

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

Школа – Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии  
Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерно-топливного цикла

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного REMIX-топлива</b>

УДК 621.039.543:66.091:533.9

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8Д	А.А. Суняйкина		31.05.2022

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	А.Г. Каренгин	д.т.н.		31.05.2022

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН	Т.Б. Якимова	к.э.н.		31.05.2022

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Ю.В. Передерин	к.т.н., доцент		31.05.2022

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
14.03.02. Ядерные физика и технологии	П.Н. Бычков	к.т.н.		31.05.2022

Томск – 2022 г.

## Результаты обучения по ООП

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
<b>Универсальные</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
<b>Общепрофессиональные</b>	
ОПК(У)-1	Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ОПК(У)-2	Способен осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, предоставлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
ОПК(У)-3	Способен использовать в профессиональной деятельности современные информационные системы, анализировать возникающие при этом опасности и угрозы, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способен использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области
ПК(У)-2	Способен проводить математическое моделирование процессов и объектов атомной отрасли с использованием стандартных методов и компьютерных кодов для проектирования и анализа

ПК(У)-3	Готов к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу полученных экспериментальных данных
ПК(У)-4	Способен использовать технические средства для измерения основных параметров объектов исследования
ПК(У)-5	Готов к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок
ПК(У)-6	Способен использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу исходных данных для проектирования объектов атомной отрасли
ПК(У)-7	Способен к расчету и проектированию деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием
ПК(У)-8	Готов к разработке проектной и рабочей технической документации, оформлению законченных проектно-конструкторских работ
ПК(У)-9	Способен к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам
ПК(У)-10	Готов к проведению предварительного технико-экономического обоснования проектных решений при разработке установок и приборов
ПК(У)-11	Способен к контролю за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования
ПК(У)-12	Готов к эксплуатации современного физического оборудования, приборов и технологий
ПК(У)-13	Способен к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда
ПК(У)-14	Готов разрабатывать способы применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, сверхвысокочастотных и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем
ПК(У)-15	Способен к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Школа – Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки (специальность) – 14.03.02 Ядерная физика и технологии  
Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
(Подпись) \_\_\_\_\_ (Дата) Бычков П.Н.  
(Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А8Д	Суняйкиной Анне Алексеевне

Тема работы:

Исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного REMIX-топлива	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№32-52/с от 01.02.2022

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2022
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Исследовать и оптимизировать процесс плазмохимического синтеза топливных оксидных композиций «PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> -MgO» из водно-органических нитратных растворов металлов, включающих водные нитратные растворы делящихся металлов (уран, плутоний), металл матрицы (магний) и органический компонент (ацетон, этанол).
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	1. Обзор и сравнительный анализ литературных источников по методам раздельного и совместного получения топливных оксидных композиций «PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> -MgO». 2. Расчет показателей горючести водно-органических нитратных растворов, включающих водные нитратные растворы делящихся металлов (уран, плутоний), металл матрицы (магний) и органический компонент (ацетон, этанол). Установление закономерностей влияния содержания органического компонента на их низшую теплотворную способность. Определение оптимальных по составу растворов ВОНР,

	<p>обеспечивающих их энергоэффективную плазменную переработку.</p> <p>3. Термодинамическое моделирование процесса плазмохимического синтеза топливных оксидных композиций из растворов ВОНР. Установление закономерностей влияния содержания массовой доли плазменного теплоносителя (воздуха) на состав образующихся продуктов в газовой и конденсированных фазах. Оценка удельных энергозатрат на процесс. Сравнительный анализ и определение режимов, обеспечивающих в воздушной плазме энергоэффективный синтез топливных оксидных композиций «PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub>-MgO».</p> <p>4. Экспериментальное подтверждение исследования.</p>
--	---

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Расчетная часть	Доцент ОЯТЦ ИЯТШ А.Г. Каренгин
Экспериментальная часть	Доцент ОЯТЦ ИЯТШ А.Г. Каренгин
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	Доцент ОСГН Т.Ю. Якимова
Социальная ответственность	Доцент ОЯТЦ ИЯТШ Ю.В. Передерин

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	01.02.2022
---	------------

**Задание выдал руководитель**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Каренгин Александр Григорьевич	к.ф.-м.н.		01.02.2022

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8Д	Суняйкина Анна Алексеевна		01.02.2022

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А8Д	Суняйкиной Анне Алексеевне

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Физика кинетических явлений

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

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

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Анализ конкурентных технических решений (НИ)	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)	Определение структуры выполнения НИ. Определение трудоемкости работ. Разработка графика проведения исследования.
3. Составление бюджета инженерного проекта (НИ)	Расчет бюджетной стоимости НИ.
4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной, эффективности (НИ)	Определение: интегрального финансового показателя, интегрального показателя ресурсоэффективности, интегрального показателя эффективности.

