веке еще будут составлять АЭС с легководными реакторами на тепловых нейтронах, использующих керамическое ядерное топливо из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, у которого наряду с достоинствами есть и серьезный недостаток – низкая теплопроводность [1,2]. В аварийных ситуациях без охлаждения топлива это приводит к повышению температуры, развитию пароциркониевой реакции циркониевых оболочек тепловыделяющих элементов и их разрушению. Решением этой проблемы является создание устойчивого к аварийным ситуациям толерантного топлива (Accident Tolerant Fuel). Одним из перспективных типов ATF-топлива является урановое дисперсионное ядерное топливо, содержащее включения из делящегося материала (диоксида урана), равномерно распределенного в матрице из оксида магния (оксида иттрия), имеющего высокую теплопроводность и малое поперечное сечение захвата тепловых нейтронов [3]. Использование в качестве матрицы оксидов металлов обусловлено тем, что наиболее изученное и используемое ядерное топливо – оксидное (диоксид урана, диоксид плутония и др.).

Традиционные методы изготовления оксидных композиций (золь-гель, раздельное получение и механическое смешение и др.) многостадийны, продолжительны, не обеспечивают требуемый состав и равномерное распределение фаз, имеют высокие энерго- и трудозатраты.

Существенное снижение энергозатрат может быть достигнуто при воздушно-плазменной переработке оптимальных по составу диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны) и имеющих адиабатическую температуру горения не менее 1500 К. Воздушно-плазменная переработка растворов ВОНР, включающих делящийся металл (уран) и металлы матрицы (магний и др.), приведет не только к значительному снижению энергозатрат, но и обеспечит плазмохимический синтез в одну

стадию наноструктурных топливных оксидных композиций для дисперсионного ядерного топлива, имеющих равномерное распределение и требуемый состав фаз без дополнительного водородного восстановления.

Целью данной работы является оптимизация процесса прямого синтеза в воздушной плазме топливных оксидных композиций « $\text{UO}_2\text{--MgO}$ » и « $\text{UO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ » для уранового дисперсионного ядерного топлива из водно-органических нитратных растворов, включающих органический компонент (ацетон), водные нитратные растворы делящегося металла (уран) и металла матрицы (магний, иттрий).

Для достижения поставленной цели нужно решить следующие задачи:

1. Обзор и анализ литературных источников по плазмохимическому методу получения топливных оксидных композиций для уранового дисперсионного ядерного топлива;

2. Расчет показателей горючести водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (ацетон), водные нитратные растворы делящегося металла (уран) и металла матрицы (магний, иттрий). Определение оптимальных по составу растворов ВОНР, обеспечивающих их энергоэффективную плазменную переработку;

3. Термодинамическое моделирование процесса плазмохимической переработки растворов ВОНР и установление закономерностей влияния массовой доли воздушного плазменного теплоносителя на состав образующихся продуктов в газовой и конденсированных фазах. Сравнительный анализ и определение режимов, обеспечивающих в воздушной плазме энергоэффективный синтез топливных оксидных композиций « $\text{UO}_2\text{--MgO}$ » и « $\text{UO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ » для дисперсионного ядерного топлива различного состава;

4. Определение режимов работы плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона.

5. Получение опытных образцов оксидных композиций и исследование их свойств.

1 Обзор литературы

1.1 Области применения и свойства высокотемпературного ядерного топлива

В зависимости от назначения к топливным материалам предъявляются различные требования. К основным требованиям к топливу ядерных реакторов различного назначения относят [1]:

- экономичность технологии получения;
- малое сечение поглощения нейтронов;
- высокая радиационная стойкость;
- высокая концентрация делящихся элементов;
- отсутствие взаимодействия с теплоносителем;
- высокая теплопроводность;
- высокая температура плавления;
- простота регенерации отработавших твэлов.

Исходя из этого, тугоплавкие соединения, как ядерное топливо используется в различном виде. Если на первом месте стоит объемная концентрация атомов, подвергающихся делению (реакторы типа ВВЭР, РБМК, а также БН), применяются непосредственно указанные соединения без добавок матричных и других материалов.

Во многих случаях высокотемпературное топливо используется в форме частиц, распределенных в металлической или иной матрице. Получаемые таким образом дисперсионные материалы обладают рядом дополнительных преимуществ [1].

В некоторых случаях, например, для достижения особо высоких температур плавления или понижения химической активности, высокотемпературные соединения делящихся элементов используют в твердые растворы с аналогичными соединениями переходных металлов.

В последнее время в связи с накоплением значительных количеств плутония широко исследуется и все шире применяется PuO_2 . Другие соединения освоены значительно меньше [1].

1.1.1 Термодинамическая устойчивость

Химическая устойчивость и совместимость топлива с материалами оболочки при длительных кампаниях твэлов часто определяют их работоспособность. Прочность химической связи компонентов соединения может быть охарактеризована изобарно-изотермическим потенциалом образования соединения [2].

В том случае, если устойчивость рассматриваемого соединения измеряется при контактировании с другим соединением, она будет определена изменением изобарно-изотермического потенциала всей системы целиком, с включением потенциальных продуктов реакций.

Общими для большинства видов топливных материалов являются вопросы термодинамической (химической) устойчивости по отношению к следующим веществам: воздуху и парам воды, материалу оболочек и матриц и материалу теплоносителей. Взаимодействие с кислородом (воздуха) и парами воды может происходить на различных стадиях изготовления твэлов. Полностью термодинамически устойчивыми по отношению к этим реагентам из рассматриваемых видов высокотемпературного топлива являются, по-видимому, только ThO_2 и, возможно, PuO_2 [2].

Все остальные соединения могут реагировать с кислородом и парами воды. Скорость взаимодействия определяется кинетическими факторами и изменяется при комнатной температуре для плотных материалов от пренебрежимо малых величин для UO_2 до чрезвычайно больших (появления белого налета за минуты выдержки) для ThN . Чтобы предохранить их от окисления требуется защитная атмосфера, для создания которой используются тщательно очищенные соединения аргона или гелия.

1.1.2 Теплопроводность

Процессы теплопередачи в топливных материалах имеют важное значение, поскольку они определяют при заданной плотности делений температурные характеристики сердечника и ТВЭЛ в целом [2].

Передаваемая тепловая энергия имеет следующие компоненты:

1. Электронная составляющая, обусловленная передачей тепловой энергии свободными электронами, имеет определяющее значение для материалов с металлическим характером связи (карбидов, нитридов, отчасти боридов, сульфидов, фосфидов). Величина электронной составляющей оценивается по электропроводности материала.

2. Решеточная составляющая отражает передачу тепловой энергии колебаниями атомов кристаллической решетки. Для материалов с ионной связью (например, окислов) это основной механизм теплопередачи.

3. Радиационная составляющая — перенос тепла лучеиспусканием. Заметную роль в теплопередаче этот процесс может играть при высоких температурах (2000°C и выше), при прозрачности материала для инфракрасного излучения (соединения с ионной связью, крупные зерна) или при значительной пористости, затрудняющей теплопередачу другими способами. Оценки, сделанные для UO_2 , показывают, что повышение теплопроводности при высоких температурах может быть в значительной степени связано с ростом радиационной составляющей.

4. Теплопроводность газа. Теплопроводность газов значительно ниже теплопроводности твердых тел, поэтому относительный вклад этого механизма в теплоперенос в компактных материалах обычно очень мал. В тех случаях, когда материал с низкой теплопроводностью имеет значительную пористость и поры заполнены газом с высокой теплопроводностью (водород, гелий) с повышенным давлением, этот механизм может иметь существенное значение. Для некоторых порошкообразных материалов с низкой теплопроводностью при наличии только точечных контактов между

частицами теплопроводность газа может иметь превалирующее значение. Теплопроводность газа имеет также определяющее значение, если газовые прослойки имеют большую площадь и расположены перпендикулярно к направлению теплового потока (зазоры между сердечником и оболочкой, трещины в топливе). Теплопередача в подобных условиях должна определяться с учетом контактной теплопроводности и теплопроводности газа.

1.1.3 Электрические свойства

Характеристики электрических свойств дают важные сведения о типе химической связи в соединениях. Высокое значение электропроводности и уменьшение ее с ростом температуры примерно по линейному закону соответствуют хорошо выраженной связи металлического типа, которая характерна для рассматриваемых карбидов, нитридов и большинства фосфидов, боридов и сульфидов. Повышение электропроводности (как правило, нелинейное) с ростом температуры характерно для соединений, имеющих характер полупроводников [2].

Электропроводность топливных материалов необходимо учитывать при конструировании твэлов и расчете характеристик активной зоны реакторов с термоэмиссионным преобразованием тепловой энергии в электрическую. Применение для этих твэлов топлива с хорошей электропроводностью позволяет повысить КПД преобразователя.

Электропроводность и теплопроводность материалов взаимосвязаны: в материалах с металлическим характером связи основной вклад в перенос тепла вносят свободные электроны, подвижность которых также определяет и электропроводность материала. Поскольку определение электропроводности материалов значительно проще, чем определение их теплопроводности, данные об электропроводности используются для расчетной оценки теплопроводности [2].

1.2 Матричные материалы

Матрица является важным компонентом дисперсионного ядерного топлива и выполняет функцию радиационной стойкости. ДЯТ используется в реакторах разного типа, работающих в разных условиях, поэтому при выборе материала матрицы нужно учитывать физические, ядерные и механические свойства и экономические показатели. Основное требование для всех материалов матрицы это малая величина поперечного сечения поглощения нейтронов [3, 4], к тому же они должны:

- иметь температуру плавления выше рабочей температуры топливного сердечника твэла;
- иметь совместимость с топливной композицией, материалом оболочки и теплоносителем и не иметь фазовых превращений;
- обладать высокими механическими (твердостью, упругостью, прочностью и т. д.) и теплофизическими (теплопроводность, коэффициент термического расширения и т. д.) свойствами, для обеспечения достаточной теплопередачи от топливной частицы через оболочку к теплоносителю и при этом были способны сдерживать давление выходящих из топлива газообразных продуктов деления.

В исследовательских реакторах и реакторах корабельных ядерных энергетических установок материалом матриц для твэлов служат цирконий и алюминий, а также их сплавы. В энергетических реакторных установках в качестве материала матрицы ДЯТ при производстве твэлов используется нержавеющая сталь. Графит служит матричным материалом ДЯТ при изготовлении твэлов для реакторов HTGR.

Металлы в качестве инертной матрицы привлекли внимание разработчиков IMF-топлива в связи с возможностью создания топливных композиций с высокой теплопроводностью и значительным содержанием делящегося материала. Такие композиции называются «керметами» и обычно содержат более 40 % делящегося материала.

1.2.1 Матричные материалы в виде оксидов металлов

В настоящее время наиболее изученное и используемое ядерное топливо – оксидное (диоксиды урана и плутония), поэтому особое внимание уделено инертным матрицами на оксидных системах.

В качестве матричного материала рассматривали оксид алюминия (Al_2O_3), оксид магния (MgO), оксид иттрия (Y_2O_3), диоксид циркония (ZrO_2). В таблице 1.1 приведены теплофизические свойства оксидных матричных материалов [1].

Таблица 1.1 – Теплофизические свойства оксидных матричных материалов

Свойства	Al_2O_3	MgO	CeO_2	Y_2O_3	ZrO_2
$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	2054	2827	2400	2430	2000
λ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	13,3 (500 $^\circ\text{C}$); 8,2 (1000 $^\circ\text{C}$); 5,8 (1500 $^\circ\text{C}$) -	20,0 (500 $^\circ\text{C}$); 13,0 (1000 $^\circ\text{C}$); 6,0 (1500 $^\circ\text{C}$); 5,0 (2000 $^\circ\text{C}$)	- 1,2 (1000 $^\circ\text{C}$); 0,9 (1500 $^\circ\text{C}$); 1,2 (2000 $^\circ\text{C}$)	4,1 (500 $^\circ\text{C}$); 2,5 (1000 $^\circ\text{C}$); 2,9 (1500 $^\circ\text{C}$); 4,0 (2000 $^\circ\text{C}$)	- 2,2 (1000 $^\circ\text{C}$); 1,5 (1500 $^\circ\text{C}$); 1,8 (2000 $^\circ\text{C}$)

Исходя из данных таблицы 1.1 оксид алюминия, оксид магния и оксид иттрия могут быть использованы в качестве матрицы IMF-топлива.

В работе [5] проведен опыт по облучению образца (в виде таблетки) оксидных матриц IMF-топлива в потоке быстрых нейтронов ($E > 0,1$ МэВ) с максимальной линейной мощностью 4,3 кВт, в ходе которого в центре таблетки температура достигала 1072 К. Полученные данные приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Изменение длины оксидных образцов матричных материалов в результате радиационного воздействия

Материал образца	Длина образца до облучения L_0 , мм	Длина образца после облучения L , мм	Относительное изменение длины $(L-L_0)/L_0$, %
MgO	252,6	253,7	0,4
Al_2O_3	249,0	252,3	1,3
MgAl_2O_4	252,5	252,9	0,2
$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	251,0	248,6	-0,2

Исходя из полученных результатов можно сказать что изменение длины образцов оксидных матриц не существенно, максимальное растяжение претерпел образец из оксида алюминия на 1,3% с погрешностью измерения $\pm 0,4$ мм [5].

1.3 Плазмохимический синтез

Плазмохимическим синтезом называется процесс получения высокодисперсных порошков карбидов, нитридов химическим методом. Высокодисперсные порошки при этом получаются в реакциях, протекающих в неравновесных условиях с высокой скоростью нуклеации, при малой скорости роста центров новой фазы [6]. На практике наночастицы получают плазмохимическим синтезом в условиях быстрого охлаждения потока плазмы при конденсации из газовой фазы. В результате применения такой закалки, образующиеся частицы не успевают «слипнуться» в результате столкновений и поэтому их размер и рост не увеличивается.

В плазмохимическом синтезе применяется низкотемпературная плазма, в качестве сырья служат элементы, галогениды и другие соединения. Параметры получаемых плазмохимическим методом порошков напрямую зависят от используемого сырья, технологии синтеза и типа реактора. Частицы порошков образуются в виде монокристаллов и имеют размеры от 10 до 200 нм. К преимуществам данного метода получения порошков можно отнести высокие скорости образования и конденсации соединения с достаточно высокой производительностью. Недостатком можно назвать низкую селективность процесса, частицы имеют широкое распределение по размерам, и высокое содержание примесей в порошке [7, 8].

Плазмохимический синтез состоит из двух этапов. На первом этапе плазмохимического синтеза образуются активные частицы в дуговых, ВЧ и СВЧ плазмотронах. На втором – выделяются продукты взаимодействия.

Выбор места и скорости синтеза позволяет получать нанопорошки с заданным составом, формой и размером частиц.

1.3.1 Плазмохимический синтез оксидных композиций из водных нитратных растворов

В плазменном реакторе (рисунок 1.1), выполненном в цилиндрической, конической или более сложной формы, с водяным или газовым поверхностным охлаждением, смешиваются потоки плазмы и распыленного на капли нитратного раствора 1. В результате смешения плазмы и капель раствора, последние нагреваются до температуры кипения и из них испаряется вода 2. Затем происходит разложение конденсированного солевого остатка 3 и синтез оксидов с образованием оксидной композиции 4.

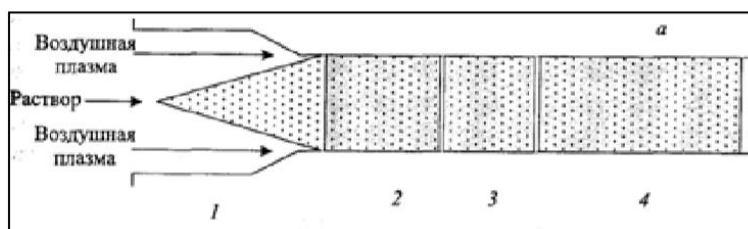


Рисунок 1.1 – Схема установки для плазмохимического синтеза оксидных композиций

Плазмохимическая установка состоит из следующих основных элементов:

1. Плазмотрон, для создания потока низкотемпературной плазмы из газа совместимого с раствором.
2. Источник электропитания плазмотрона.
3. Плазменный реактор, в котором происходят процессы смешения потоков плазмы и раствора и дальнейшее его разложение.
4. Сепаратор, в котором проводится разделение дисперсной и газовой фаз, после которого образуются два материальных потока: поток дисперсного

оксидного материала (целевой продукт), и поток газовой фазы, содержащей водяной пар, кислород и азот с его оксидами.

1.4 Методы отдельного и совместного получения топливных оксидных композиций для дисперсионного уранового ядерного топлива

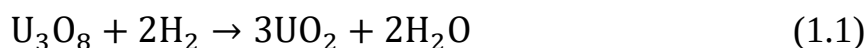
1.4.1 Оксид урана

Оксид урана (UO_2) – неорганическое бинарное химическое соединение урана с кислородом – имеющее тёмно-коричневый цвет. Основное применение – ядерное топливо для реакторов.

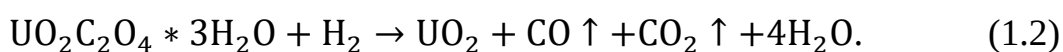
Оксид урана в зависимости от состава имеет температуру плавления от 2840 до 2875 °С. Диоксид урана – соединение имеющее состав от $\text{UO}_{1,6}$ до $\text{UO}_{2,5}$. Диоксид урана термодинамически устойчив при нагревании в вакууме или в восстановительной атмосфере до температуры 1600 °С и возгоняется без разложения. При более высокой температуре он теряет кислород с образованием достехиометрического диоксида [9].

Диоксид урана обладает сильно-основными свойствами, не реагирует с водой и её парами до 300 °С, не растворяется в соляной кислоте, но растворим в азотной кислоте и смеси HNO_3 и HF . Известен один кристаллогидрат диоксида урана $\text{UO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - чёрный осадок, выпадающий при гидролизе растворов урана. Диоксид урана входит в состав урановых минералов уранинита и клевеита [9].

Диоксид урана можно получить, восстанавливая водородом высшие оксиды:

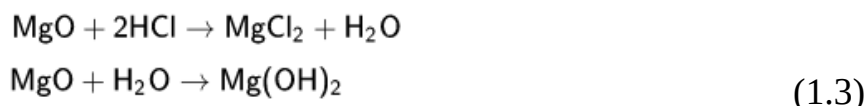


или оксалат уранила:

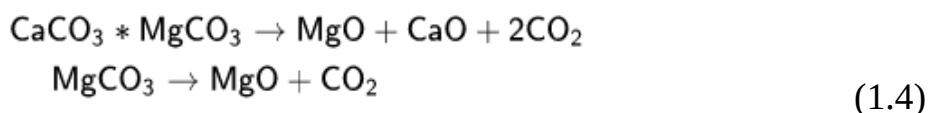


1.4.2 Оксид магния: свойства и получение

Оксид магния (MgO) – легкий, рыхлый порошок белого цвета, легко впитывает воду. Температура плавления – 2825 °С. Температура кипения – 3600 °С. Плотность – 3,58 г/см³. Реагирует с разбавленными кислотами с образованием солей, плохо - с холодной водой, образуя Mg(OH)₂. С горячей водой реагирует лучше, реакция идет быстрее [9].



Оксид магния получают обжигом минералов магнезита и доломита.