**Перечень графического материала**

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Грантта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	01.02.2022
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	к.э.н.		01.02.2022

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А8Д	Суняйкина Анна Алексеевна		01.02.2022

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА**

## «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А8Д	Сунайкиной Анне Алкссеевне

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Физика кинетических явлений

Тема ВКР:

Исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного REMIX-топлива
--

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: наноструктурные оксидные композиции. Область применения: атомная промышленность.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– Требования к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ;</li> <li>– ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.</li> </ul>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Вредные и опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– отклонение показателей микроклимата;</li> <li>– повышенный уровень электромагнитных излучений;</li> <li>– недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>– повышенный уровень шума;</li> <li>– психофизиологические факторы;</li> <li>– опасность поражения электрическим током.</li> </ul>
<p><b>3. Экологическая безопасность:</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ влияния объекта и процесса исследования на окружающую среду;</li> <li>– разработка организационных и технических мероприятий по защите окружающей среды.</li> </ul>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– выбор и описание типичной ЧС: пожар;</li> <li>– обоснование мероприятий по предотвращению ЧС;</li> <li>– порядок действий при возникновении ЧС.</li> </ul>

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Юрий Владимирович	к.т.н., доцент		01.02.2022 г.

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А8Д	Сунайкина Анна Алексеевна		01.02.2022 г.

## Оглавление

Реферат .....	11
Введение .....	14
1. Обзор литературы.....	15
1.1. Методы получения топливных оксидных композиций .....	15
1.1.1. Получение и свойства диоксида урана .....	15
1.1.2. Получение и свойства диоксида плутония.....	17
1.1.3. Получение и свойства оксида магния .....	19
1.2. Золь-гель процесс .....	20
1.3. Плазмохимический синтез топливных оксидных композиций.....	21
1.4. Получение топливных оксидных композиций для REMIX-топлива 23	
2. Расчетная часть .....	26
2.1. Расчет показателей горючести и состава водно-органических нитратных растворов .....	26
2.2. Термодинамическое моделирование процесса плазмохимического синтеза топливных оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов .....	27
3. Экспериментальная закалку часть.....	37
3.1. Описание плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона.....	37
3.2. Определение расходов воздушного теплоносителя через ВЧФ- плазмотрон.....	39
3.3. Определение расходов воздушного теплоносителя через реактор	41
3.4. Плазмохимическая переработка растворов ВОНР.....	42
3.5. Анализ полученных результатов.....	43

4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	49
4.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	50
4.1.1	Анализ конкурентных технических решений .....	50
4.2	SWOT-анализ .....	51
4.3	Планирование научно-исследовательского проекта .....	53
4.4	Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	55
4.4.1	Расчет материальных затрат .....	56
4.4.2	Расчет амортизации оборудования для экспериментальных работ ....	56
4.4.3	Затраты на оплату труда исполнителей научно-технического исследования.....	58
4.4.4	Отчисления во внебюджетные фонды.....	60
4.4.5	Накладные расходы .....	61
4.5	Определение ресурсной эффективности проекта .....	62
5	Социальная ответственность .....	64
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	65
5.1.1	Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.....	65
5.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	66
5.2	Производственная безопасность.....	68
5.2.1	Анализ вредных и опасных факторов .....	68
5.3	Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов .....	70
5.3.1	Отклонение показателей микроклимата.....	70

5.3.2 Повышенный уровень электромагнитного излучения .....	71
5.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны .....	72
5.3.4 Превышение уровня шума .....	75
5.3.5 Психофизиологические факторы .....	76
5.3.6 Поражение электрическим током .....	77
5.4 Экологическая безопасность .....	79
5.5 Химическая безопасность .....	80
5.6 Пожарная и взрывная безопасность .....	81
5.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	83
5.7.1 Анализ типичной ЧС при проведении исследования .....	83
Выводы .....	86
Заключение .....	88
Список использованных источников .....	89
Приложение А .....	91
Приложение Б .....	97
Приложение В .....	103
Приложение Г .....	108
Приложение Д .....	110

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 101 страница, 35 рисунок, 34 таблицы, 20 источников, 54 формулы.

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

Объектом исследования является процесс плазмохимического синтеза топливных оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов урана, плутония и магния.

Цель работы – Исследование процесса плазмохимического синтеза топливных оксидных композиций «диоксид плутония – диоксид урана – оксид магния» из водно-органических нитратных растворов металлов, включающих водные нитратные растворы делящихся металлов (уран, плутоний), металла матрицы (магний) и органический компонент (ацетон, этанол).

В процессе исследований проводились: расчет показателей горючести водно-органических нитратных растворов урана, плутония и магния; термодинамическое моделирование процесса плазмохимического синтеза топливных оксидных композиций из растворов в воздушной плазме; измерение теплофизических и газодинамических параметров воздушно-плазменного потока при работе плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона; исследование физико-химических свойств полученных порошков оксидных композиций.

В работе были определены составы водно-органических нитратных растворов и режимы их переработки в воздушно-плазменном потоке, обеспечивающие плазмохимический синтез наноразмерных оксидных композиций из диспергированных водно-органических нитратных растворов неодима (вместо урана), самария (вместо плутония), магния и ацетона.

Область применения: результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза из диспергированных водно-органических нитратных растворов наноструктурных топливных оксидных композиций для REMIX-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.

**Нанодисперсный порошок** – порошок, размер всех частиц которого 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

**БЭТ-анализ** – метод, предложенный Брунауэром, Эммитом и Тэллером.

**ВЧФ-разряд** – высокочастотный факельный разряд.

**ВЧФ-плазмотрон** – высокочастотный факельный плазмотрон.

**ВЧГ** – высокочастотный генератор.

**ВОНР** – водно-органический нитратный раствор.

**ОК** – 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.

## Введение

В настоящее время в связи с исчерпанием запасов  $U^{235}$  (как рудных, так и складских) все большее внимание привлекает  $Pu^{239}$  как основа будущего реакторного топлива, поскольку 1 грамм плутония эквивалентен 100 граммам извлеченного из отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) урана, 1500–3000 кубометрам природного газа, 2–4 тоннам угля или 1 тонне нефти. На момент 2014 года в мире работали 430 ядерных реакторов, из которых ежегодно выгружали около 10 000 тонн (ОЯТ), содержащего 70 тонн плутония.

Согласно приблизительным оценкам 92 тонны оружейного плутония достаточно для замены 11040 тонн природного урана. 252 тонны энергетического плутония позволяют заменить 30240 тонн природного урана. В то же время плутоний является опасным радиоактивным материалом, который может быть использован и для создания ядерных зарядов. Поэтому его накопление не только расточительно, но и опасно. Общее количество плутония, хранящегося в мире на начало XXI в. во всевозможных формах, оценивается в 1239 тонн, из которых значительная часть находится в отработанном ядерном топливе АЭС. В 2014 году более 120 тысяч тонн ОЯТ находилось в хранилищах, а в 2020 г. – 450 тысяч тонн.

Проблема обращения с плутонием является частью общего процесса ядерного разоружения, в ходе которого в России и США высвобождаются значительные количества оружейных делящихся материалов – высокообогащенного урана и плутония. Все стадии функционирования ядерного топливно-энергетического комплекса, такие как производство топлива для ядерных реакторов, подготовка его к использованию, сжигание топлива в реакторе, утилизация отработанного топлива, промежуточное хранение, вместе взятые составляют так называемый ядерный топливный цикл (ЯТЦ) [1].

## 1. Обзор литературы

В данном разделе ВКР рассмотрены некоторые методы получения дисперсных порошков, а также получение и физико-химические свойства оксидов урана, плутония и магния.

### 1.1. Методы получения топливных оксидных композиций

#### 1.1.1. Получение и свойства диоксида урана

Диоксид урана  $UO_2$  – порошок, цвет которого меняется от коричневого до черного в зависимости от дисперсности и способа получения. Вследствие нестехиометричности его реальный состав выражается формулой  $UO_{1,6-2,25}$ .