Безводный магния нитрат получают взаимодействием Mg с N₂O₄ с последующим отщеплением N₂O₄, гидратированный – реакцией MgCO₃ или MgO с разбавлением HNO₃ [9].

1.4.3 Получение топливных оксидных композиций «UO₂–MgO»

Авторами работы [8] физическими расчетами определено, что фактически объемная доля диоксида урана в инертной матрице составляет примерно 15 %. Предварительно с использованием диоксида урана сравнили две технологические схемы получения топливных таблеток композиции 15 % диоксида урана – 85 % оксида магния: методами механического смешения порошков и осаждения гидроксида магния и полиураната аммония из нитратного раствора. Предпочтение было отдано технологии получения таблеток с осаждением растворов, т.к. в этом случае достигается более равномерное распределение диоксида урана, повышенная плотность, более высокий коэффициент теплопроводности. Работа проводилась в герметичных перчаточных боксах горячей лаборатории ФЭИ.

Для приготовления раствора нитратов урана и магния брали 18,1 г урана, 36,6 г оксида магния и растворяли в азотной кислоте с получением 460

мл раствора с концентрацией, г/л: Mg – 51,5 г/л, U – 42 г/л, HNO_3 – 30 г/л. Осаждение композиции гидроксидов « $\text{U}(\text{OH})_4\text{--Mg}(\text{OH})_2$ » проводилось 25 % раствором аммиака методом одновременного сливания на установке осаждения. На осаждение гидроксидов урана и магния из 460 мл азотнокислого раствора израсходовано 130 мл аммиака для достижения pH среды 10.5. Продолжительность осаждения составляла 3 ч, температура пульпы в процессе осаждения поддерживалась равной 40-40 °С.

На рисунке 1.2 – технологическая схема получения таблеток композиции « $\text{UO}_2\text{--MgO}$ » с осаждением гидроксида магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и $\text{Pu}(\text{OH})_4$ из растворов:

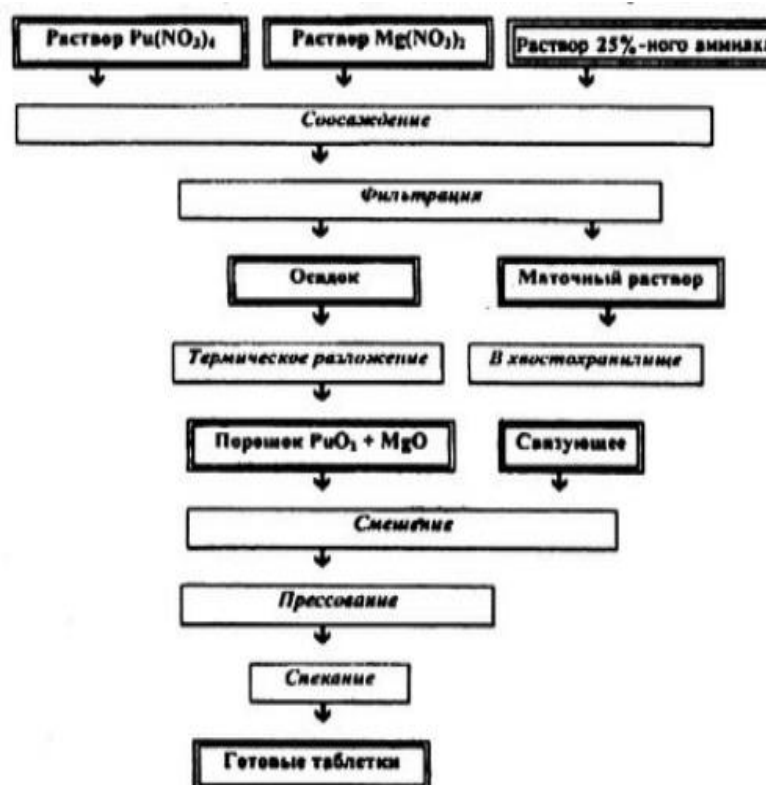


Рисунок 1.2 – Технологическая схема получения таблеток топливной оксидной композиции « $\text{UO}_2\text{--MgO}$ »

2 Расчетная часть

2.1 Расчет показателей горючести ВОНР

Высшую теплотворную способность водно-органического нитратного раствора определяли по уравнению [1]

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

где Q_n^c – низшая теплота сгорания органического компонента в составе ВОНР, кДж/кг; W и A – массовая доля воды и негорючих компонентов в составе ВОНР соответственно, %; 2,5 – значение скрытой теплоты испарения воды при 273 К, кДж/кг.

Требование достижения значения показателя $Q_n^p \geq 8,4$ МДж/кг для того чтобы смесь считалась горючей, является завышенным для большого числа используемых в промышленности композиций, содержащих горючие компоненты с низкими значениями Q_n^c , но с высокой жаропроизводительностью. Более объективным показателем горючести водно-органического нитратного раствора является адиабатическая температура горения ($T_{ад}$), которую оценивали по формуле [1]:

$$T_{ад} = \frac{(100 - v_{ок})Q_n^p + v_{ок}C_{ок}t_{ок}}{100v}, \quad (2.2)$$

где $v_{ок}$ – массовая доля окислителя (воздуха), %; $C_{ок}$ – теплоемкость окислителя, кДж/(кг·К); $t_{ок}$ – температура окислителя, К; v – удельная равновесная теплоемкость продуктов плазменной переработки ВОНР, кДж/(кг·К).

Выбранный нами органический компонент – ацетон имеет следующие параметры: $Q_n^c = 31,54$ МДж/кг; $T_{вспышки} = 254$ °С; $T_{самовоспл.} = 738$ °С [9].

Проведен расчет Q_n^p растворов ВОНР $[UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + H_2O + C_3H_5OH]$ и $[UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O + H_2O + C_3H_5OH]$ и определены составы, при которых $T_{ад} \approx 1550$ К для обеспечения их

энергоэффективной плазменной переработки в воздушно-плазменном потоке. Результаты расчета представлены в табл. 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 – Исследуемые составы плазмохимического синтеза ОК урана и магния из ВОНР, включающих органический компонент при массовой доли оксида магния 5, 10, 20 и 50 %

№	Состав ТОК	Состав ВОНР, %				Q _{нр} , МДж/кг
		UO ₂ (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	H ₂ O	C ₃ H ₅ OH	
1	95%UO ₂ –5%MgO	33,999	9,553	28,448	28,000	6,793
2	90%UO ₂ –10%MgO	25,725	15,260	31,015	28,000	6,729
3	80%UO ₂ –20%MgO	15,898	21,219	33,883	29,000	6,925
4	50%UO ₂ –50%MgO	5,004	26,717	37,279	31,000	7,376

Таблица 2.2 – Исследуемые составы плазмохимического синтеза ОК урана и иттрия из ВОНР, включающих органический компонент при массовой доли оксида иттрия 5, 10, 20 и 50 %

№	Состав ТОК	Состав ВОНР, %				Q _{нр} , МДж/кг
		UO ₂ (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	Y(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	H ₂ O	C ₃ H ₅ OH	
5	95%UO ₂ -5%Y ₂ O ₃	42,390	4,895	26,715	26,000	6,300
6	90%UO ₂ -10%Y ₂ O ₃	37,112	9,048	27,840	26,000	6,272
7	80%UO ₂ -20%Y ₂ O ₃	28,566	15,669	29,765	26,000	6,224
8	50%UO ₂ -50%Y ₂ O ₃	12,412	27,233	33,355	27,000	6,402

В таблице 2.3 приведены теплофизические свойства оксидных матричных материалов [4].

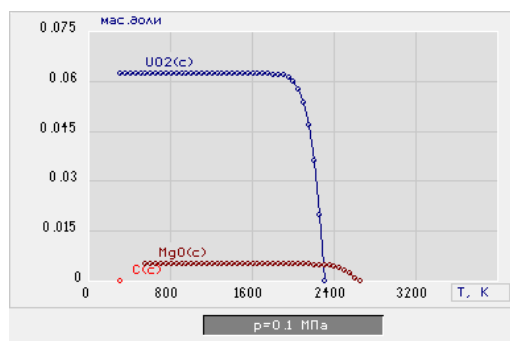
Таблица 2.3 – Теплофизические свойства оксидных матричных материалов

Свойства	MgO	Y ₂ O ₃
T _{пл} , °C	2827	2430
λ, Вт/(м·К)	20,0 (500 °C); 13,0 (1000 °C); 6,0 (1500 °C); 5,0 (2000 °C)	4,1 (500 °C); 2,5 (1000 °C); 2,9 (1500 °C); 4,0 (2000 °C)

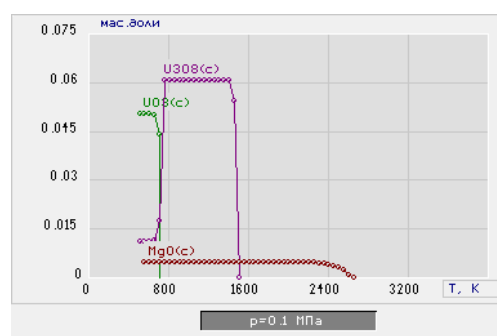
2.2 Термодинамическое моделирование процесса плазмохимической переработки растворов ВОНР

В лицензионной программе «TERRA» были проведены термодинамические расчеты равновесных составов продуктов плазменной переработки растворов ВОНР.

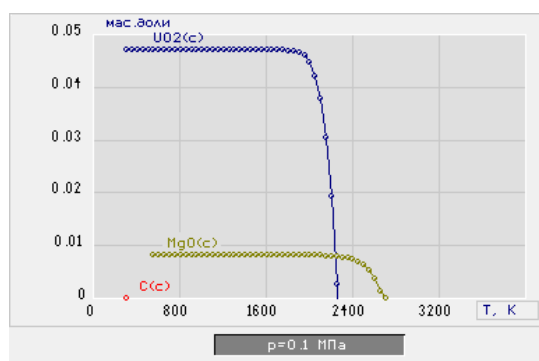
Результаты моделирования приведены на рисунках 2.1-2.



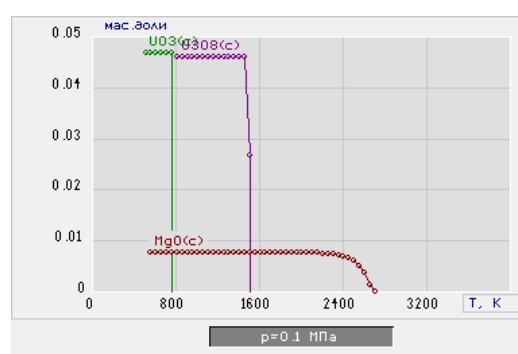
A-1



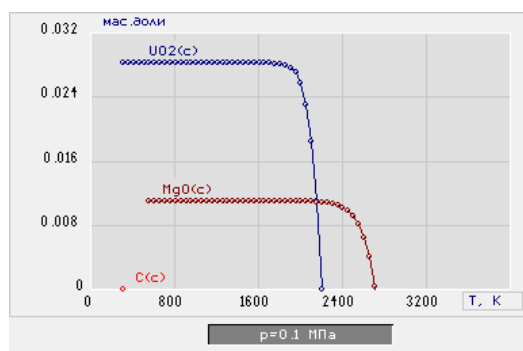
Б-1



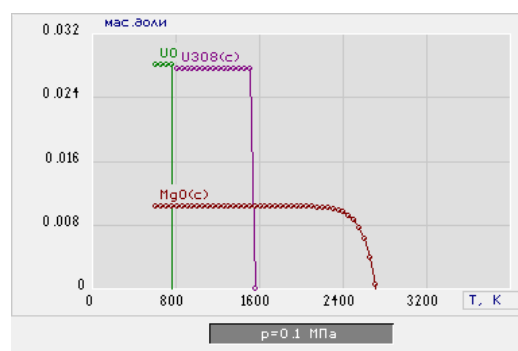
A-2



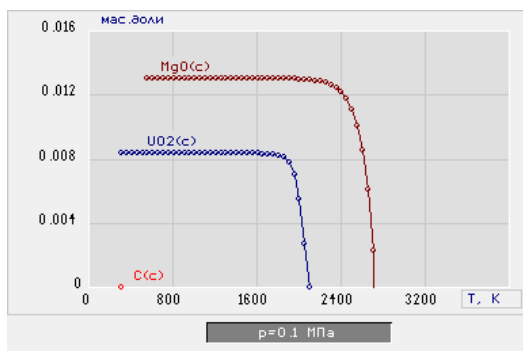
Б-2



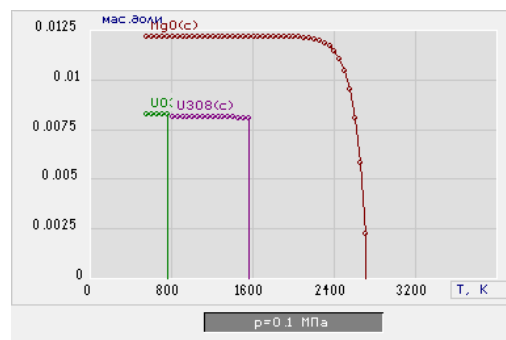
A-3



Б-3



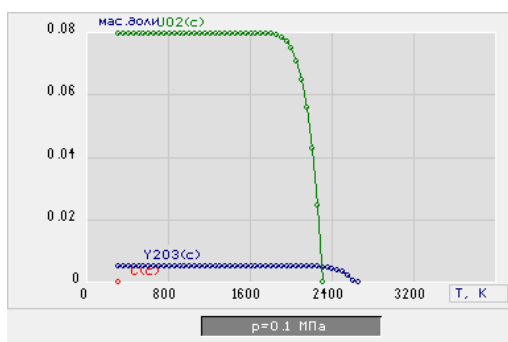
А-4



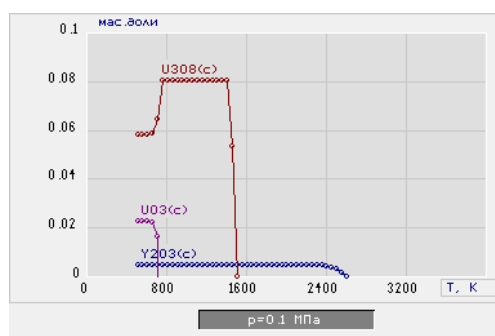
Б-4

Рисунок 2.1 – Влияние температуры на равновесные составы продуктов плазменной переработки растворов ВОНР 1-4 в конденсированных фазах при массовой доле воздуха 66 % (А) и 70 % (Б)

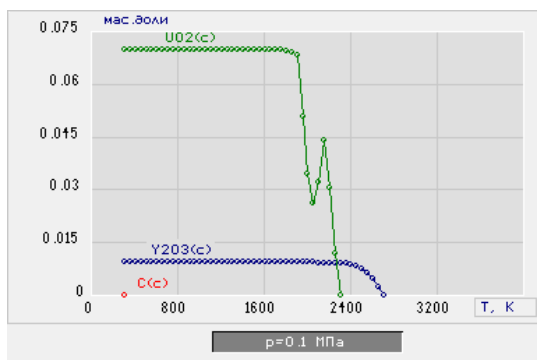
Из анализа равновесного состава (рисунок 2.1) видно, что при массовой доле воздуха 66 % (А-1÷А-4) основными продуктами воздушно-плазменной переработки растворов ВОНР 1-4 являются целевой диоксид урана $\text{UO}_2(\text{с})$ и оксид магния $\text{MgO}(\text{с})$ в конденсированных фазах, образующих требуемые ТОК 1-4. С уменьшением доли воздуха (менее 65 %) существенно увеличивается содержание углерода $\text{C}(\text{с})$ в составе продуктов. Увеличение доли воздуха более 70 % приводит к нежелательному образованию закиси-оксида урана $\text{U}_3\text{O}_8(\text{с})$.



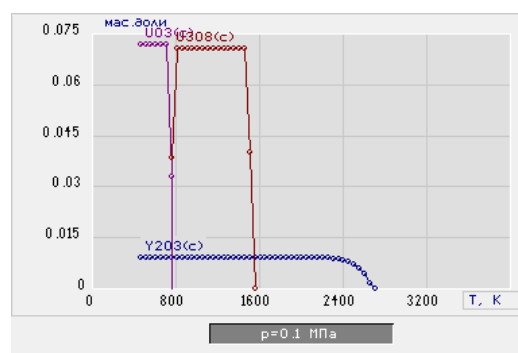
А-5



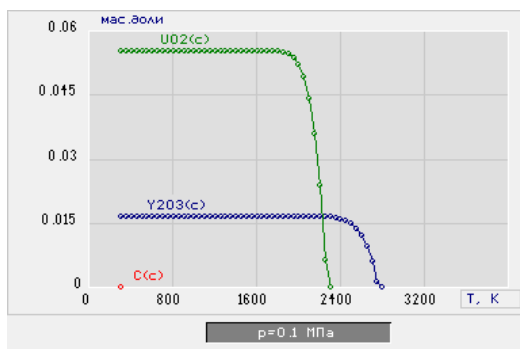
Б-5



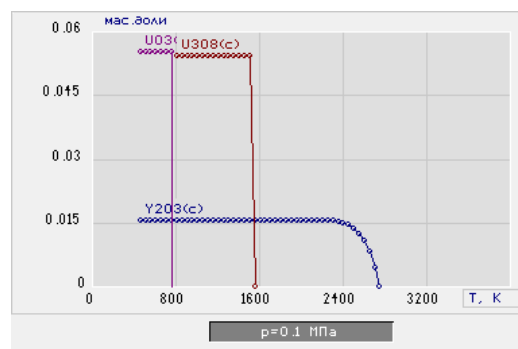
А-6



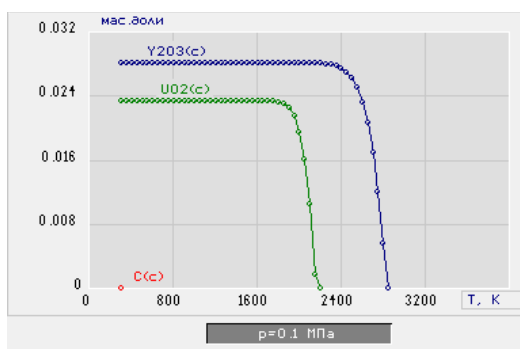
Б-6



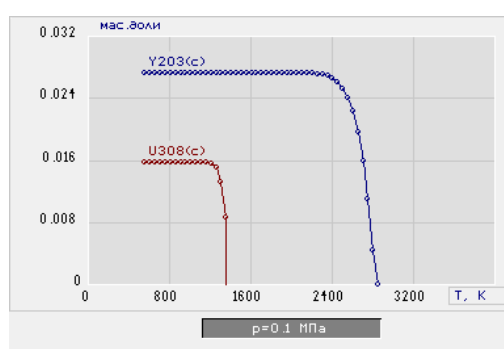
А-7



Б-7



А-8



Б-8

Рисунок 2.2 – Влияние температуры на равновесные составы продуктов плазменной переработки растворов ВОНР 5-8 в конденсированных фазах при массовой доле воздуха 65 % (А) и 67 % (Б)

Из полученных данных следует, что при массовой доле воздуха 65 % основными продуктами воздушно-плазменной переработки растворов ВОНР 5-8 являются целевой диоксид урана $\text{UO}_2(\text{с})$ и оксид иттрия $\text{Y}_2\text{O}_3(\text{с})$ в конденсированных фазах, образующих требуемые ТОК 5-8. С уменьшением доли воздуха менее 64 % существенно увеличивается содержание углерода

C(c) в составе продуктов. Увеличение доли воздуха более 67 % приводит к нежелательному образованию закиси-оксида урана $U_3O_8(c)$.