Рентгенографическая плотность диоксида урана равна  $10,95 \text{ г/см}^3$ . он устойчив в вакууме до  $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ , после чего начинает терять кислород; плавится в атмосфере инертного газа при  $2187 \text{ }^\circ\text{C}$ , т.е. является очень тугоплавким веществом [2].

Диоксид урана является полупроводником. Его электропроводность зависит от способа получения и количества микропримесей. Важнейшим свойством  $UO_2$  является способность изделий, изготовленных из него, не менять свою форму при облучении [2].

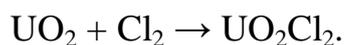
Прессованный  $UO_2$  обладает достаточно высокой механической прочностью (на изгиб  $\approx 1 \text{ т/см}^2$ , на сжатие  $\approx 10 \text{ т/см}^2$ ). В то же время чистый диоксид урана неустойчив к циклическим тепловым нагрузкам.

$UO_2$  является довольно инертным оксидом, у которого ярко выражены восстановительные свойства. Так, мелкодисперсный порошок  $UO_2$  пирофорен, способен сгорать на воздухе. Крупнодисперсный диоксид урана не пирофорен, но на воздухе поглощает кислород, а при нагревании на воздухе до  $170 \text{ }^\circ\text{C}$  переходит в  $U_3O_7$ , а при  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  – в  $U_3O_8$ :



Сухие галогены также способны окислять  $UO_2$ :





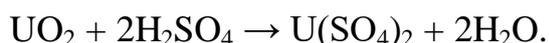
Окислительные свойства у диоксида урана выражены гораздо слабее. Так, с водородом  $\text{UO}_2$  не взаимодействует даже при  $600\text{ }^\circ\text{C}$  [2].

$\text{UO}_2$  способен восстанавливаться при сплавлении с активными металлами (калием К, кальцием Са, магнием Mg), что может использоваться для получения металлического урана:



Диоксид урана является основным оксидом. Он не взаимодействует со щелочами и основными оксидами, но взаимодействует с кислотами. В то же время  $\text{UO}_2$  является самым инертным оксидом урана [2].

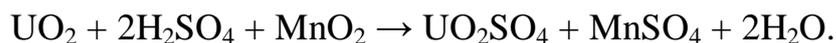
В разбавленных растворах кислот диоксид урана не растворяется даже при нагревании. В концентрированных кислотах-неокислителях при нагревании образуются соли U (IV):



В концентрированных кислотах-окислителях образуются соли уранила:



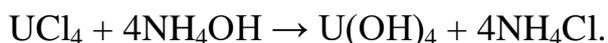
В присутствии окислителей растворение в кислотах происходит с гораздо большей скоростью. При этом всегда образуются соли уранила:



В присутствии перекисных соединений  $\text{UO}_2$  способен взаимодействовать со щелочами с образованием перуранатов:



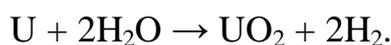
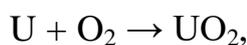
Диоксид урана не взаимодействует с водой даже при температурах более  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , косвенным путем (из солей урана) можно получить гидроксид урана  $\text{U}(\text{OH})_4$  черного цвета:



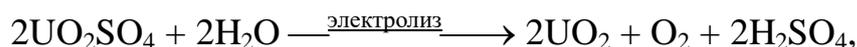
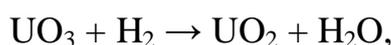
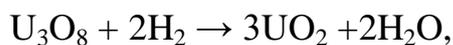
Его характерной особенностью является очень маленькая растворимость в щелочных средах (ПР = 10–54). В то же время гидрат окиси урана хорошо растворяется в кислотах. В присутствии воздуха  $\text{U}(\text{OH})_4$  быстро окисляется до  $\text{U}_3\text{O}_8$ .

Диоксид урана может быть получен окислительными или восстановительными методами [2].

К окислительным методам относятся прямое взаимодействие металлического урана с кислородом и взаимодействие металлического урана с водой:



Восстановительные методы заключаются во взаимодействии водорода с высшими оксидами урана, электролизе растворов солей уранила и термическом разложении некоторых неустойчивых солей в инертной атмосфере:



Благодаря своей химической инертности, высокой механической прочности, радиационной устойчивости диоксид урана нашел широкое применение в ядерной энергетике в качестве материала для изготовления ТВЭЛов. Его недостатками как ядерного топлива является низкая теплопроводность и неустойчивость к перепаду температур [2].