2.3 Расчет параметров получения модельных топливных оксидных композиций из растворов ВОНР

В таблицах 2.4–5 представлены составы растворов ВОНР и массовые доли воздуха для плазмохимического синтеза требуемых топливных оксидных композиций « $UO_2 - MgO$ » и « $UO_2 - Y_2O_3$ » различного состава.

Таблица 2.4 – Результаты расчетов определения оптимальных композиций «Воздух-ВОНР» для Mg при массовой доле воздуха

№	Состав ТОК	Состав ВОНР, %				Воздух, %
		$UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	H_2O	C_3H_5OH	
1	95% UO_2 –5%MgO	11,220	3,153	9,388	9,240	67,000
2	90% UO_2 –10%MgO	8,747	5,188	10,545	9,520	66,000
3	80% UO_2 –20%MgO	5,246	7,002	11,181	9,570	67,000
4	50% UO_2 –50%MgO	1,551	8,282	11,556	9,610	69,000

Таблица 2.5 – Результаты расчетов определения оптимальных композиций «Воздух-ВОНР» для Y при массовой доле воздуха

№	Состав ТОК	Состав ВОНР, %				Воздух, %
		$UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	$Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	H_2O	C_3H_5OH	
5	95% UO_2 –5% Y_2O_3	14,836	1,713	9,350	9,100	65,000
6	90% UO_2 –10% Y_2O_3	12,989	3,167	9,744	9,100	65,000
7	80% UO_2 –20% Y_2O_3	9,998	5,484	10,418	9,100	65,000
8	50% UO_2 –50% Y_2O_3	4,344	9,532	11,674	9,450	65,000

Расчет общих энергозатрат на процесс плазменной переработки растворов ВОНР:

$$\mathcal{E}_{\text{общ}} = I_T - I_{300}, \quad (2.3)$$

где I_T – энтальпия продуктов воздушно-плазменной переработки 1 кг ВОНР при температуре T, МДж/кг; I_{300} – энтальпия продуктов плазменной переработки ВОНР при температуре 300 К, МДж/кг.

Расчет и оценка удельных энергозатрат на получение 1 кг топливной оксидной композиции проводился по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{уд}} = \mathcal{E}_{\text{общ}}/Z_{\text{ТОК}}, \quad (2.4)$$

где $Z_{\text{ТОК}}$ – массовая доля топливной оксидной композиции в составе продуктов плазменной переработки раствора ВОНР.

Сравнительная характеристика получаемых ТОК представлена в приложении Б.

В результате анализа приведенной сравнительной характеристики можно заметить, что требуемая адиабатическая температура горения достигает требуемого значения в 1550 К при $Q_{\text{н}}^{\text{р}} \approx 6,8$ МДж/кг и массовой доли воздуха ≈ 67 % для матрицы из магния и при $Q_{\text{н}}^{\text{р}} \approx 6,3$ МДж/кг и массовой доли воздуха ≈ 65 % для матрицы из иттрия. Оценка удельных энергозатрат показала, что более энергоэффективным составом ТОК является 95 % UO_2 – 5 % MgO для матрицы из магния и 95 % UO_2 – 5 % Y_2O_3 для матрицы из иттрия. Исходя из теплофизических свойств оксидных матричных материалов и малой разницы в удельных энергозатратах можно сделать вывод, что матрица на основе магния является более оптимальной и эффективной в виду ее лучшей теплопроводности относительно матрицы из иттрия ($\lambda(\text{MgO}) = 6$ Вт/(м·К), $\lambda(\text{Y}_2\text{O}_3) = 2,9$ Вт/(м·К)).

2.4 Рекомендации для практической реализации процесса

Исходя из полученных результатов термодинамического моделирования плазмохимической переработки растворов ВОНР–1÷8, для минимизации удельных энергозатрат на плазмохимический синтез топливных оксидных композиций ТОК–1÷8 могут быть рекомендованы следующие режимы для практической реализации процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов урана и магния, включающих органический компонент:

1. Состав раствора ВОНР: делящийся металл (уран), металл матрицы (магний) и ацетон;

2. Массовая доля воздуха: (66-67) %;
3. Массовая доля матрицы (MgO) в ТОК: (5-20) %;
4. Рабочая температура: (1500 ± 200) К;
5. Удельные энергозатраты: (25,4-45,8) МДж/кг.

3 Экспериментальная часть

3.1 Описание экспериментальной установки на базе ВЧФ – плазмотрона

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном плазменном стенде (рисунок 3.1) на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01 на модельных ВОНР, включающих органический компонент (этанол), а также водные нитратные растворы металла матрицы (магния, иттрия) и неодима вместо делящегося металла (урана).

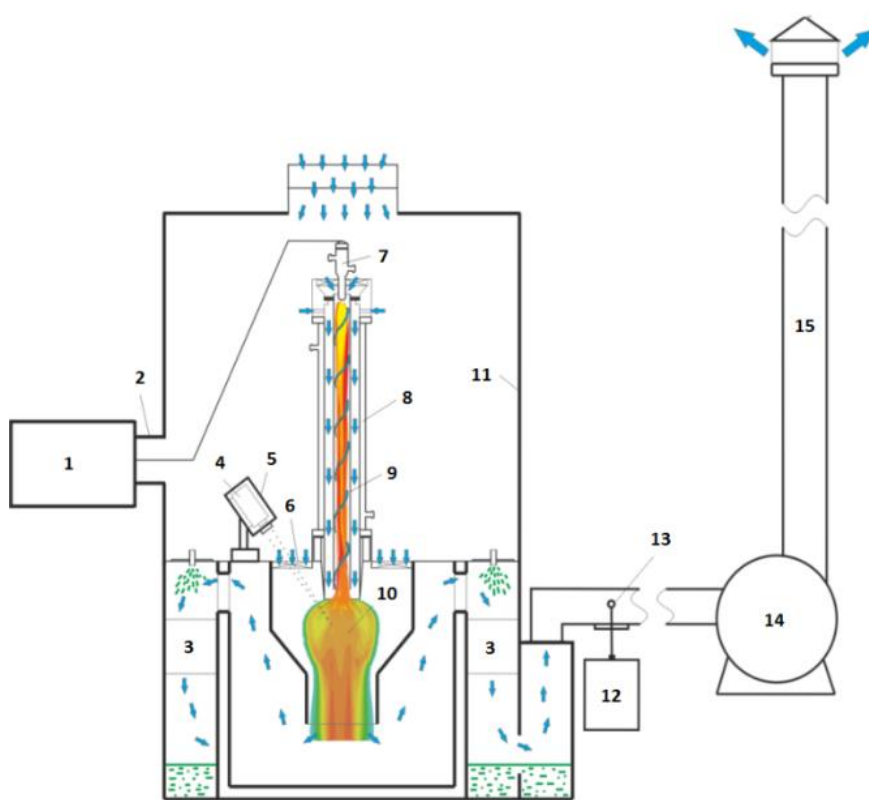


Рисунок 3.1 – Схема лабораторного плазменного стенда на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01: 1 — высокочастотный генератор; 2 — коаксиальный вывод; 3 — узел «мокрой» очистки отходящих газов; 4 — пирометр IPE 140/45; 5 — защитный кожух пирометра; 6 — плазмохимический реактор с импеллером; 7 — медный электрод; 8 — ВЧФ-плазмотрон; 9 — ВЧФ-разряд; 10 — диспергатор; 11 — корпус; 12 — газоанализатор; 13 — пробоотборник; 14 — вытяжной вентилятор; 15 — воздуховод

Высоконапорный вытяжной вентилятор 14 прокачивает воздух через ВЧФ-плазмотрон 8 и реактор плазменного стенда.

На входе в ВЧФ-плазмотрон установлен импеллер с постоянной входной площадью $S_{\text{вх}}=25 \text{ см}^2$, который закручивает поступающий плазмообразующий газ в разрядную камеру. Для измерения рабочей температуры в реакторе плазменной струи установлен пирометр 4.

После реактора установлен газоанализатор 12 с пробоотборником 13, который определяет содержание загрязняющих веществ (CO , NO , NO_2) в отходящих после реактора газах.

3.2 Расчет расхода плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон

Расход воздуха через воздуховод определяется с помощью трубки Пито (рисунок 3.2).

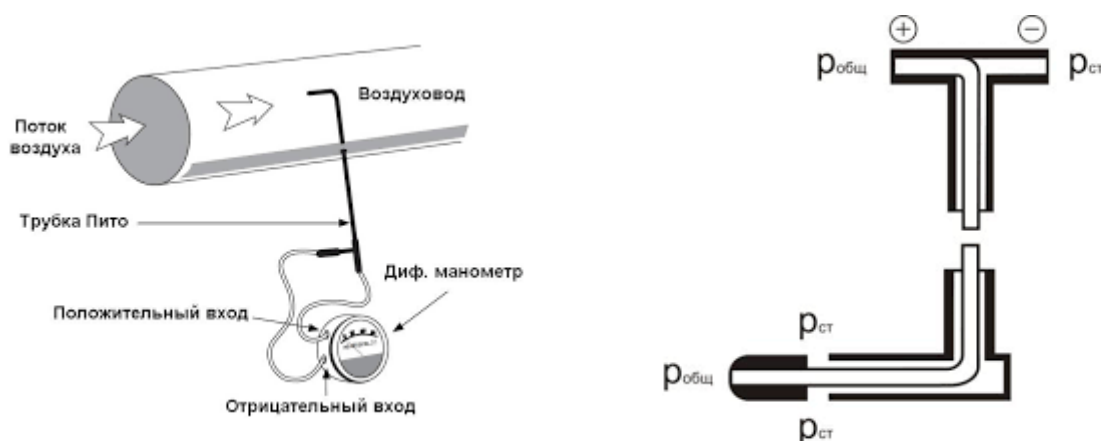


Рисунок 3.2 – Схема определения расхода воздуха в воздуховоде с помощью трубки Пито

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

$$f = \frac{\rho V^2}{2} = P_{\text{общ}} - P_{\text{ст}}, \quad (3.1)$$

где $P_{\text{общ}}$ – общее давление, Па;

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

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

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

Скорость набегающего потока из формулы 3.1:

$$V = \left[\frac{2(P_{\text{общ}} - P_{\text{ст}})}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.2)$$

Объёмный (массовый) расход воздуха через воздуховод:

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

где S – площадь поперечного сечения воздуховода.

По результатам полученных данных были построены графики расхода плазмообразующего газа (воздуха) через ВЧФ-плазмотрон ($Q_{\text{пт}}$), а также воздушного теплоносителя через газоход ($Q_{\text{гхд}}$) в зависимости от величины входной площади импеллера реактора. Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздуха через ВЧФ-плазмотрон и газоход представлено на рисунках 3.3-4.

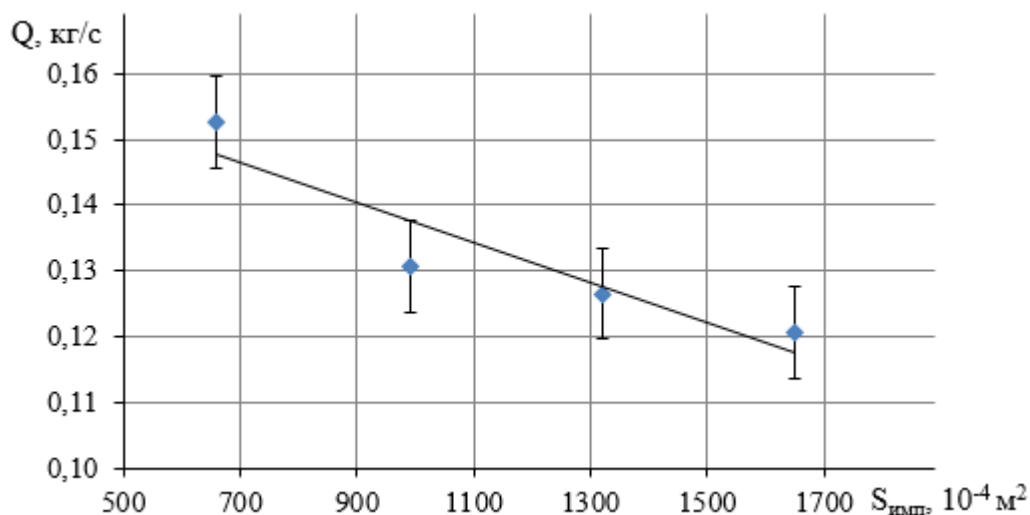


Рисунок 3.3 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон

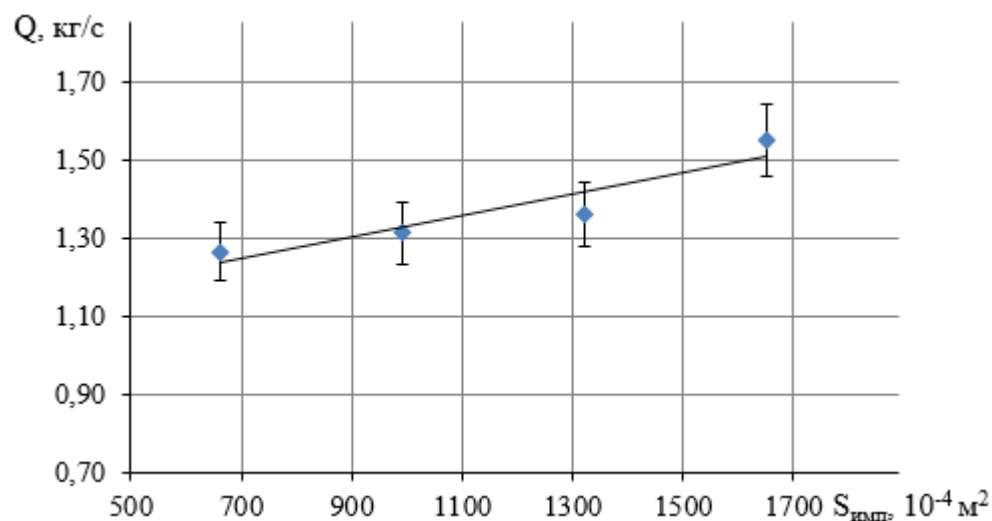


Рисунок 3.4 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход плазмообразующего газа через газоход

3.3 Расчет расхода газа через реактор

Расчета расхода воздуха через реактор:

$$Q_p = Q_{\text{ГХД}} - Q_{\text{ПТР}}, \quad (3.4)$$

где Q_p – расход воздуха через реактор, кг/с;

$Q_{\text{ГХД}}$ – расход воздуха через газоход, кг/с;

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

В результате расчетов получена зависимость расходов воздушного теплоносителя через реактор плазменного стенда в зависимости от входной площади импеллера реактора. С помощью полученных данных был построен график зависимости расхода газа через реактор от площади шибера, который представлен на рисунке 3.5.

Данные для построения графиков 3.3-3.5 приведены в приложении Б.

Таким образом, с помощью изменения шибера входной площади импеллера можно плавно регулировать расход воздуха через плазмотрон.

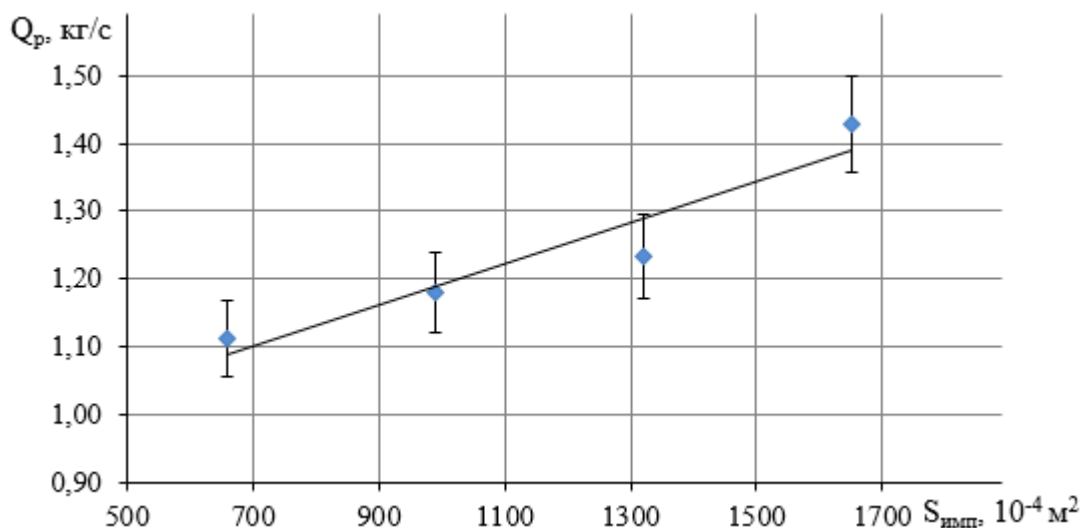


Рисунок 3.5 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздушного теплоносителя через реактор

3.4 Расчет основных технологических параметров установки

Расчет технологических параметров работы установки.

Мощность, потребляемая ВЧГ от промышленной сети:

$$P_0 = I_a U_a, \text{ кВт}, \quad (3.5)$$

где I_a – ток анода, А;

U_a – напряжение на аноде генераторной лампы, кВ.

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

$$P_i = m_i C \Delta t_i \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (3.6)$$

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

C – теплоемкость воды, ккал/кг·°С,

Δt_i – изменение температуры охлаждающей воды, °С.

Мощность ВЧФ-разряда:

$$P_p = P_0 - (P_a + P_c + P_s), \text{ кВт}. \quad (3.7)$$

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

$$P_{cm} = P_p - P_k, \text{ кВт.} \quad (3.8)$$

Энтальпия плазменной струи:

$$H = H_0 + \frac{P_{разр}}{Q_{нз}}, \text{ кДж/кг,} \quad (3.9)$$

где H_0 – энтальпия газовой смеси при температуре 300 К;

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

КПД ВЧФ-плазмотрона:

$$\eta = \left(\frac{P_{cm}}{P_p} \right) \cdot 100, \%. \quad (3.10)$$

Установочный КПД плазменного стенда:

$$\eta = \left(\frac{P_{cm}}{P_0} \right) \cdot 100, \%. \quad (3.11)$$

Полученные данные приведены в приложении Б. Режим работы плазмотрона подбирался таким образом, чтобы температура пламенной струи была не меньше температуры воспламенения горючего компонента перерабатываемого раствора ВОНР.

В ходе проведенных исследований были определены оптимальные параметры совместной работы высокочастотного генератора, высокочастотного факельного плазмотрона и плазмохимического реактора в составе лабораторного плазменного стенда:

- высокочастотный генератор (напряжение анодное 5,6 кВ, ток анодный 3,5 А, ток сеточный 1,2 А);
- высокочастотный факельный плазмотрон (мощность воздушной плазменной струи 15,0 кВт);
- реактор (входная площадь импеллера реактора 0,132 м², расход воздуха через реактор 0,95 кг/с).

3.5 Подготовка и плазменная переработка растворов ВОНР

Для подготовки модельных водно-органических нитратных растворов использовали соли нитрата неодима вместо нитрата уранила и нитрата магния

для образования матрицы в виде оксида магния в составе оксидной композиции «оксид неодима – оксид магния». Вначале готовили на дистиллированной воде водный нитратный раствор из нитратных солей металлов и затем смешивали с органическим компонентом (ацетоном) для получения водно-органического нитратного раствора заданного состава. Подготовленный раствор ВОНР подается с постоянным расходом 300 л/ч через диспергатор в реактор, где под действием воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ плазмотроном, осуществлялся «розжиг» реактора, переработка диспергированного раствора в воздушно-плазменном потоке и плазмохимический синтез оксидных композиций при температуре 1373 ± 50 К. Контроль температуры осуществляли высокоточным цифровым инфракрасным пирометром по линии поглощения диоксида углерода. Из реактора пыле-парогазовая смесь поступала на центробежно-барботажные аппараты узла «мокрой» очистки отходящих газов, где происходило ее резкое охлаждение («закалка») оборотной водой с образованием водных суспензий оксидных композиций. Очищенные отходящие газы забирались высоконапорным вытяжным вентилятором и выбрасывались через воздуховод в атмосферу. Получаемые суспензии перекачивали в емкости из нержавеющей стали, отбирали пробы для определения гранулометрического состава оксидных композиций методом лазерной дифракции. Затем водные суспензии отстаивали, полученные осадки отделяли, фильтровали и прокаливали в течение 20 минут при температуре 423 К.

3.6 Анализ полученных оксидных композиций

Исследования морфологических, структурных, кристаллических и других свойств полученных оксидных композиций проводили на аналитическом оборудовании Центра коллективного пользования «Научно-образовательный инновационный центр «Наноматериалы и нанотехнологии» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» [1].

Для определения гранулометрического состава водных суспензий оксидных композиций использовали метод лазерной дифракции, реализованный на приборе SALD-7101 (производства компании «Шимадзу», Япония). Для сопоставления с другими свойствами синтезированных порошков использовали количественный результат в виде медианного значения полученного распределения, равного широко применяемому в производстве техническому параметру D_{50} . Поскольку использованный метод позволяет определить размер частиц в суспензии независимо от их структурного строения, включая жёсткие агломераты, этот результат использовали для определения степени агломерации полученных порошков оксидных композиций.

Величину удельной поверхности исследуемых порошков ($S_{уд}$) оценивали методом Брунауэра – Эммета – Теллера на приборе Сорби-М (производства ЗАО «МЕТА», Россия). Полученные данные пересчитывали в размер частиц исходя из предположения об их сферической геометрии.

Рентгенофазовый анализ полученных порошков оксидных композиций проводили на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 (производства компании «Шимадзу», Япония). Затем определяли фазовый состав порошков, параметры кристаллической структуры обнаруженных фаз, а также средние размеры областей когерентного рассеяния кристаллитов ($D_{крис}$).

В таблице 3.1 приведены составы растворов ВОНР используемые для получения модельных оксидных композиций. В таблице 3.2 приведены физико-химические свойства полученных оксидных композиций на основе оксидов неодима и магния, имитирующих урановое дисперсионное ядерное топливо.

Таблица 3.1 – Состав модельных ВОНР, необходимых для получения модельных ОК

Оксидная композиция		Состав ВОНР			
№	Состав ОК	№	$\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, г/л	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, г/л	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$, г/л
1	95 % Nd_2O_3 – 5 % MgO	ВОНР-1	309,6	80,1	63,3
2	90 % Nd_2O_3 – 10 % MgO	ВОНР-2	293,4	160,2	62,3
3	80 % Nd_2O_3 – 20 % MgO	ВОНР-3	260,8	320,5	60,3
4	50 % Nd_2O_3 – 50 % MgO	ВОНР-4	163,0	801,3	56,0

Таблица 3.2 – Результаты анализа модельных ОК, полученных из модельных растворов ВОНР

Оксидная композиция		Лазерная дифракция ОК	БЭТ-анализ ОК	
№	Состав ОК	D_{50} , мкм	S , м ² /г	$D_{\text{крист}}$, нм
ВОНР-1	95 % Nd_2O_3 – 5 % MgO	13,2	7,9	94,0
ВОНР-2	90 % Nd_2O_3 – 10 % MgO	9,4	9,2	89,0
ВОНР-3	80 % Nd_2O_3 – 20 % MgO	6,8	14,2	64,0
ВОНР-4	50 % Nd_2O_3 – 50 % MgO	4,7	16,2	52,0

Из анализа полученных результатов видно, что при увеличении массовой доли матрицы (MgO) от 5 % до 50 % в составе ОК « Nd_2O_3 – MgO » при плазменной переработки растворов ВОНР приводит к снижению размера частиц ОК в водных суспензиях с 13,2 до 4,7 мкм, увеличению удельной поверхности полученных порошков с 7,9 до 16,2 м²/г и снижению размера кристаллитов в их составе с 94 до 52 нм.

На рисунке 3.6 показано характерное СЭМ-изображение морфологической структуры частиц порошка модельной ОК-3. Прессование порошковых материалов проводилось в стальной цилиндрической пресс-форме диаметром 10 мм под давлением 400 МПа с последующим спеканием полученных прессовок при температуре 1300 °С. Микрофотографии спеченной керамики приведены на рисунке 3.7.

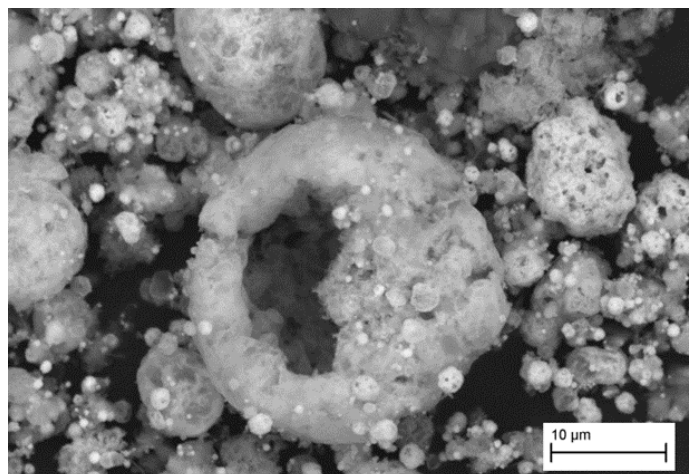


Рисунок 3.6 – Характерное СЭМ-изображение морфологической структуры частиц порошка модельной ОК-3

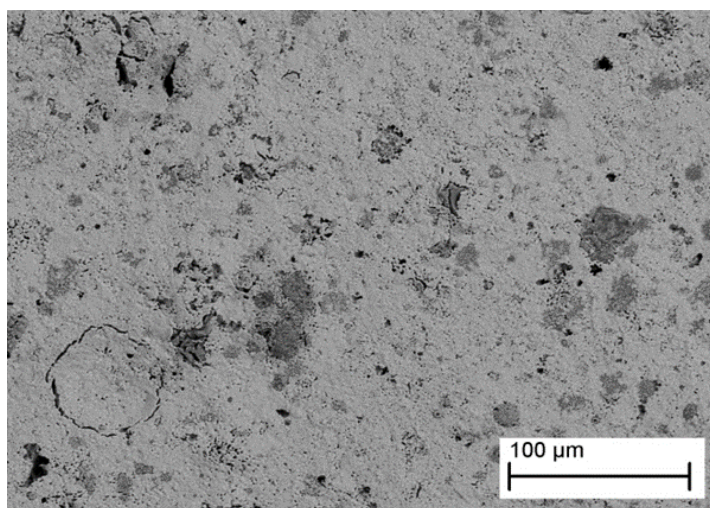


Рисунок 3.7 – Характерная микрофотография спеченной керамики из порошка модельной ОК-3

Анализ СЭМ-изображения подтверждает достаточно широкий диапазон размеров частиц, наличие различных фаз, мелких плотных частиц, а также частиц с чрезвычайно развитой поверхностью и внутренними порами. Изображение показывает, что частицы, в основном, имеют округлую форму.

На рисунках 3.8-10 показано влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц ОК в водных суспензиях (метод ЛД), удельной поверхности и размера кристаллитов в составе полученных порошков ОК – (1-4) (БЭТ-анализ).

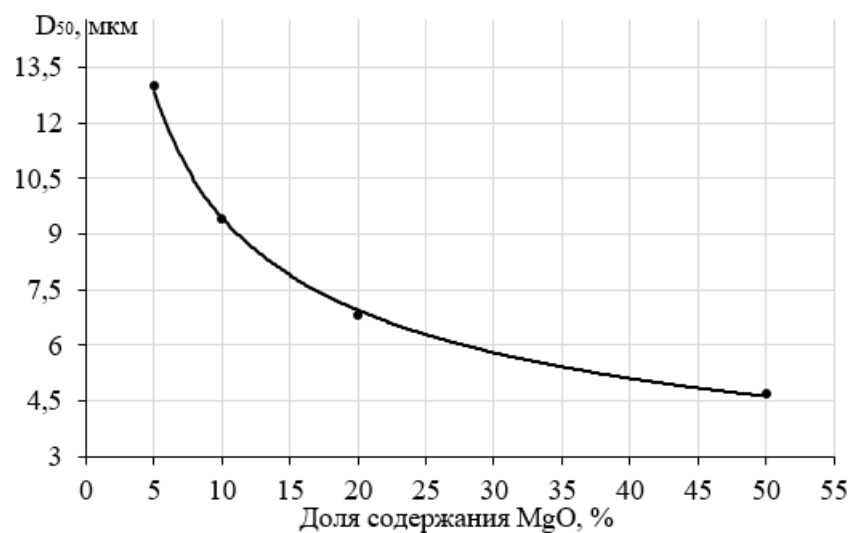


Рисунок 3.8 – Влияние содержания MgO на размер D_{50} для ОК–1-4 (метод ЛД)

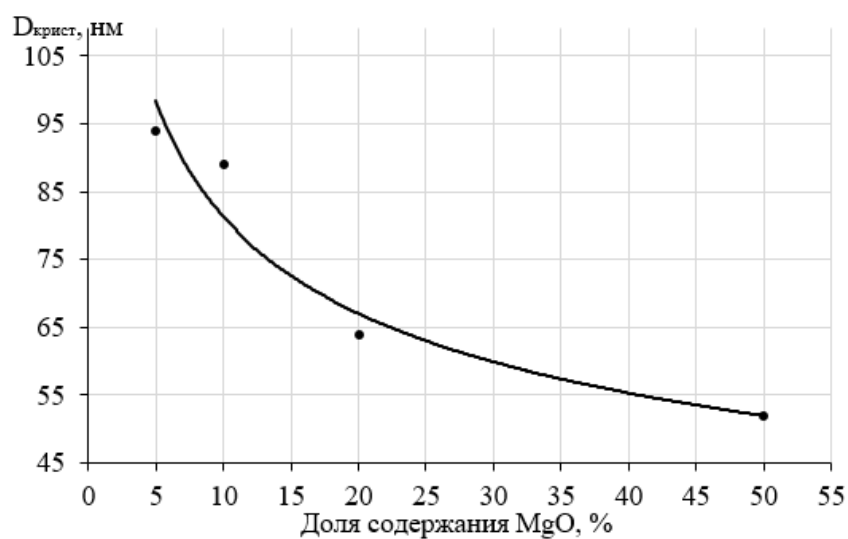


Рисунок 3.9 – Влияние содержания матрицы MgO на размер кристаллитов в составе полученных порошков ОК –1-4 (БЭТ-анализ)

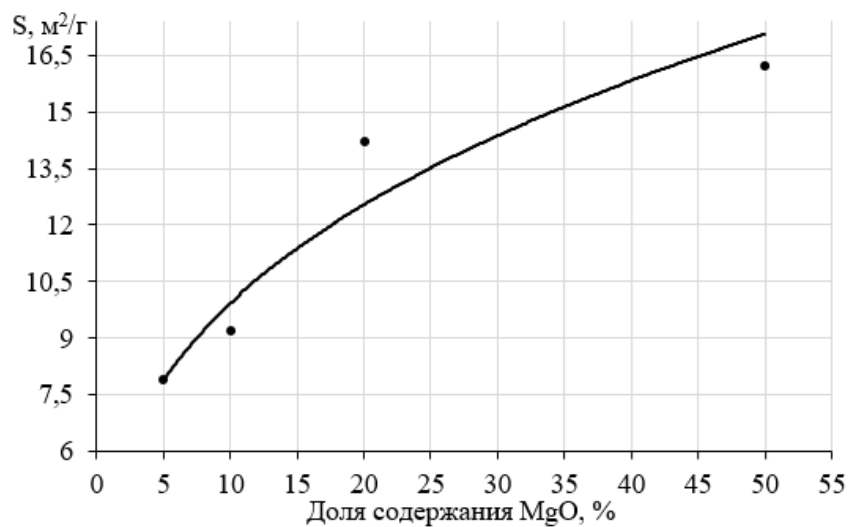


Рисунок 3.10 – Влияние содержания матрицы (MgO) на удельную поверхность и размер кристаллитов в составе порошков ОК – 1-4 (БЭТ-анализ)

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является оценка плазмохимического синтеза и исследования оксидных композиций, имитирующих дисперсионное ядерное топливо с позиции ресурсоэффективности и конкурентоспособности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить потенциальных потребителей результатов исследования.
2. Провести анализ конкурентных технических решений.
3. Выполнить SWOT-анализ: описать сильные и слабые стороны проекта, выявить возможности и угрозы для реализации проекта.
4. Оценить степень готовности научной разработки к коммерциализации.
5. Построить календарный план-график проведения работ научно-исследовательского проекта.
6. Рассчитать бюджет научного исследования.
7. Определить ресурсную, финансовую, бюджетную, социальную и экономическую эффективности исследования.

В работе необходимо дать комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов выполненной работы, по изучению процесса синтеза в воздушной плазме оксидных композиций, и оценить полные затраты на исследование (проект), а также дать приближенную экономическую оценку результатов ее внедрения. Это в свою очередь позволит с помощью традиционных показателей эффективности инвестиций оценить экономическую целесообразность осуществления работы.

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В процессе написания магистерской диссертации были определены потенциальные потребители результатов исследования. К ним можно отнести инвестиционные компании, частных инвесторов, научно-исследовательские институты. Для анализа потребителей необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка.

Сегмент рынка – группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

В зависимости от категории потребителей необходимо использовать соответствующие критерии сегментирования. Для коммерческих организаций критериями сегментирования могут быть: месторасположение, отрасль, выпускаемая продукция. Для физических лиц критериями сегментирования могут быть: возраст, национальность, образование.

Сегментировать рынок услуг по разработке математической модели можно по следующим критериям: формирование портфеля, управление портфелем.

Услуги по формированию портфеля:

- инвестиционные компании;
- инвесторы (физ. лица);

Услуги по управлению портфелем:

- инвестиционные компании;
- инвесторы (физ. лица).

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных решений позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

В данной работе был рассмотрен синтез ДЯТ с использованием воздушной плазмы(ф), а в качестве конкурента выбран традиционный метод синтеза ДЯТ (к).

Проведем данный анализ с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 4.1.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по пяти балльной шкале. Веса показателей в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _к	К _ф	К _к
1. Скорость расчёта	0,5	5	4	2,5	2,0
2. Удобство использования выбранной модели	0,3	4	3	1,2	0,9
3. Простота понимания модели	0,1	5	5	0,5	0,5
4. Надежность модели	0,05	4	2	0,2	0,1
5. Сходимость модели	0,03	4	4	0,12	0,12
6. Адаптивность метода	0,02	4	4	0,08	0,08
Итого	1	26	22	4,6	3,7

Таким образом, можно сделать вывод о том, что метод синтез ДЯТ с использованием воздушной плазмы по многим показателям является наиболее

предпочтительным, чем традиционный метод синтеза ДЯТ, что подтверждает коэффициент конкурентоспособности $K_{\phi}(4,6) > K_k(3,7)$.

4.1.3 SWOT-анализ

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

SWOT-анализ заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Приведем матрицу SWOT-анализа для производства дисперсионного ядерного топлива с применением воздушной плазмы в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Одностадийность получения ДЯТ; С2. Невысокая стоимость переработки сырья. С3. Гомогенное распределение фаз в продукте с заданным стехиометрическим составом. С4. Возможность активно влиять на морфологию частиц. С5. Наличие необходимого оборудования для проведения испытаний предлагаемой технологии. С6. Компактность необходимого оборудования. С7. Маленький срок получения результатов при проведении научного исследования.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки. Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных специалистов. Сл3. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ. Сл4. Работа с модельными композициями. Сл5. Большое количество возможных вариантов композиций.
Возможности: В1. Увеличение отходов ядерного производства. В2. Уменьшение количества урана-235. В3. Появление дополнительного спроса на новый продукт. В4. Повышение	Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»: 1. ДЯТ, полученное плазмохимическим синтезом, совершеннее используемого сейчас ЯТ. 2. Россия обладает сравнительно небольшими запасами урана-235, поэтому в недалеком будущем	Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»: 1. Повышение спроса на данную продукцию обеспечит приток кадров. 2. Использование научно-исследовательского

стоимости конкурентных разработок. B5. Использование научно-исследовательских достижений ТПУ.	необходимо будет менять/усовершенствовать использующуюся технологию производства ЯТ. 3. В случае успеха удастся переработать часть захороненного топлива. 4. При благоприятном раскладе станет возможным строительство ядерных энергоустановок четвертого поколения.	потенциала ТПУ позволит подобрать необходимую композицию.
Угрозы: У1. Развитая конкуренция технологии производства. У2. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У3. Неудача эксперимента. У4. Несвоевременное финансовое обеспечение.	Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»: 1. Качественные преимущества нового ДЯТ создают хорошую конкуренцию используемым методам производства ЯТ. 2. Такие факты, как нехватка урана-235 и необходимость сокращения отходов прошлых лет, обеспечат спрос на новые технологии производства ЯТ. 3. Наличие оборудования, необходимого сырья, множества различных композиций обещают продолжение эксперимента в случае неудачи с отдельной композицией или в случае прекращения финансирования.	Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»: 1. Отсутствие данной, новой в своем роде, разработки может обернуться провалом без должного финансирования.

Таким образом, на основе результатов анализа данной матрицы можно сделать вывод о том, что трудности и проблемы, с которыми так или иначе может столкнуться данный исследовательский проект можно будет решить за счет имеющихся сильных сторон разработки, которыми являются:

- одностадийность получения ДЯТ;
- невысокая стоимость переработки сырья;
- гомогенное распределение фаз в продукте с заданным стехиометрическим составом;
- возможность активно влиять на морфологию частиц;
- наличие необходимого оборудования для проведения испытаний предлагаемой технологии и его компактность;
- маленький срок получения результатов при проведении научного исследования.

4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Оценим степень готовности научной разработки к коммерциализации и выясним уровень собственных знаний для ее проведения. Для этого заполним специальную форму (таблица 4.3), содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.

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

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

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i \quad (4.2)$$

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

B_i – балл по i -му показателю.