### 1.1.2. Получение и свойства диоксида плутония

Диоксид плутония – кристаллическое вещество от желтого до коричневого цвета. Диоксид получается при сжигании (на воздухе или в кислороде) металлического плутония или низших его оксидов ( $PuO$ ,  $Pu_2O_3$ ), при сжигании его гидроксида, нитрида, карбида, при прокатке на воздухе его кислородсодержащих солей. Промышленные методы получения  $PuO_2$  основаны главным образом на разложении пероксида плутония  $Pu(O_2)_2$  или оксалатов плутония  $Pu_2(C_2O_4)_3 \cdot xH_2O$  и  $Pu(C_2O_4)_2 \cdot 6H_2O$  при температуре 1000 °С и выше. Теоретическая плотность диоксида плутония равна 11,46 г/см<sup>3</sup>,

температура плавления в атмосфере кислорода под давлением 1 атм. равна 2400 °С. При высоких температурах на воздухе  $\text{PuO}_2$  диссоциирует с образованием  $\text{Pu}_2\text{O}_3$  [2].

Химические свойства диоксида плутония очень сильно зависят от температуры его получения. Диоксид, полученный при температуре свыше 500 °С, становится инертным, почти нерастворимым в кислотах. Лучшим растворителем является 85-100 %-ная ортофосфорная кислота ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) при температуре 200 °С, в которой можно достичь концентрации плутония до 250 г/л. Для растворения диоксида рекомендуется применять концентрированную  $\text{HNO}_3$  с добавкой 0,05 М фтороводородной кислоты или ее солей ( $\text{KF}$ ,  $\text{NaF}$ ). При этом образуются комплексные ионы плутония [2].

Диоксид плутония, полученный при температуре до 870 °С, реагирует с газообразным фтороводородом при температуре 500 °С, образуя либо  $\text{PuF}_4$ , либо  $\text{PuF}_3$  (в присутствии водорода).

С практической точки зрения интересно знать о совместимости диоксида плутония с оксидами других металлов и в первую очередь с  $\text{UO}_2$ . Смесь оксидов  $\text{PuO}_2$  и  $\text{UO}_2$  используется для изготовления ТВЭЛов в атомных реакторах. Первая конструкция реактора с расширенным воспроизводством плутония ТВЭЛами из  $\text{PuO}_2$ - $\text{UO}_2$  была создана в 1946 г [2].

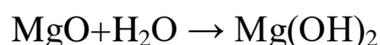
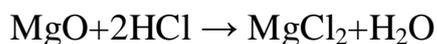
Диоксид плутония и диоксид урана образуют непрерывный ряд твердых растворов. Однако, если использовать в качестве исходных материалов чистые оксиды, то получить твердые растворы этих соединений трудно. Поэтому их получают путем совместного осаждения плутония и урана из растворов в виде оксалатов или пероксидов с последующим термическим разложением их при температуре порядка 400 °С в присутствии водорода (для восстановления высших оксидов урана, образующихся при разложении солей) [2].

### 1.1.3. Получение и свойства оксида магния

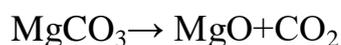
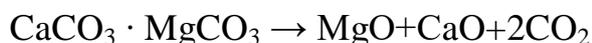
Оксид магния (жженая магнезия) – химическое соединение с формулой MgO, белые кристаллы, малорастворимые в воде, пожаро- и взрывобезопасен.

Представляет собой легкий и рыхлый порошок белого цвета, который легко впитывает воду. Температура плавления – 2825 °С. Температура кипения – 3600 °С. Плотность – 3,58 г/см<sup>3</sup> [3].

Разберем химические свойства. Оксид хорошо реагирует с разбавленными кислотами, в ходе реакций с которыми образуются соли, плохо реагирует с холодной водой, образуя Mg(OH)<sub>2</sub>. С горячей водой реагирует лучше, реакция идет намного быстрее [3].



Получают оксид магния путем обжига минералов магнезита и доломита.



Нитрат магния (магниева селитра - Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) в обычных условиях представляет собой твердое вещество белого цвета в виде кристаллов (кристаллическая структура).

Получают безводный нитрат магния путем взаимодействия Mg с N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> с дальнейшим отщеплением N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, гидратированный - с реакцией MgCO<sub>3</sub> или MgO с разбавлением HNO<sub>3</sub>. Гексагидрат - исходное соединение при синтезе MgO особой чистоты, нитратов других металлов, а также разложении соединений магния. В таблице 1 представлены данные по растворимости в воде нитрата магния 6-водного [3].