Если значение $B_{\text{сум}}$ получилось от 75 до 60, то такая разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации. Если от 59 до 45 – то перспективность выше среднего. Если от 44 до 30 – то перспективность средняя. Если от 29 до 15 – то

перспективность ниже среднего. Если 14 и ниже – то перспективность крайне низкая.

Таблица 4.3 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	3
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	3
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	2
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	1
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	1
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	1
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	3
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	2
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	2
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	3	2
	ИТОГО БАЛЛОВ	42	30

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

4.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации.

Для данного научно-технического исследования наиболее предпочтительным является такой метод коммерциализации как инжиниринг. Так как консультант имеет знания и опыт в оказании инженерно-технических услуг, но не имеет возможности построить собственное предприятие, заключается договор с заказчиком. Заказчик имеет собственное производство, но нуждается в дополнительном ведении узконаправленных проектов, которые выступают как вспомогательные для реализации рабочего процесса. Хотя методика и доступна в открытом доступе, необходимы ресурсы для найма сотрудников. В данном случае заказчику выгоднее заключать договор с компанией извне, а не создавать собственный отдел по расчету какой-либо составляющей процесса. Консультант же способен к выполнению большого количества задач и гибкости в отношении их количества и потраченного на проект времени

4.2 Инициация проекта

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

1. Цели и результат проекта.

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

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Информацию по заинтересованным сторонам проекта представим в таблице 4.4.

Представим информацию об иерархии целей проекта и критерия достижения целей в таблице 4.5

Таблица 4.4 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
НИИ	Использование расчетов для увеличения производительности ВЧФ-плазматрона
Компании атомной промышленности	Тестирование наноразмерных порошков области нанотехнологий, создание таблеток на основе дисперсионного ядерного топлива
Частные инвесторы	Получение максимальной доходности в зависимости от вложений

Таблица 4.5 – Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Моделирование и исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций в воздушно-плазменном потоке из диспергированных водно-органических нитратных растворов иттрия и магния.
Ожидаемые результаты проекта:	Создание энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза наноразмерных оксидных композиций из диспергированных ВОНР иттрия и магния, а также других редкоземельных, редких и рассеянных металлов.
Критерии приемки результата проекта:	Получение наноразмерных оксидных композиций.
Требования к результату проекта:	Получение и исследование свойств наноразмерных оксидных композиций из диспергированных ВОНР.

2. Организационная структура проекта.

Определим участников рабочей группы данного проекта, роль каждого участника в данном проекте, а также функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Представим эту информацию в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты час.
1	Беляков Д.М., ТПУ, магистр	Моделирование и исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций в воздушно-плазменном потоке из ВОНР	Основной разработчик проекта	493
2	Каренгин А.Г., ТПУ, к.ф.м.н.	Консультации по основным вопросам темы	Руководитель проекта	60
ИТОГО:				553

3. Ограничения и допущения проекта.

Ограничения проекта – все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Представим эту информацию в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	380697
3.1.1. Источник финансирования	ТПУ
3.2. Сроки проекта:	4 месяца
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	01.02.2022
3.2.2. Дата завершения проекта	21.05.2022

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

4.2.1 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты.

Таблица 4.8 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Внешний	Санкции, кризис	5	3	средний	Использование аналоговых альтернативных программ расчета	Изменение политической и международной конъюнктуры
2	Финансовый	Повышение уровня инфляции во время реализации проекта	3	3	средний	Использование более дешевых альтернативных химических реактивов	Изменение политической и международной конъюнктуры
3	Производственный	Изменение объемов или сроков работ	3	2	низкий	Модернизация ВЧФ-плазматрона	В зависимости от задач руководства

4.2.2 Планирование научно-исследовательского проекта

Для выполнения работы формируется рабочая группа, в состав которой входит научный руководитель проекта (НР) и исполнитель (И). После чего, в рамках проведения научного исследования выполняется ряд основных этапов, представленных в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение задания	И, НР
	2	Календарное планирование работ по теме	И
	3	Изучение материалов по теме	И
Выбор направления исследований	4	Термодинамическое моделирование процесса плазмохимической переработки ВОНР	И
	5	Выбор метода выполнения работы	И, НР
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Исследование режимов работы ВЧФ-плазмотрона	И
	7	Анализ результатов работы	И
Обобщение и оценка результатов	8	Составление отчета по работе	И

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта. Линейный график представлен в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление и утверждение задания магистерской диссертации	2	01.02.2022	02.02.2022	Беляков Д.М. Каренгин А.Г.
2	Календарное планирование работ по теме	4	03.02.2022	07.02.2022	Беляков Д.М.
3	Изучение материалов по теме	14	08.02.2022	22.02.2022	Беляков Д.М.
4	Анализ исходных параметров	5	24.02.2022	01.03.2022	Беляков Д.М.
5	Выбор метода выполнения работы	8	02.03.2022	10.03.2022	Беляков Д.М. Каренгин А.Г.
6	Применение метода к исходным параметрам	28	11.03.2022	09.04.2022	Беляков Д.М.
7	Анализ результатов работы	30	10.04.2022	10.05.2022	Беляков Д.М.
8	Составление отчета по работе	10	11.05.2022	21.05.2022	Беляков Д.М.
ИТОГО:		97			

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

График строится в виде таблицы 4.11 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 4.11 – Календарный план-график проведения работ

Код работы	Вид работ	Исполнители	T_{ki}	Продолжительность выполнения работ											
				февраль			март			апрель			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение задания магистерской диссертации	Научный руководитель, Исполнитель	2	■											
2	Календарное планирование работ по теме	Исполнитель	4	■											
3	Изучение материалов по теме	Исполнитель	17		■										
4	Термодинамическое моделирование процесса плазмохимической переработки растворов ВОНР	Исполнитель	7			■									
5	Выбор метода выполнения работы	Научный руководитель, исполнитель	9				■								
6	Исследование режимов работы ВЧФ-плазмотрона	Исполнитель	35					■	■	■					
7	Анализ результатов работы	Исполнитель	16								■	■	■		
8	Составление отчета по работе	Исполнитель	6											■	

■ – исполнитель, ■ – научный руководитель.

Таким образом, построен план управления научным проектом, определены виды работ, установлены даты начала и окончания работ и состав участников.

4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

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

1. Материалы;
2. Затраты на оплату труда работников;
3. Отчисления во внебюджетные фонды;
4. Спецоборудование для научных и экспериментальных работ;
5. Прочие прямые расходы;
6. Накладные расходы.

Данные расходы относятся к прямым затратам, величину которых, как правило, следует определять прямым счетом, это затраты, связанные непосредственно с выполнением конкретного научно-технического исследования, остальные затраты рассчитываются косвенным способом, это затраты на содержание общетехнических служб.

4.3.1 Расчет материальных затрат

Все работы для ВКР проводились на плазматроне и на компьютере. В качестве материальных затрат будут представлены затраты на этанол, нитрат иттрия $Y(NO_3)_3$ и нитрат магния $Mg(NO_3)_2$. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 4.12.

Таблица 4.12 – Материальные затраты

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Ацетон	60	2,5 л.	150
Нитрат иттрия $Y(NO_3)_3$	4900	2,5 кг.	12250
Нитрат магния $Mg(NO_3)_2$	1040	2,5 кг.	2600
Итого:	15000 руб.		

Таким образом общая сумма материальных затрат для данной разработки составила 15000 рублей. Самый дорогостоящий материал – нитрат иттрия, необходимое количество которого 2,5 кг, при цене за единицу 4900 рублей. Общая сумма всех материалов, за исключением нитрата иттрия составляет 2750 рублей.

4.3.2 Расчет амортизации оборудования для экспериментальных работ

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

Все работы для ВКР проводились на плазменном модуле на базе высокочастотного генератора ВЧГ 8-60/13-01 и на персональном компьютере.

Таблица 4.13 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ 8-60/13-01	1	15	10000000	10000000
2	Персональный компьютер	1	3	45000	45000
Итого:	1045000 руб.				

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации рассчитывается по формуле 4.3:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.3)$$

где n – срок полезного использования, лет.

Амортизация рассчитывается по формуле 4.4:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m, \quad (4.4)$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.;

m – время использования, мес.

Рассчитаем амортизацию плазменного модуля на базе высокочастотного генератора ВЧГ 8-60/13-01, учитывая, что срок полезного использования 15 лет:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{15} = 0,06$$

Рассчитаем амортизацию для персонального компьютера, с учётом, что срок полезного использования 3 года:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{3} = 0,33$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

Модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ 8-60/13-01:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m = \frac{0,06 \cdot 10000000}{12} \cdot 4 = 200000 \text{ руб.}$$

Персональный компьютер:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m = \frac{0,33 \cdot 45000}{12} \cdot 4 = 4950 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A = 200000 + 4950 = 204950 \text{ руб.}$$

В данном разделе проведен расчёт амортизации оборудования для экспериментальных работ. Амортизация для плазменного модуля на базе высокочастотного генератора ВЧГ 8-60/13-01, учитывая, что срок полезного использования 15 лет составила 0,06, а общая сумма амортизационных

отчислений 200000 рублей. Амортизация для персонального компьютера, с учётом, что срок полезного использования 3 года составила 0,33, а общая сумма амортизационных отчислений 4950 рублей. Суммарные затраты амортизационных отчислений – 204950 рублей.

4.3.3 Затраты на оплату труда исполнителей научно-технического исследования

Статья включает основную заработную плату работников (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$C_{ЗП} = З_{осн} + З_{доп}, \quad (4.5)$$

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

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) Оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.

2) Стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д. Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы [11]:

$$З_{доп} = K_{доп} \cdot З_{осн}, \quad (4.6)$$

где $З_{доп}$ – дополнительная заработная плата в рублях;

$K_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплаты;

$З_{осн}$ – основная заработная плата в рублях.

Основная заработная плата руководителя рассчитывается [11]:

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

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

$T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником в рабочих днях;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника в рублях.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле [11]:

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{T_{\phi}}, \quad (4.8)$$

где Z_M – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

T_{ϕ} – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн. (таблица 4.14).

Таблица 4.14 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней (выходные, праздники): -выходные/праздничные.	66	66
Отпуск/невыходы по болезни	56	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	251

Исполнитель во время написания диплома ежемесячно получает вознаграждение в размере МРОТ 13890 руб. Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда предполагает следующий состав заработной платы:

- оклад – определяется предприятием;
- стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.;
- доплата за работу во вредных условиях труда;
- оперативная премия.

Для расчёта месячного должностного оклада работника применяется формула [11]:

$$Z_M = Z_{ок} \cdot k_z, \quad (4.9)$$

где $Z_{ок}$ – заработная плата по окладу, руб.;

k_z – районный коэффициент, равный 1,3.

Руководителем данной научно-исследовательской работы является доцент ИЯТШ Томского политехнического университета с окладом 35000 рублей. Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{ок}$, руб.	Z_M , руб.	$Z_{дн}$, руб.	$T_{раб}$, дн	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	35000	45500	2240	8	17920
Исполнитель	13890	18057	863	63	54369
Итого $Z_{осн}$	72289 руб.				

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15 % от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Примем коэффициент дополнительной заработной платы для научного руководителя равным 15 %. Результаты расчёта основной и дополнительной заработной платы исполнителей научного исследования представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Заработная плата исполнителей исследовательской работы

Заработная плата	Руководитель	Исполнитель
Основная зарплата	17920	54369
Дополнительная зарплата, руб.	2688	8155
Зарплата исполнителя, руб.	20608	62524
Итого по статье $C_{зп}$, руб.	83132 руб.	

Таким образом в разделе рассчитаны затраты на оплату труда исполнителей научно-технического исследования. Заработная плата

руководителя – 20608 руб, а исполнителя – 62524 рублей. Суммарная заработная плата исполнителей составила 83132 рублей.

4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы [11]:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (4.10)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет 30,2%.

Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды составляет:

$$k_{внеб} = 0,302$$

Таким образом отчисления во внебюджетные фонды от затраты на оплату труда руководителя вычисляются следующим образом:

$$З_{внеб} = 0,302 \cdot 20608 = 6223 \text{ руб.}$$

Отчисления во внебюджетные фонды от затраты на оплату труда исполнителя вычисляются следующим образом:

$$З_{внеб} = 0,302 \cdot 62524 = 18882 \text{ руб.}$$

В результате расчётов были определены отчисления во внебюджетные фонды от затрат на оплату труда руководителя и исполнителя, при том что коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды составил 0,302. Для руководителя, отчисления составили 6223 руб., а для исполнителя 18882 рубля.

4.3.5 Накладные расходы

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. По этой статье учитываются оплата труда административно-управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники

и хоз. инвентаря, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров [11].

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (\text{сумма статей 1-6}), \quad (4.11)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов, равный 0,16.

Накладные расходы составят:

$$Z_{\text{накл}} = (25105 + 15000 + 204950 + 83132) \cdot 0,16 = 52510 \text{ руб.}$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости научно-исследовательского проекта, приведенная в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Группировка затрат по статьям

Статьи							
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
204950 руб.	15000 руб.	72289 руб.	10843 руб.	25105 руб.	328187 руб.	52510 руб.	380697 руб.

В итоге бюджетная стоимость научного исследования составила 380697 рублей. В эту стоимость входят: амортизация, стоимость сырья, материалов, основная заработная плата, дополнительная заработная плата, отчисления на социальные нужды и накладные расходы, которые составили 52510 рублей при коэффициенте накладных расходов 0,16.

4.4 Определение ресурсной эффективности проекта

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле 4.12:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.12)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^b – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности данного исследования представлен в форме таблицы 4.18.

Таблица 4.18 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,15	4	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	4
3. Помехоустойчивость	0,15	4	4
4. Энергосбережение	0,1	5	4
5. Надежность	0,25	4	4
6. Материалоемкость	0,2	4	3
Итого	1	4,25	3,65

$$I_p = 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,25 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 = 4,25;$$

$$I_a = 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 = 3,65.$$

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

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

где Φ_i – стоимость i -го варианта исполнения;

$\Phi_{\max}$ – максимальная стоимость исполнения НТИ (в т.ч. аналоги).

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{\text{финр}}^p$) и аналога ($I_{\text{финр}}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формулам:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_p}{I_{\phi}^p}, \quad (4.14)$$

$$I_{финр}^a = \frac{I_a}{I_\phi^a} \cdot \quad (4.15)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле 4.16:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_p} \quad (4.16)$$

Таблица 4.19 – Сравнительная эффективность разработки

Показатели	Аналог	Разработка
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки и аналогов	3,65	4,25
Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки и аналога	4	4,77
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,09	1,12

На основе расчета интегрального показателя с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности научного исследования можно сделать вывод о том, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом.

4.5 Оценка абсолютной эффективности НИ

Для оценки общей экономической эффективности используются основные показатели:

- чистая текущая стоимость (NPV);
- индекс доходности (PI);
- внутренняя ставка доходности (IRR);
- срок окупаемости (DPP).

Чистая текущая стоимость (NPV) – это показатель экономической эффективности инвестиционного проекта, который рассчитывается путём

дисконтирования (приведения к текущей стоимости, т.е. на момент инвестирования) ожидаемых денежных потоков (как доходов, так и расходов).

Расчёт NPV осуществляется по следующей формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{on}t}{(1+i)^t} - I_0, \quad (4.17)$$

где: ЧДП_{онt} – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

I_0 – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

t – номер шага расчета ($t = 0, 1, 2 \dots n$)

n – горизонт расчета;

i – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Коэффициент дисконтирования рассчитан по формуле:

$$КД = \frac{1}{(1+i)^t},$$

где: i – ставка дисконтирования;

t – шаг расчета.

Расчёт NPV позволяет судить о целесообразности инвестирования денежных средств. Если $NPV > 0$, то проект оказывается эффективным.

Расчет чистой текущей стоимости представлен в таблице 4.20.

Индекс доходности (PI) – показатель эффективности инвестиции, представляющий собой отношение дисконтированных доходов к размеру инвестиционного капитала. Данный показатель позволяет определить инвестиционную эффективность вложений в данный проект. Индекс доходности рассчитывается по формуле:

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_t}{(1+i)^t} / I_0 > 1,$$

где: ЧДП – чистый денежный поток, руб.;

I_0 – начальный инвестиционный капитал, руб.

Таблица 4.20 –Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Выручка от реализации, руб.	0	290700	445740	620160	620160
2	Итого приток, руб.	0	290700	445740	620160	620160
3	Инвестиционные издержки, руб.	380697	0	0	0	0
4	Операционные затраты, руб.	0	70000	90000	110000	110000
5	Налогооблагаемая прибыль(1-4)	0	220700	355740	510160	510160
6	Налоги, руб.	0	44140	71148	102032	102032
8	Чистая прибыль, руб.(5-6)	0	176560	284592	408128	408128
9	Чистый денежный поток (ЧДП), руб.(чистая прибыль+амортизация)	-380697	176560	284592	408128	408128
10	Коэффициент дисконтирования при $i=20\%$ (КД)	1	0,83333	0,69444	0,5787	0,48225
11	Чистый дисконтированный денежный поток (ЧДД), руб.(9*10)	-380697	147133	197633	236185	196821
12	Σ ЧДД	397075,8395				
12	Итого NPV, руб.	16378,83951				

Если $PI > 1$, то проект является эффективным.

Внутренняя ставка доходности (IRR). Значение ставки, при которой обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или IRR. Формальное определение «внутренней ставки доходности» заключается в том, что это та ставка дисконтирования, при которой суммы дисконтированных притоков денежных средств равны сумме дисконтированных оттоков или $=0$. По разности между IRR и ставкой дисконтирования i можно судить о запасе

экономической прочности инвестиционного проекта. Чем ближе IRR к ставке дисконтирования i , тем больше риск от инвестирования в данный проект.

Дисконтированный срок окупаемости.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (таблица 4.21).

Таблица 4.21 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Дисконтированный чистый денежный поток, руб.	-380697	147133	197633	236185	196821
2	То же нарастающим итогом, руб.	-380697	-233564	-35930	200255	397076
3	Дисконтированный срок окупаемости	$DP_{дск} = 2,85$ года				

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что проект эффективен с точки зрения целесообразности инвестирования денежных средств, что подтверждается расчетом NPV, который оказался больше нуля. Дисконтированный срок окупаемости проекта составляет 2,85 года.

Выводы по разделу

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации устройства, как наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с аналогом;

2. Определены сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы для реализации проекта. Выполнен SWOT-анализ проекта;

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

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

5. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 380697руб.;

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

7. Оценка абсолютной эффективности НИ показала, что проект является эффективным с точки зрения целесообразности инвестирования денежных средств, со сроком окупаемости 2,85 года.

5 Социальная ответственность

Целью выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР) является теоретическое и экспериментальное исследование процесса утилизации отходов переработки отработавшего ядерного топлива (ОП ОЯТ) в воздушной плазме в виде водно-солеорганических композиций. В работе проводится изучение процесса синтеза в воздушной плазме оксидных композиций для ядерного топлива уран-плутониевого цикла.

Выполнение ВКР проводилось в отделении ядерно-топливного цикла (ОЯТЦ) Инженерной школы ядерных технологий (ИЯТШ) Томского политехнического университета. Для выполнения теоретической части ВКР в качестве рабочего места использовался компьютерный стол с ЭВМ, соответствующее периферийное оборудование (монитор, клавиатура, мышь) и программное обеспечение (Microsoft Word, Microsoft Excel, TERRA). Для выполнения экспериментальной части ВКР в качестве рабочего места использовалась установка «Плазменный модуль на базе ВЧФ-плазмотрона». (лаборатория № 001А–10 учебный корпус ТПУ).

В разделе рассмотрены опасные и вредные факторы, оказывающие влияние на процесс исследования, рассмотрены воздействия исследуемого объекта на окружающую среду, правовые и организационные вопросы, а также мероприятия в чрезвычайных ситуациях.

5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Исследования и расчёты проводились с применением ЭВМ, также использовался ВЧФ-плазменный стенд с использованием высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01. Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

В таблице 5.1 представлены основные виды работ, которые могут привести к воздействию опасных и вредных факторов.

Таблица 5.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы [18]

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа с химическими реактивами.	Химические вредные вещества.	–	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества [12].
Работа на плазменной установке.	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.).	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность [13], СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона [14].
		Пожарная опасность	ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность [15].
Расчёт данных на ЭВМ.	Шум, вибрация, микроклимат; воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.).	Электрический ток	СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [16], ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность [13].

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

- физические: температура и влажность воздуха, шум, статическое электричество, электромагнитное поле низкой частоты, освещенность, наличие излучения;
- химические: вредные вещества (этанол, оксиды: самария, иттрия, магния, углерода);

– психофизиологические: физическая перегрузка (статическая, динамическая), нервно-психические перегрузки (умственные перегрузки, перегрузки анализаторов, монотонность труда, эмоциональные перегрузки) [18].

5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ВЧФ-плазмотроне и ПЭВМ

В соответствии с основными требованиями к помещениям для эксплуатации ПЭВМ и ВЧФ-плазматрона [18] они должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь на одно рабочее место пользователей ПЭВМ должна составлять не менее 6 м². Основные параметры, характеризующие условия труда – это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

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 [18].

5.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1 [17].

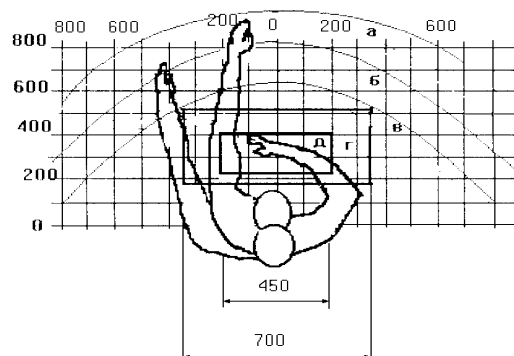


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация – в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно [17].

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 [17].

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если

угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране [17].

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях [17].

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека [17].

5.2.3 Микроклимат

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [18] и приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Оптимальные параметры микроклимата в помещении

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

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и

чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию [18]. Параметры микроклимата, в используемой лаборатории № 001А–10 учебного корпуса ТПУ, регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура – 20-23 °С.

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. Оптимальная кратность воздухообмена в производственных помещениях находится в достаточно широких пределах: от 3 до 40 раз в час [18]. В используемой лаборатории установлен высоконапорный вытяжной вентилятор марки ВР-12-26-4 производительностью $Q = 2400 - 4400 \text{ м}^3/\text{час}$. Объем лаборатории составляет:

$$V = a \cdot b \cdot h = 6 \text{ м} \cdot 12 \text{ м} \cdot 7 \text{ м} = 504 \text{ м}^3. \quad (5.1)$$

Данный вентилятор обеспечивает следующую кратность воздухообмена (BO) в лаборатории:

$$BO = \frac{Q}{V} = \frac{2400 \div 4400}{504} = 4,8 \div 8,7. \quad (5.2)$$

Таким образом установлено, что микроклимат в используемой лаборатории №001А–10 учебного корпуса ТПУ соответствует оптимальным условиям работы.

5.2.4 Шум и вибрация

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 [16]. В нашем случае

источником шума является откачивающий компрессор. Уровень шума компрессора менее 55 дБ, что соответствует санитарным нормам [16]. Шум на рабочем месте может быть вызван работой ЭВМ. Уровень шума ЭВМ лежит в пределах 30-40 дБ, что также соответствует нормам.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства индивидуальной защиты (СИЗ) и средства коллективной защиты (СКЗ) от шума.

Средства коллективной защиты:

- устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
- изоляция источников шума от окружающей среды (применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов);
- применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения [16].

Средства индивидуальной защиты: применение спецодежды и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны [20].

5.2.5 Электромагнитное излучение

Электромагнитное излучение – распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля. ВЧФ-плазматрон питается от генератора высокочастотного тока. Генератор полностью экранирован. Предельно допустимая величина электромагнитного воздействия от установки на человека составляет менее 0,2 мкТл. Это значение входит в допустимый порог строгих санитарных норм электромагнитного излучения [14].

Экран и системные блоки ЭВМ 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 соответствовать допустимым уровням параметров электромагнитного поля (таблица 5.3) [14].

Таблица 5.3 – Допустимые уровни параметров электромагнитного поля

Наименование параметров		Величина допустимого уровня
Напряженность электромагнитного поля	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты [14].

Таким образом установлено, что в лаборатории № 001А–10 учебного корпуса ТПУ уровень электромагнитного излучения соответствует санитарным нормам.

5.2.6 Освещенность

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

Согласно [18] в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 300 Лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда [18]. Для защиты от слепящей яркости видимого излучения (факел плазмы в камере с катализатором) применяют защитные очки [20].

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина рабочего помещения $A = 6$ м, ширина $B = 6$ м, высота $H = 3,5$ м. Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 1,0$ м. Согласно [18] необходимо создать освещенность не ниже 150 лк, в соответствии с разрядом зрительной работы.

Площадь рабочего помещения:

$$S = A \cdot B = 6 \cdot 6 = 36 \text{ м}^2, \quad (5.3)$$

где A – длина, м; B – ширина, м.

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор $\rho_c = 50 \%$, свежепобеленного потолка $\rho_{\Pi} = 70 \%$. Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_z = 1,5$. Коэффициент неравномерности для светодиодных лент $Z = 1,1$.

Выбираем светодиоды Varton 9w, световой поток которых равен $\Phi_{\text{лд}} = 2900$ Лм.

Выбираем светильники со светодиодами типа Diora LPO. Этот светильник имеет две светодиодные ленты мощностью 9 Вт каждая, длина светильника равна 1260 мм, ширина – 124 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для светодиодных светильников с защитным рассеивателем лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем $\lambda = 1,1$, расстояние светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,5$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p, \quad (5.4)$$

где h_n – высота светильника над полом, высота подвеса, h_p – высота рабочей поверхности над полом.

Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для двухлентовых светильников Dioga: $h_n = 3,5$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0,5 = 2 \text{ м.} \quad (5.5)$$

Из формулы

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{(E \cdot S \cdot K_z \cdot Z)}{N \cdot \eta} \quad (5.6)$$

находим число светодиодных лент N

$$N = \frac{(E \cdot S \cdot K_z \cdot Z)}{\Phi_{\text{л}} \cdot \eta} \quad (5.7)$$

η определяем через индекс помещения по формуле:

$$i = \frac{(a \cdot b)}{h \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 6}{2(6 + 6)} = 1,5. \quad (5.8)$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа Dioga со светодиодными лентами при $\rho_{\text{п}} = 70 \%$, $\rho_{\text{с}} = 50 \%$ и индексе помещения $i = 1,5$ равен $\eta = 0,52$.

Тогда

$$N = \frac{(E \cdot S \cdot K_z \cdot Z)}{\Phi_{\text{л}} \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 36 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{2900 \cdot 0,52} = 11,81 \text{ лент.}$$

Принимаем количество светодиодных лент 12. При этом получается 6 светильников, т.е. 2 ряда по 3 светильника.

Потребный световой поток светодиодных ламп:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{(E \cdot S \cdot K_z \cdot Z)}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 36 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,52} = 2856 \text{ Лм.}$$

Из условий равномерности освещения определяем расстояния L_1 и $\frac{L_1}{3}$,

L_2 и $\frac{L_2}{3}$ по следующим уравнениям:

$$6000 = L_1 + \frac{2}{3} \cdot L_1 + 2 \cdot 124; L_1 = 3451 \text{ мм}, \frac{L_1}{3} = 1150 \text{ мм}; \quad (5.9)$$

$$6000 = 2 \cdot L_2 + \frac{2}{3} \cdot L_2 + 3 \cdot 1260; L_2 = 832 \text{ мм}, \frac{L_2}{3} = 277 \text{ мм}; \quad (5.10)$$

На рисунке 5.2 изображен план помещения и размещения светильников со светодиодными лентами лаборатории № 001А–10 корпуса ТПУ.

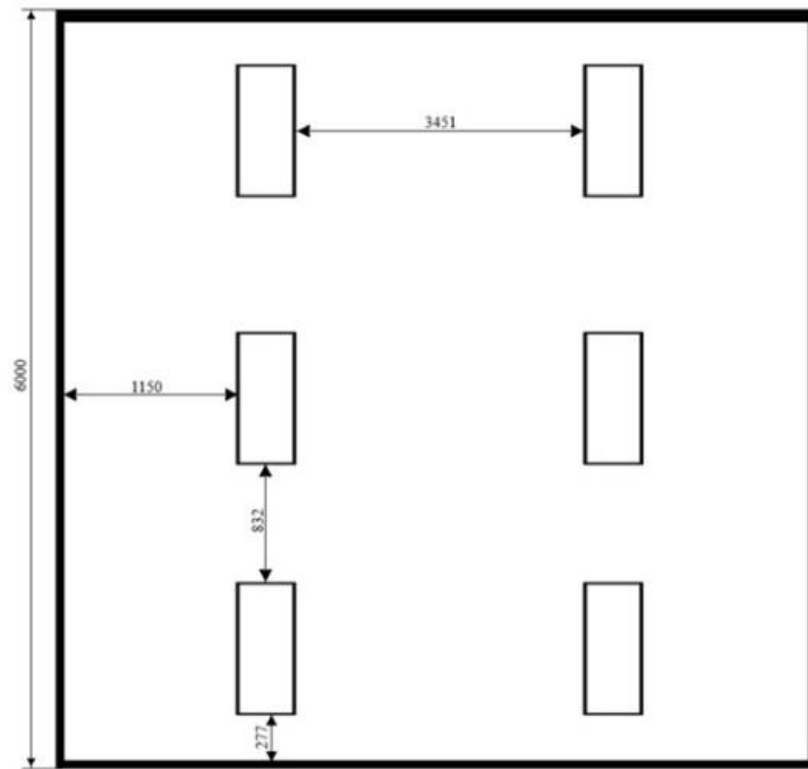


Рисунок 5.2 – План помещения и размещения светильников со светодиодными лентами

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10 \% \leq \frac{(\Phi_{л\partial} - \Phi_{л})}{\Phi_{л\partial}} \cdot 100 \% \leq 20 \%; \quad (5.11)$$

$$\frac{(\Phi_{л\partial} - \Phi_{л})}{\Phi_{л\partial}} \cdot 100 \% = \frac{(2900 - 2856)}{2900} \cdot 100 \% = 1,5 \%.$$

Следовательно, необходимый световой поток не выходит за пределы требуемого диапазона. Мощность осветительной установки получилась:

$$P = 12 \cdot 9 = 108 \text{ Вт}.$$

Расчётное количество светильников соответствует установленным в помещении 001А–10 корпуса ТПУ.

5.2.7 Психофизиологические факторы

Трудовая деятельность работников непроизводственной сферы относится к категории работ, связанных с использованием больших объемов информации, с применением компьютеризированных рабочих мест, с частым принятием ответственных решений в условиях дефицита времени, непосредственным контактом с людьми разных типов темперамента и т.д. Это обуславливает высокий уровень нервно-психической перегрузки, снижает функциональную активность центральной нервной системы, приводит к расстройствам в ее деятельности, развития утомления, переутомления, стрессу [18].

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха [18].

5.3 Химическая безопасность

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

В таблице 5.4 приведены предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ и их класс опасности [19].

Классы опасности:

- 1 – вещества чрезвычайной опасности;
- 2 – вещества высоко опасные;

3 – вещества умеренно опасные;

4 – вещества мало опасные [19].

Таблица 5.4 – Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ и их класс опасности

№	Вещество	ПДК, мг/м ³	Класс опасности
1	Оксид самария	4,0	3
2	Оксид иттрия	3,0	3
3	Оксид магния	3,0	3
4	Ацетон	0,35	2

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 подвижных лопастей. Скорость потока воздуха через газоход (вентиляцию) равна 18,76 м/с.

При работе использовались следующие средства индивидуальной защиты: резиновые перчатки [20], лабораторный халат [20], респиратор «лепесток» [20].

5.4 Электробезопасность

Рабочее помещение по опасности поражения электрическим током можно отнести ко 2 классу, т.е. это помещение без повышенной опасности из-за возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой [13].

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

– при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;

- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки [13].

Степень опасного воздействия электрического тока на организм человека зависит от:

- рода и величины напряжения и тока;
- частоты электрического тока;
- пути прохождения тока через тело человека;
- продолжительности воздействия на организм человека;
- условий внешней среды [18].

Электрический ток оказывает на человека термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие [13].

Термическое воздействие тока проявляется в ожогах, нагреве кровеносных сосудов и других органов, в результате чего в них возникают функциональные расстройства [13].

Электролитическое действие тока характеризуется разложением крови и других органических жидкостей, что вызывает нарушения их физико-химического состава [13].

Механическое действие тока проявляется в повреждениях (разрыве, расслоении и др.) различных тканей организма в результате электродинамического эффекта [13].

Биологическое действие тока на живую ткань выражается в опасном возбуждении клеток и тканей организма, сопровождающемся непроизвольными судорожными сокращениями мышц. В результате такого возбуждения может возникнуть нарушение и даже полное прекращение деятельности органов дыхания и кровообращения [18].

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим

током являются [13]:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путём использования изоляции в корпусах оборудования;
- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;
- использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения;
- использование устройств бесперебойного питания.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж проводится всему неэлектротехническому персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь неэлектротехнический персонал должен быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год [18].

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

При выполнении данной ВКР применен плазменный стенд с использованием высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01. Данный генератор питается от сети с промышленным напряжением 380 В, с анодным напряжением 10,4÷10,5 кВ и номинальной потребляемой мощностью 60 кВт.

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

5.5 Пожарная и взрывная безопасность

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 [15]. Так как помещение

лаборатории по степени пожаро-взрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины возгорания [15]:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов.

Наиболее опасным с точки зрения пожарной безопасности веществом, применяемым в работе, является этанол.

Все работы с ацетоном должны проводиться с использованием приточно-вытяжной вентиляции вдали от огня и источников искрообразования.

Для тушения горящего ацетона применяют порошковые огнетушители, средства объемного тушения (минимальная огнетушащая концентрация: углекислого газа – 29 % (по объему), азота – 43 % (по объему), дибромтетрафторэтана – 2,1 % (по объему), песок, асбестовое одеяло и пену [15].

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные [15].

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 [15].

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования [18].

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 [18]:

- 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 пожара сообщить руководителю, органам противопожарной безопасности предприятия и приступить к тушению пожара огнетушителем.

При возникновении аварийной ситуации необходимо [15]:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС по телефону – 112;
- принять меры по ликвидации последствий аварии в соответствии с инструкцией.

5.6 Экологическая безопасность

В работе проводится изучение процесса синтеза в воздушной плазме оксидных композиций для ядерного топлива уран-плутониевого цикла. При этом используется плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ 8-60/13-01 и ПЭВМ.

Влияние эксплуатации оборудования на окружающую среду минимально. Наибольший вред от них в работе – потребление электроэнергии. ПЭВМ и ВЧФ-плазматрон не производят выбросов вредных веществ, не создают излучения, способного нарушить экологическую безопасность природы. Однако их производство и утилизация составляют серьезную проблему. Так, при производстве ПЭВМ и других устройств используются тяжелые, щелочноземельные металлы, ртуть, пластик и стекло, что без должной утилизации по окончании службы попадает в природу и остается в не переработанном виде от века до полутора тысяч лет [18].

Мероприятия, позволяющие сохранять экологическую безопасность находясь на рабочем месте [18]:

- Правильная утилизация ПЭВМ и других систем, а также их комплектующих;
- Использование энергосберегающих ламп;
- Использование аккумуляторов вместо солевых батареек.

Снижение уровня загрязнения окружающей среды возможно за счёт более эффективного и экономного использования электроэнергии самими потребителями. Это использование более экономичного оборудования, а также эффективного режима загрузки этого оборудования. Сюда также включается и соблюдение производственной дисциплины в рамках правильного использования электроэнергии [18].

Из этого можно сделать вывод, что необходимо стремиться к снижению энергопотребления, то есть разрабатывать и внедрять системы с малым энергопотреблением, ответственно относиться к утилизации различных

устройств, т.к. они могут разлагаться в окружающей среде до сотен лет.

5.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка, сложившаяся на определенной территории в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которая может повлечь за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации, методы их предотвращения и ликвидации последствий (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Чрезвычайные ситуации, методы их предотвращения и ликвидации последствий

Чрезвычайная ситуация	Методы предотвращения ЧС	Ликвидация последствий ЧС
Пожар	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Соблюдение технологических режимов производства; Создание условий для эвакуации персонала	Вызов пожарной службы и спасателей (тел. 112); Вызов скорой медицинской помощи
Удар током	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Содержание энергетических сетей в исправном состоянии	Вызов скорой медицинской помощи (тел. 030, 112); Оказание первой помощи
Травмирование в результате падения с высоты	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Создание систем предупреждения падений; Соблюдать требования безопасности при выполнении работ на высоте	Вызов скорой медицинской помощи (тел. 030, 112); Оказание первой помощи

Выводы по разделу

В данной главе проведен анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований:

- микроклимат [18];

- шум и вибрация [16];
- электромагнитное излучение [14];
- освещенность [18];
- психофизиологические факторы [18];
- химическая безопасность [19];
- электробезопасность [13];
- пожаро-взрывобезопасность [15].

Помещение № 001А–10 корпуса ТПУ отнесено:

- по электробезопасности – к 2 классу [13];
- по пожаро-взрывобезопасности – к категории В [15].

Также рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации, методы их предотвращения и ликвидации последствий.

Выводы

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

- Состав раствора ВОНР: делящийся металл (уран), металл матрицы (магний) и ацетон; массовая доля матрицы (MgO) в ТОК: (5 – 20) %.

2. По результатам термодинамических расчетов определены оптимальные режимы, обеспечивающие в воздушной плазме синтез оксидных композиций « $\text{UO}_2\text{--MgO}$ » требуемого состава:

- Массовая доля воздуха: (66 – 67) %; удельные энергозатраты: (25,4 – 45,8) МДж/кг; рабочая температура: (1500 ± 200) К.

3. Определен оптимальный режим работы ВЧФ-плазмотрона для реализации процесса плазмохимического синтеза модельных оксидных композиций из диспергированных ВОНР: мощность плазменной струи – 15 кВт; расход раствора ВОНР – 300 л/час; расход воздуха – 0,95 кг/с; расход ОТВ на «закалку» – 2,8 кг/с.