Таблица 1.1 Растворимость нитрата магния 6-водного в воде

Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O, г/100 г воды		
0	64	6
10	70,1	6
20	73,3	6

25	75,1	6
30	77,3	6
40	81,2	6
50	85,9	6
60	91,9	6
80	110,1	6
90	137,0	6

## 1.2. Золь-гель процесс

Золь-гель процесс представляет собой процесс получения дисперсных частиц с преобразованием коллоидной системы на одной из стадий процесса (рисунок 1). Этот метод используется для изготовления оксидов металлов, особенно оксидов кремния и титана. Процесс включает в себя превращение мономеров в коллоидный раствор – «золь» (стабильная суспензия коллоидных частиц в жидкости), который является предшественником для «геля» (пористая трехмерная непрерывная сплошная сеть, окружающая и поддерживающая непрерывную жидкую фазу; часто образуется ковалентными связями между золями частиц).

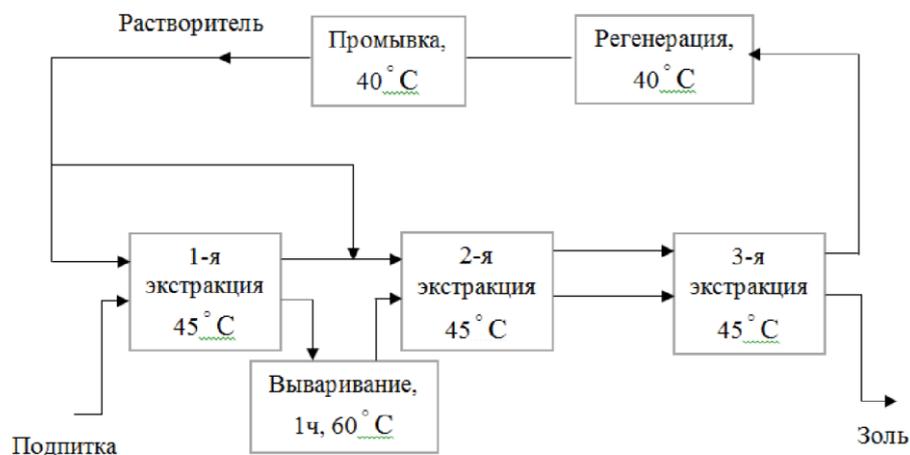


Рисунок 1.1 – Схема процесса приготовления «золя» из диоксида урана экстракцией растворителя

«Золь» (коллоидный раствор), постепенно переходит в гелеобразную двухфазную систему, содержащую как жидкую фазу, так и твердую фазу, морфология которой варьируется от дискретных частиц до непрерывных полимерных сетей. В случае коллоида объемная доля частиц может быть

настолько низкой, что первоначально может потребоваться удаление значительного количества жидкости для улучшения гелеобразных свойств. Это может быть достигнуто разными способами. Самый простой способ состоит в том, чтобы дать частицам дисперсной фазы осесть в жидкости или газе под действием гравитационного поля или центробежных сил, а затем слить оставшуюся жидкость. Для ускорения процесса разделения фаз также можно использовать центрифугирование.

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

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

### **1.3. Плазмохимический синтез топливных оксидных композиций**

К несомненным преимуществам применения плазмы для плазмохимического синтеза оксидных композиций для ДЯТ из диспергированных водных растворов металлов по сравнению с золь-гель процессом и технологией, основанной на отдельном получении и механическом смешении оксидов металлов, следует отнести:

одностадийность; высокую скорость; возможность активно влиять на размер и морфологию частиц; компактность технологического оборудования [6]. На рисунке 2 представлена схема плазменной переработки диспергированных растворов ВНР [7].

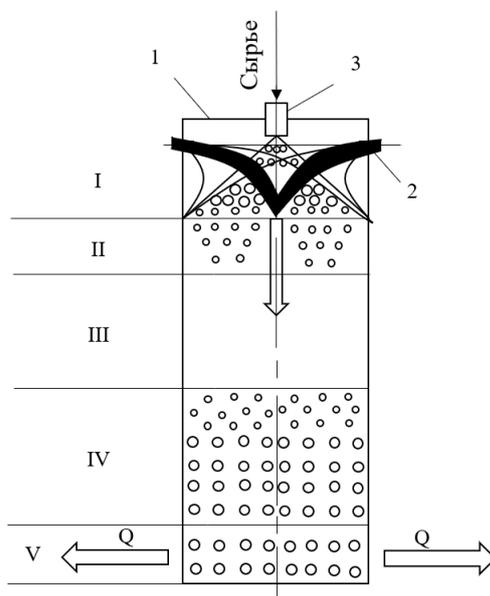


Рисунок 1.2 – Схема плазменной переработки диспергированных растворов:

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

Плазменный термолиз водных растворов солей или суспензий является гибким и универсальным способом получения наноразмерных порошков простых и сложных оксидов металлов. Основные его достоинства – это большое число каналов воздействия на физико-химические свойства продукта, возможность синтеза сложнооксидных соединений, а также высокая химическая активность получаемых целевых продуктов.

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

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

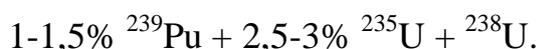
Предлагается прямой плазмохимический синтез в воздушно-плазменном потоке сложных оксидных композиций (включающих оксиды делящихся материалов и матрицу из тугоплавких оксидов металлов, имеющих высокий коэффициент теплопроводности и низкое резонансное поглощение нейтронов) из диспергированных водно-органических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

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

#### **1.4. Получение топливных оксидных композиций для REMIX-топлива**

В России альтернативные решения по возвращению регенерированного топлива в реакторы ВВЭР исследуются для так называемого РЕМИКС-топлива (REMIX – REgenerated MIXture of U, Pu oxides), состоящего из неразделенной смеси урана и плутония, получаемой при переработке ОЯТ, в которую добавляется природный уран с небольшим количеством  $^{235}\text{U}$  обогащением около 16–17% для компенсации

присутствия в смеси четных изотопов  $^{236}\text{U}$ ,  $^{232}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$  и обеспечения необходимых размножающих свойств. В результате примерный состав РЕМИКС-топлива выглядит следующим образом [8]:



Технология подразумевает повторное использование плутония и остаточного количества  $^{235}\text{U}$  отработавшего ядерного топлива. При этом в регенерированное топливо плутоний дополнительно не добавляется, а сохраняется лишь тот, который наработан в реакторе. Для того чтобы поддержать изотопный баланс делящихся материалов, на каждой новой стадии, в каждом новом рецикле к топливу добавляется лишь небольшое количество  $^{235}\text{U}$  с обогащением около 17%. Таким образом энергетический потенциал РЕМИКС-ОЯТ, т.е. сумма делящихся изотопов урана и плутония, остается практически постоянным при рециклировании, обеспечивая многократное рециклирование всего количества делящихся материалов, загруженных в реактор, и стабильность при изготовлении РЕМИКС-топлива [8].

Преимущества топливных циклов ВВЭР-1000 с регенерированным уран-плутониевым топливом по сравнению с открытым урановым топливным циклом:

- для изготовления регенерированного топлива используется весь уран и плутоний, содержащийся в отработавшем топливе;
- отсутствует необходимость выделения плутония в чистом виде при переработке отработавшего топлива, что снижает риск распространения плутония;
- вследствие низкого содержания плутония в регенерированном уран-плутониевом топливе возможна полная загрузка активной зоны ВВЭР-1000 таким топливом;
- экономия природного урана;

- уменьшение количества отработавшего топлива, поступающего на длительное хранение;
- на перерабатывающем заводе может быть использована аналогичная технология переработки отработавшего топлива как тепловых, так и быстрых реакторов;
- возможна переработка отработавшего топлива тепловых реакторов неядерных государств с последующим изготовлением регенерированного уран-плутониевого топлива [8].



Рисунок 1.3 – Схема многократного рециклирования регенерированных урана и плутония в виде РЕМИКС-топлива в реакторах ВВЭР-1000 [8].

Российскими специалистами были выполнены нейтронно-физические расчеты нескольких топливных циклов реакторов ВВЭР-1000 при 100%-й загрузке активной зоны РЕМИКС-топливом. Расчетные исследования показали – пока теоретически – возможность реализации многократного рециклирования РЕМИКС-топлива в ВВЭР (на сегодняшний момент подтверждена возможность пятикратного цикла) [8].