4. Получены и определены свойства порошков модельных оксидных композиций требуемого состава: размеры частиц в водных суспензиях (13,0 – 4,7) мкм; удельная поверхность (7,9 – 16,2) $\text{м}^2/\text{г}$; размеры кристаллитов (52 – 94) нм.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза из растворов ВОНР оксидных композиций.

Список используемой литературы

1. Каренгин А.Г. Физика и техника низкотемпературной плазмы: Учебное пособие. - Томск: Изд-во ТПУ, 2008.
2. Цыканов В.А. Тепловыделяющие элементы для исследовательских реакторов. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2000.
3. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы - М.: Академия, 2005.
4. Туманов Ю. Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. – М.: Физматлит, 2003.
5. Самойлов А.Г., Каштанов А.И., Волков В.С. Дисперсионные тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1965.
6. Пархоменко В.Д., Сорока П.И., Краснокутский Ю.И., Плазмохимические методы получения порошкообразных веществ и их свойства. // Всесоюзный журнал химического общества им. Д.И.Менделеева. 1991
7. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015.
8. Бойко В. И. Топливные материалы в ядерной энергетике / В. И. Бойко, Г. Н. Колпаков, О. В. Селиванова. Томск : Изд-во ТПУ, 2008.
9. Писаренко В.В. Справочник лаборанта-химика. Справ. пособие для проф.-техн. учебн. заведений. — М.: Высшая школа, 1970.
10. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197.
11. Организация, нормирование и оплата труда: Учебное пособие / А. С. Головачев, Н. С. Березина, Н. Ч. Бокун и др.; Под общ. Ред. А. С. Головачева. – М.: Новое знание, 2004.
12. ГОСТ 12.1.007-76 «ССБТ. Вредные вещества».
13. ГОСТ 12.1.038-82 «ССБТ. Электробезопасность».

14. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона».
15. ГОСТ 12.1.004-91 «ССБТ. Пожарная безопасность».
16. СанПин 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».
17. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ».
18. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
19. ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
20. ГОСТ 12.4.011-89 «ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация».

Приложение А

Study of the Plasma-Chemical Synthesis of Nanostructured Oxide Compositions for Uranium Dispersion Nuclear Fuel

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Беляков Дмитрий Михайлович		

Консультант лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Зеремская Юлия Александровна	к.филол.н.		

Introduction

Nuclear power plants, where the operation principle is based on the use of cermet fuel based on uranium dioxide enriched in the U^{235} isotope, will remain one of the key components of modern nuclear energy.

One of the promising directions for the further development of nuclear power in Russia is the use of dispersive REMIX-fuel from regenerated uranium, where uranium dioxide inclusions are uniformly distributed in the matrix of refractory metal oxides with high thermal conductivity and low neutron absorption cross section.

The common disadvantages of the methods used for obtaining complex oxide compositions (separate production and mechanical mixing, sol-gel process) are: multi-stage, duration, uneven distribution of phases, the need to use a large amount of chemical reagents, additional hydrogen reduction, high energy and labour costs.

The advantages of using air plasma for the plasma-chemical synthesis of complex oxide compositions from dispersed mixed water nitrate solutions (WNS) in comparison with the sol-gel process and technology based on the separate production and mechanical mixing of metal oxides include: one-stage, high speed, the ability to influence the size and morphology of particles actively, uniform-phase distribution. However, the air-plasma processing of only WNS solutions requires significant energy costs (up to 4.0 MW·h/t) and does not allow getting one-stage production of complex nanosized oxide compositions for dispersive REMIX fuel of the required phase composition without additional hydrogen reduction.

A significant reduction in energy consumption can be achieved by air-plasma processing of dispersed water-organic nitrate solutions (WONS) that are optimal in terms of composition and include an organic component (alcohols, ketones) and WNS solutions. Air-plasma processing of WONS solutions, including fissile metal (uranium) and matrix metals (magnesium, etc.), will not only lead to a significant reduction in energy consumption, but will also provide plasma-chemical synthesis in one stage of nanosized complex oxide compositions for dispersed

nuclear fuel, which have a uniform distribution and required composition of phases without additional hydrogen reduction.

Plasma-chemical synthesis: definition, advantages and disadvantages

One of the most common chemical methods for obtaining highly dispersed powders of nitrides, carbides, borides is plasma-chemical synthesis. The main conditions for obtaining highly dispersed powders by this method are the reaction proceeding far from equilibrium and the high formation rate of nuclei of a new phase at a low rate of their growth. Under real conditions of plasma-chemical synthesis, it is advisable to obtain nanoparticles by increasing the cooling rate of the plasma flow in which condensation from the gas phase occurs; this reduces the size of the resulting particles, and suppresses the growth of particles by merging them upon collision.

Plasma-chemical synthesis uses low-temperature (4000-8000 K) nitrogen, ammonia, hydrocarbon, argon plasma of arc, glow, high- or microwave-frequency discharges; elements, their halides and other compounds are used as feedstock. The characteristics of the resulting powders depend on the raw materials used, the synthesis technology, and the type of reactor. The particles of plasma-chemical powders are single crystals and have sizes from 10 to 100 - 200 nm or more. Plasma-chemical synthesis provides high rates of formation and condensation of the compound and is characterized by a high productivity. The main disadvantages of plasma-chemical synthesis are a wide particle size distribution and, as a result, the presence of rather large (up to 1–5 μm) particles, i.e., low selectivity of the process, as well as a high content of impurities in the powder. To date, fine powders of titanium, zirconium, hafnium, vanadium, niobium, tantalum, boron, aluminum and silicon nitrides, titanium, niobium, tantalum, tungsten, boron and silicon carbides, oxides of magnesium, yttrium and aluminum have been obtained by the plasma-chemical method. The plasma-chemical method is widely used for the synthesis of nitrides of transition metals of groups IV and V.

Plasma-chemical synthesis includes several stages. At the first stage, active particles are formed in arc, high frequency, and microwave-frequency plasma reactors. Arc plasma reactors have the highest power and efficiency, but the received materials are contaminated with electrode erosion products; electrodeless high frequency and microwave plasma reactors do not have this drawback. At the next stage, because of quenching, the interaction products are isolated. The choice of place and speed of quenching makes it possible to obtain powders with a given composition, shape, and particle size.

The synthesis of oxides in the plasma of an electric arc discharge is carried out by evaporation of the metal, followed by the oxidation of vapors or the oxidation of metal particles in an oxygen-containing plasma.

Plasma-chemical synthesis of oxide compositions from water nitrate solutions

In a plasma reactor (Fig. A1) that has a cylindrical, conical or more complex shape, equipped with water or gas surface cooling, there is a flow of a pre-disintegrated (sprayed into drops) solution and a plasma flow chemically compatible with this solution (1). When mixing droplets of a mixed nitrate solution (for example, uranium and chromium) with a plasma flow, drops of the solution are heated to the boiling point and water (2) evaporates from them. Next, the condensed salt residue (3) decomposes and oxides are synthesized to form an oxide composition (4).

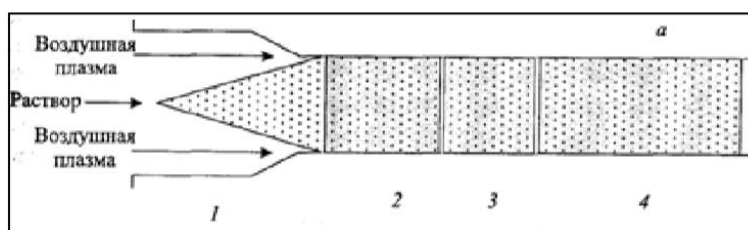


Figure A1 – Installation scheme for the plasma-chemical synthesis of oxide compositions

The technological scheme of the plasma-chemical installation has the following main hardware elements:

1. Plasmatron power supply (rectifier with automatic current control system, high frequency or microwave generator, etc.).

2. Plasmatron, where the flow of a gas chemically compatible with the solution (in the case of decomposition of nitrates - air or its components: nitrogen, oxygen, depending on the valence of the released metal) is converted into a low-temperature plasma flow.

3. Plasma reactor, where the plasma and solution flows are mixed and the solution is decomposed.

4. Separator where the separation of the dispersed and gas phases is carried out; after the separator, two material streams arise: a stream of dispersed oxide material, which is the target product, and a gas phase stream containing, as can be seen from equation (1), nitrogen oxides, water vapor, nitrogen and oxygen.

Absorber condenser. In the condenser, forced condensation of water vapor and partial absorption of nitrogen oxides are carried out, and in the absorber there is a recombination and absorption of nitric acid.

Calculation of combustibility and composition of water-organic nitrate solutions

The lower calorific value of water-organic nitrate solutions was determined by the equation:

$$Q_H^p = \frac{(100 - W - A)Q_H^c}{100} - \frac{2,5W}{100}, \quad (A1)$$

where Q_H^p - lower calorific value of the combustible component, MJ/kg; W - content of water, A - noncombustible minerals in the composition, %; 2,5 - coefficient for the accounting of the latent heat of water evaporation at 0 °C, MJ/kg.

The requirement to achieve a Q_H^p value of ≥ 8.4 MJ/kg in order for the mixture to be considered combustible is overestimated for a large number of

compositions used in industry containing combustible components with low Q_H^p values, but with high heat output. A more objective indicator of the combustibility of a water-organic nitrate solution is the adiabatic combustion temperature (T_{ad}), which was estimated by the formula:

$$T_{ad} = \frac{(100 - v_{OK})Q_H^p + v_{OK}C_{OK}t_{OK}}{100v}, \quad (A2)$$

where v_{OK} is the mass fraction of the oxidizing agent (air), %; C_{OK} is the heat capacity of the oxidizer, kJ/(kg·K); t_{OK} is the temperature of the oxidizer, K; v is the specific equilibrium heat capacity of the WONS plasma processing products, kJ/(kg·K).

Q_H^p solutions of WONS [$UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + H_2O + C_3H_5OH$] and [$UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O + H_2O + C_3H_5OH$] solutions were calculated and the compositions at $T_{ad} \approx 1550$ K to ensure their energy-efficient plasma processing in an air-plasma flow. The calculation results are presented in Tables A1 and A2.

Table A1 – Investigated compositions of plasma-chemical synthesis of uranium and magnesium OC from WONS, including an organic component at a mass fraction of magnesium oxide of 5, 10, 20 and 50%

№	Composition FOC	Composition of the WONS, %				Q_{ns} , MJ/kg
		$UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	H_2O	C_3H_5OH	
1	95% UO_2 –5%MgO	33,999	9,553	28,448	28,000	6,793
2	90% UO_2 –10%MgO	25,725	15,260	31,015	28,000	6,729
3	80% UO_2 –20%MgO	15,898	21,219	33,883	29,000	6,925
4	50% UO_2 –50%MgO	5,004	26,717	37,279	31,000	7,376

Table A2 – Investigated compositions of the plasma-chemical synthesis of uranium and yttrium OC from WONS, including an organic component at a mass fraction of yttrium oxide of 5, 10, 20 and 50%

№	Composition FOC	Composition of the WONS, %				Q_{ns} , MJ/kg
		$UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	$Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	H_2O	C_3H_5OH	

5	95%UO ₂ -5%Y ₂ O ₃	42,390	4,895	26,715	26,000	6,300
6	90%UO ₂ -10%Y ₂ O ₃	37,112	9,048	27,840	26,000	6,272
7	80%UO ₂ -20%Y ₂ O ₃	28,566	15,669	29,765	26,000	6,224
8	50%UO ₂ -50%Y ₂ O ₃	12,412	27,233	33,355	27,000	6,402

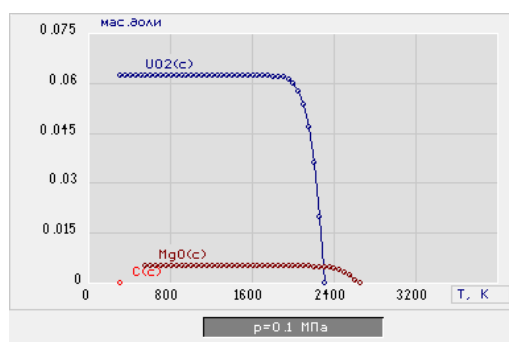
Table A3 shows the thermophysical properties of oxide matrix materials.

Table A3 – Thermophysical properties of oxide matrix materials

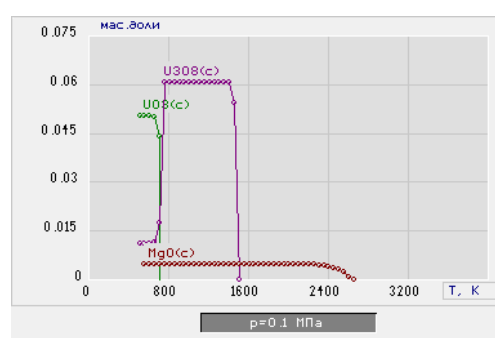
Properties	Al ₂ O ₃	MgO	Y ₂ O ₃	ZrO ₂
$T_{\text{melting}}, ^\circ\text{C}$	2054	2827	2430	2000
λ , W/(m K)	13,3 (500 $^\circ\text{C}$); 8,2 (1000 $^\circ\text{C}$); 5,8 (1500 $^\circ\text{C}$) -	20,0 (500 $^\circ\text{C}$); 13,0 (1000 $^\circ\text{C}$); 6,0 (1500 $^\circ\text{C}$); 5,0 (2000 $^\circ\text{C}$)	4,1 (500 $^\circ\text{C}$); 2,5 (1000 $^\circ\text{C}$); 2,9 (1500 $^\circ\text{C}$); 4,0 (2000 $^\circ\text{C}$)	- 2,2 (1000 $^\circ\text{C}$); 1,5 (1500 $^\circ\text{C}$); 1,8 (2000 $^\circ\text{C}$)

Thermodynamic modeling of the process of plasma chemical processing of WONS solutions

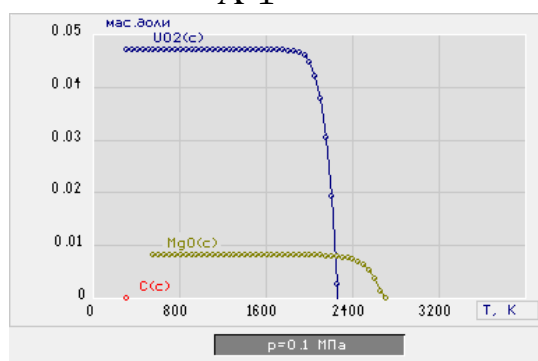
In the licensed program "TERRA" thermodynamic calculations of the equilibrium compositions of the products of plasma processing of WONS solutions were carried out. The simulation results are shown in Figures A2-3.



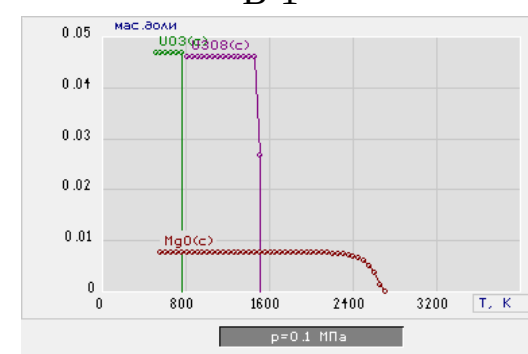
A-1



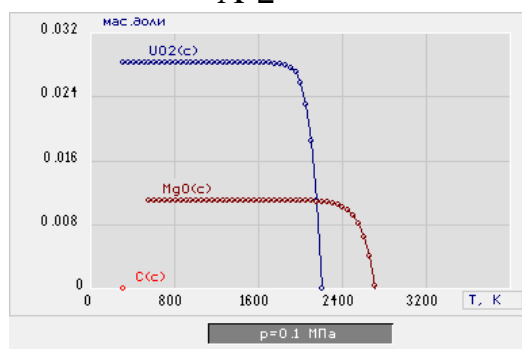
B-1



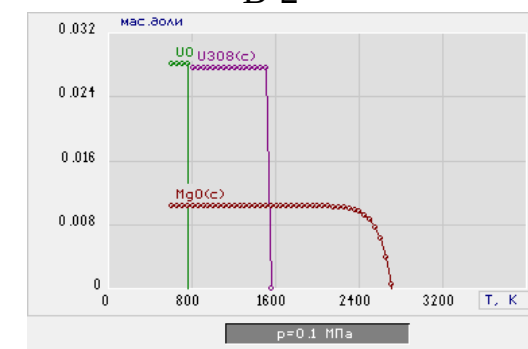
A-2



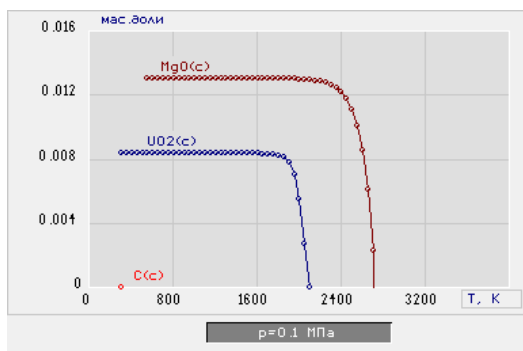
B-2



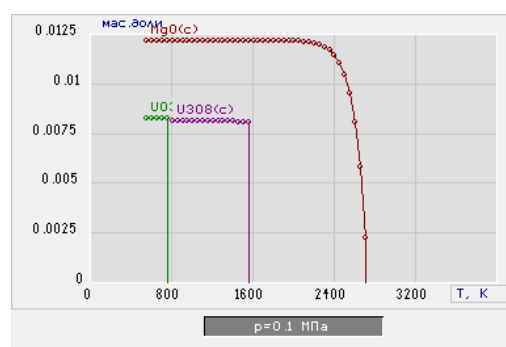
A-3



B-3



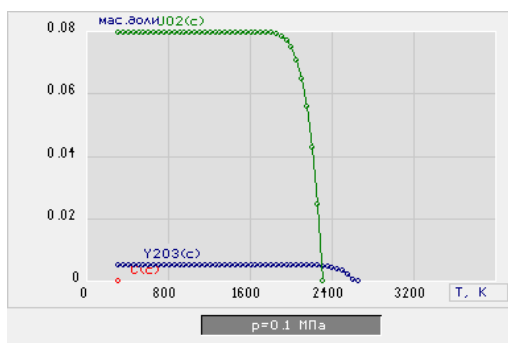
A-4



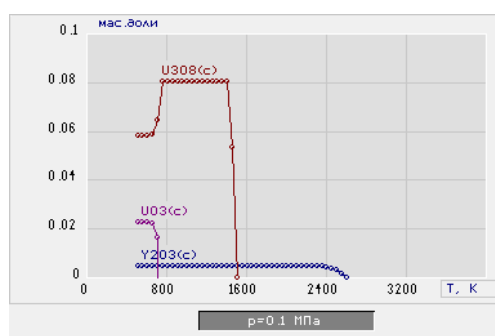
B-4

Figure A2 – The temperature influence on the equilibrium compositions of the products of plasma processing of WONS 1-4 in condensed phases at a mass fraction of air 66% (A) and 70% (B)

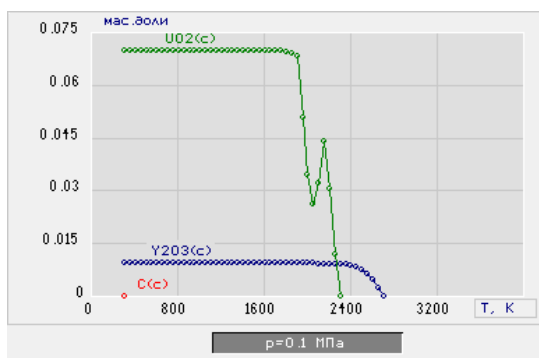
From the analysis of the equilibrium composition (Figure A2), it can be seen that with a mass fraction of air 66% (A-1÷A-4), the main products of air-plasma processing of WONS 1-4 are target uranium dioxide $\text{UO}_2(\text{c})$ and magnesium oxide $\text{MgO}(\text{c})$ in condensed phases forming the required FOC 1-4. With a decrease in the proportion of air (less than 65%), the content of carbon $\text{C}(\text{c})$ in the composition of products increases significantly. An increase in the proportion of air above 70% leads to the undesirable formation of uranium oxide $\text{U}_3\text{O}_8(\text{c})$.



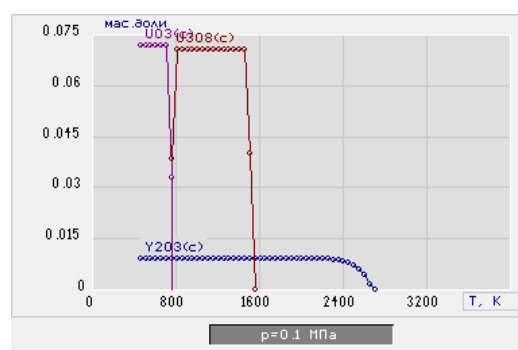
A-5



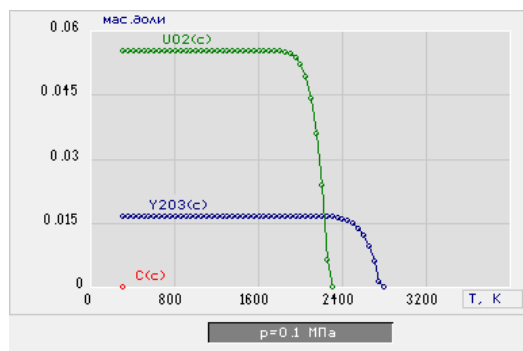
B-5



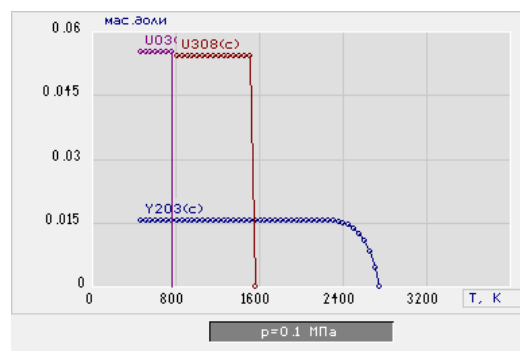
A-6



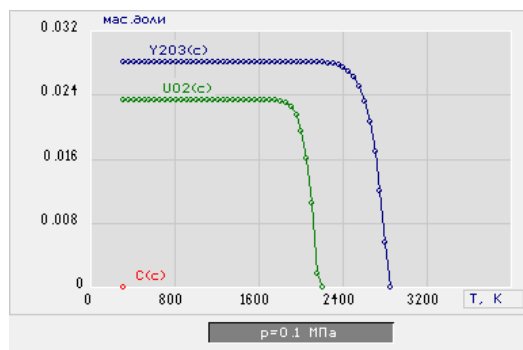
B-6



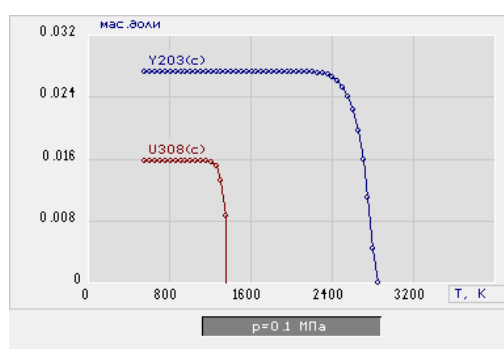
A-7



B-7



A-8



B-8

Figure A3 – The temperature influence on the equilibrium compositions of the products of plasma processing of WONS 5-8 in condensed phases at a mass fraction of air 65% (A) and 67% (B)

It follows from the obtained data that at a mass fraction of air 65%, the main products of air-plasma processing of WONS 5-8 are target uranium dioxide $\text{UO}_2(\text{c})$ and yttrium oxide $\text{Y}_2\text{O}_3(\text{c})$ in condensed phases, forming the required FOC 5-8. With a decrease in the proportion of air below 64%, the content of carbon $\text{C}(\text{c})$ in the composition of products increases significantly. An increase in the proportion of air above 67% leads to the undesirable formation of uranium oxide $\text{U}_3\text{O}_8(\text{c})$.

Calculation of the total energy consumption for the process of plasma processing of WONS:

$$E_{\text{general}} = I_{\text{T}} - I_{300}, \quad (\text{A3})$$

where I_{t} is the enthalpy of the products of air-plasma processing of 1 kg of WONS at a temperature (T), MJ/kg; I_{300} is the enthalpy of the products of plasma processing of WONS at a temperature (300 K), MJ/kg.

The calculation and evaluation of specific energy consumption for obtaining 1 kg of fuel oxide composition was carried out according to the formula:

$$E_{\text{specific}} = E_{\text{general}} / Z_{\text{FOC}}, \quad (\text{A4})$$

where Z_{FOC} is the mass fraction of the fuel oxide composition in the composition of the plasma processing products of the WONS.

The comparative characteristics of the received FOC are presented in appendix B in Table B1.

As a result of the comparative characteristic, it can be seen that the required adiabatic combustion temperature reaches the required value of 1550 K at $Q_{\text{H}}^{\text{p}} \approx 6.8$ MJ/kg and mass fraction of air ≈ 67 % for a magnesium matrix and at $Q_{\text{H}}^{\text{p}} \approx 6.3$ MJ/kg and mass fraction of air ≈ 65 % for a yttrium matrix. An assessment of the specific energy consumption showed that a more energy efficient composition of the FOC is 95 % UO_2 – 5 % MgO for magnesium matrix and 95 % UO_2 – 5 % Y_2O_3 for an yttrium matrix. Based on the thermophysical properties of oxide matrix materials and the small difference in specific energy consumption, it can be concluded that the magnesium-based matrix is more optimal and efficient due to its better thermal conductivity relative to the yttrium matrix. ($\lambda (\text{MgO}) = 6 \text{ W}/(\text{m K})$, $\lambda (\text{Y}_2\text{O}_3) = 2.9 \text{ W}/(\text{m K})$).

Recommendations for the practical implementation of the process

Based on the results of thermodynamic modeling of plasma-chemical processing of WONS-1÷8, in order to minimize the specific energy consumption for plasma-chemical synthesis of fuel oxide compositions FOC-1÷8, the following modes can be recommended for the practical implementation of the process of plasma-chemical synthesis of oxide compositions from WONS of uranium and magnesium, including an organic component:

- The composition of the WONS-1 ($Q_{\text{ns}} \approx 6.8 \text{ MJ/kg}$): (34 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 9.55 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 28.45 % H_2O – 28 % $\text{C}_3\text{H}_5\text{OH}$);
- Mass ratio of phases: 33 % WONS - 67 % Air;
- Organic component - acetone;

- Working temperature: 1500 ± 200 K;
- Specific energy consumption is: $E_{\text{specific}} = 25.4$ MJ/kg.

Conclusion

1. A review and comparative analysis of literature sources on the methods of separate and joint production of fuel oxide compositions for dispersed uranium nuclear fuel was carried out. The advantages of the technologies used include: single-stage, low specific energy consumption, homogeneous distribution of phases with a given stoichiometric composition, and the ability to influence the size and morphology of particles. Among the disadvantages are the high cost of processing and the need to use a large number of chemicals.

2. As a result of the calculations of the flammability of water-organic nitrate solutions, including an water nitrate solution of a fissile metal (uranium) and a matrix metal (magnesium, yttrium), as well as an organic component (ethanol), the compositions of WONS with $T_{\text{ad}} \approx 1550$ K for energy efficient processing are presented.

3. Based on the results of the thermodynamic analysis of the process, the conditions were determined that ensure the maximum yield of target products with minimum energy consumption during plasma processing of ethanol-based WONS.

4. Based on the results of the studies, the following optimal conditions for the practical implementation of the process under study and obtaining OC can be recommended «95 % UO_2 – 5 % MgO »:

- The composition of the WONS-1 ($Q_{\text{ns}} \approx 6.8$ MJ/kg): (34 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 9.55 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 28.45 % H_2O – 28 % $\text{C}_3\text{H}_5\text{OH}$);
- Mass ratio of phases: 33 % WONS - 67 % Air;
- Organic component - acetone;
- Working temperature: 1500 ± 200 K;
- Specific energy consumption is: $E_{\text{specific}} = 25.4$ MJ/kg.

Приложение Б

Таблица Б1 – Измерение расхода воздуха через газоход

№	S _{имп}		P _{пг} , ρv ² /2							P _{ср}
	3хп	См ²	1	2	3	4	5	6	7	мБар
1	3х10	1650	2,64	2,66	2,66	2,56	2,52	2,57	2,61	2,60
2	3х8	1320	2,56	2,54	2,5	2,48	2,49	2,48	2,49	2,51
3	3х6	990	2,41	2,36	2,42	2,39	2,4	2,41	2,37	2,39
4	3х4	660	2,25	2,29	2,24	2,3	2,25	2,29	2,28	2,27
1	3х10	1650	2,66	2,56	2,6	2,55	2,57	2,63	2,64	2,60
2	3х8	1320	2,56	2,48	2,5	2,53	2,44	2,51	2,53	2,51
3	3х6	990	2,42	2,37	2,35	2,4	2,39	2,41	2,32	2,38
4	3х4	660	2,27	2,23	2,3	2,32	2,27	2,25	2,33	2,28

Таблица Б2 – Измерение расходов воздуха через плазматрон

№	S _{имп}		P _{пг} , ρv ² /2							P _{ср}
	3хп	См ²	1	2	3	4	5	6	7	мБар
1	3х10	1650	2,23	2,21	2,24	2,3	2,19	2,26	2,28	2,24
2	3х8	1320	2,41	2,43	2,56	2,42	2,47	2,52	2,51	2,47
3	3х6	990	2,57	2,67	2,66	2,65	2,61	2,64	2,55	2,62
4	3х4	660	3,57	3,6	3,51	3,57	3,63	3,65	3,67	3,60
1	3х10	1650	2,19	2,25	2,21	2,23	2,27	2,28	2,22	2,24
2	3х8	1320	2,42	2,43	2,54	2,47	2,41	2,51	2,53	2,47
3	3х6	990	2,58	2,63	2,65	2,59	2,6	2,62	2,63	2,61
4	3х4	660	3,57	3,6	3,63	3,53	3,55	3,61	3,54	3,58

Таблица Б3 – Измерение расхода воздуха в реакторе

№	S _{имп}		Газоход			ВЧФП			T	ρ	Qp
	3хп	См ²	P _{ср} , мБар	P _{пг} , Па	Q, кг/с	P _{ср} , мБар	P _{пг} , Па	Q, кг/с	°C	кг/м ³	кг/с
1	3х10	1650	4,01	399,94	1,55	2,24	223,76	0,12	21	1,2009	1,43
2	3х8	1320	3,09	307,65	1,36	2,47	246,69	0,13			1,23
3	3х6	990	2,88	286,71	1,31	2,62	261,36	0,13			1,18
4	3х4	660	2,67	266,63	1,27	3,60	358,92	0,15			1,11
1	3х10	1650	4,02	401,08	1,55	2,24	222,90	0,12	21	1,2009	1,43
2	3х8	1320	3,11	310,21	1,36	2,47	246,54	0,13			1,24
3	3х6	990	2,89	287,85	1,31	2,61	260,64	0,13			1,18
4	3х4	660	2,68	267,48	1,27	3,58	356,50	0,15			1,12

Таблица Б4 – Сравнительная таблица получаемых ТОК

Состав ТОК	Состав ВОНР, %				Q _{нр} , МДж/кг	T _{ад} , К	Воздух, %	Состав продуктов				Э _{уд} , МДж/кг
	UO ₂ (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	H ₂ O	C ₃ H ₆ O				C	UO ₂	U ₃ O ₈	MgO	
95%UO ₂ -5%MgO	31,2	8,8	26	34	8,5	1714	72	+	+	-	+	32,3
							73	-	-	+	+	
	34	9,5	28,5	28	6,8	1589	67	+	+	-	+	25,4
							68	-	-	+	+	
90%UO ₂ -10%MgO	18,2	17,1	29,7	35	8,6	1684	72	+	+	-	+	49
							73	-	-	+	+	
	25,7	15,3	31	28	6,7	1574	66	+	+	-	+	31,3
							67	-	-	+	+	
80%UO ₂ -20%MgO	11,8	21,1	32,1	35	8,6	1664	72	+	+	-	+	64,1
							73	-	-	+	+	
	15,9	21,2	33,9	29	6,9	1548	67	+	+	-	+	45,1
							68	-	-	+	+	
50%UO ₂ -50%MgO	4,7	25,2	35,1	35	8,5	1623	72	+	+	-	+	97,4
							73	-	-	+	+	
	5	26,7	37,3	31	7,4	1534	69	+	+	-	+	84,3
							70	-	-	+	+	
	UO ₂ (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	Y(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	H ₂ O	C ₃ H ₆ O				C	UO ₂	U ₃ O ₈	Y ₂ O ₃	
95%UO ₂ -5%Y ₂ O ₃	37,8	4,4	23,8	34	8,5	1742	72	+	+	-	+	26,6
							73	-	-	+	+	
	42,4	4,9	26,7	26	6,3	1588	65	+	+	-	+	19,1
							66	-	-	+	+	
90%UO ₂ -10%Y ₂ O ₃	29	11,3	25,7	34	8,5	1725	72	+	+	-	+	30,6
							73	-	-	+	+	
	37,1	9,1	27,8	26	6,3	1570	65	+	+	-	+	20,6
							66	-	-	+	+	
80%UO ₂ -20%Y ₂ O ₃	22,4	16,3	27,3	34	8,4	1693	72	+	+	-	+	34,6
							73	-	-	+	+	
	28,5	15,7	29,8	26	6,2	1540	65	+	+	-	+	23,4
							66	-	-	+	+	
50%UO ₂ -50%Y ₂ O ₃	11,1	24,2	29,7	35	8,6	1698	72	+	+	-	+	45,8
							73	-	-	+	+	
	12,4	27,2	33,4	27	6,4	1535	65	+	+	-	+	33
							66	-	-	+	+	

Таблица Б5 – Полученные значения при проведении исследования и оптимизации режимов работы плазменного реактора на базе ВЧФ – плазматрона

						Анод				Сетка				Электрод				Корпус			
№	I, А	U _а , кВТ	P ₀ , кВТ	T _{дг} , °С	S, см ²	m _а , кг/с	dT _а , °С	P _а , кВТ	T _а ,°С	m _с , кг/с	dT _с , °С	P _с , кВТ	T _с , °С	m _э , кг/с	dT _э , °С	P _э , кВТ	T _э , °С	m _{кп} , кг/с	dT _{кп} , °С	P _{кп} , кВТ	T _{кп} , °С
1	3	5,7	17,1	34	3x10	0,244	7,5	7,65	18,4	0,066	4,3	1,18	12,3	0,119	4,1	2,05	14,7	0,057	1	0,238	11,9
2	3	5,7	17,1	34,6	3x8	0,244	7,5	7,65	18,4	0,066	4,3	1,18	12,3	0,119	4,1	2,05	14,7	0,057	1	0,238	11,9
3	3	5,8	17,4	35,7	3x6	0,244	7,6	7,75	18,5	0,066	4,3	1,18	12,3	0,119	4,2	2,1	14,8	0,057	1	0,238	11,9
4	3	5,8	17,4	36,6	3x4	0,244	7,6	7,75	18,5	0,066	4,3	1,18	12,3	0,119	4,2	2,09	14,8	0,057	1	2,38	11,9
1	3,5	5,8	20,3	37,3	3x10	0,244	8,5	8,67	19,4	0,066	3,7	1,02	11,7	0,119	4,9	2,45	15,5	0,057	1	0,238	11,9
2	3,5	5,8	20,3	36,8	3x8	0,244	8,5	8,67	19,4	0,066	3,8	1,05	11,8	0,119	4,9	2,45	15,5	0,057	1	0,238	11,9
3	3,5	6,3	22,05	36,5	3x6	0,244	8,4	8,57	19,3	0,066	4	1,1	12	0,119	4,9	2,45	15,5	0,057	1	0,238	11,9
4	3,5	6,5	22,75	37	3x4	0,244	8,6	8,77	19,5	0,066	4,1	1,13	12,1	0,119	5,1	2,55	15,7	0,057	1	0,238	11,9
1	4	6,5	26	37,8	3x10	0,244	9,3	9,49	20,2	0,066	3,6	0,99	11,6	0,119	5,4	2,7	16	0,057	1	0,238	11,9
2	4	6,7	26,8	38	3x8	0,244	9,4	9,59	20,3	0,066	3,5	0,96	11,5	0,119	5,5	2,75	16,1	0,057	1	0,238	11,9
3	4	6,9	27,6	37,9	3x6	0,244	9,6	9,79	20,5	0,066	3,3	0,91	11,3	0,119	5,6	2,8	16,2	0,057	0,9	0,214	11,8
4	4	7	28	36,8	3x4	0,244	9,6	9,79	20,5	0,066	3	0,83	11	0,119	5,7	2,85	16,3	0,057	0,8	0,191	11,7

Таблица Б6 – Определение температуры воздушной плазменной струи и установочного КПД установки

					ВЧФП						
№	I, А	U _а , кВт	P ₀ , кВт	T _{дг} , °C	S, см ²	P _{стр} , кВт	Q _{пл} , кг/с	H _г , кДж/кг	T _{стр} , °C	P _р , кВт	η, %
1	3	5,7	17,1	34	3x10	5,737	0,11	354	350	5,98	96
2	3	5,7	17,1	34,6	3x8	5,737	0,12	349	350	5,98	96
3	3	5,8	17,4	35,7	3x6	5,885	0,13	344	350	6,12	96,1
4	3	5,8	17,4	36,6	3x4	5,884	0,15	338	340	6,12	96,1
1	3,5	5,8	20,3	37,3	3x10	7,682	0,11	372	375	7,92	97
2	3,5	5,8	20,3	36,8	3x8	7,654	0,12	365	375	7,89	97
3	3,5	6,3	22,05	36,5	3x6	9,451	0,13	370	375	9,69	97,5
4	3,5	6,5	22,75	37	3x4	9,82	0,15	365	375	10,1	97,6
1	4	6,5	26	37,8	3x10	12,34	0,11	415	425	12,6	98,1
2	4	6,7	26,8	38	3x8	13,02	0,12	411	425	13,3	98,2
3	4	6,9	27,6	37,9	3x6	13,67	0,13	402	420	13,9	98,5
4	4	7	28	36,8	3x4	14,15	0,15	393	400	14,3	98,7