Проведенные расчеты первых циклов выявили особенности загрузки активной зоны с регенерированным уран-плутониевым топливом, которые заключаются в уменьшении эффективности жидкостной системы регулирования реактивности, эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни мгновенных нейтронов деления, увеличении

интенсивности обратных связей по мощности, температуре теплоносителя и топлива, а также в снижении запаса реактивности, компенсируемого борной кислотой [8].

Был сделан вывод, что перечисленные отличия не создают препятствий для практического использования регенерированного уран-плутониевого топлива, поскольку расчетные нейтронно-физические характеристики загрузки с таким топливом укладываются в проектные ограничения активной зоны ВВЭР-1000. В частности, максимальные значения мощности ТВС, твэла и линейной мощности твэла не превышают установленных пределов. Удовлетворяются также условия ядерной безопасности при перегрузке топлива и в процессе вывода реактора на минимально контролируемый уровень мощности. Механическая система управления реактивностью обладает необходимой эффективностью [8].

## **2. Расчетная часть**

### **2.1. Расчет показателей горючести и состава водно-органических нитратных растворов**

Низшая теплотворная способность водно-органических нитратных растворов определялась по уравнению [9].

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

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

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

Более объективным показателем горючести водно-органического нитратного раствора является адиабатическая температура горения ( $T_{ад}$ ), которую оценивали по формуле (2):

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

где  $v_{ок}$  – массовая доля окислителя (воздуха), %;  $C_{ок}$  – теплоемкость окислителя, кДж/(кг·К);  $t_{ок}$  – температура окислителя, К;  $V$  – удельный объем продуктов плазменной переработки водно-органического нитратного раствора, м<sup>3</sup>/кг;  $C$  – объемная равновесная теплоемкость продуктов плазменной переработки водно-органического нитратного раствора, кДж/(м<sup>3</sup>·К).

Для образования сложных оксидных композиций различного состава определены следующие оптимальные по составу растворы ВОНР, указанные в таблицах (Приложение А).

## **2.2. Термодинамическое моделирование процесса плазмохимического синтеза топливных оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов**

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

Расчет общих энергозатрат на процесс плазменной переработки растворов ВОНР проводился по формуле:

$$\mathcal{E}_{общ} = I_T - I_{300},$$

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.

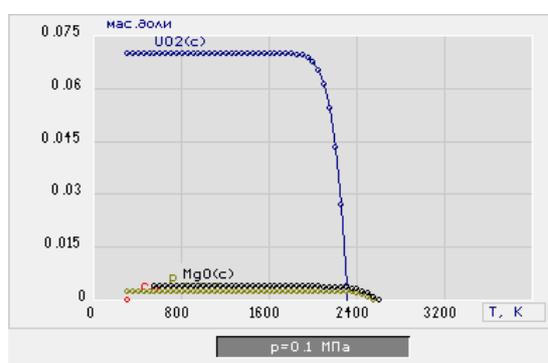
Расчет и оценка удельных энергозатрат на получение 1 кг топливной оксидной композиции проводился по формуле.

$$\mathcal{E}_{уд} = \mathcal{E}_{общ} / Z_{ТОК},$$

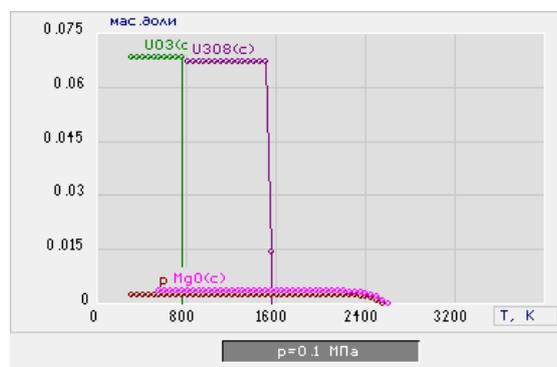
где  $Z_{ТОК}$  – массовая доля топливной оксидной композиции в составе продуктов плазменной переработки раствора ВОНР.

Для образования сложных оксидных композиций различного состава определены следующие оптимальные условия получения ТОК в воздушной плазме из ВОНР, указанные в таблицах (Приложение Б).

На рисунках 2.1-2.8 представлены характерные равновесные составы продуктов плазменной переработки растворов ВОНР-1÷7 на основе ацетона и удельные энергозатраты на плазмохимический синтез ТОК-1÷7 ( $\alpha = 0,034$ ).

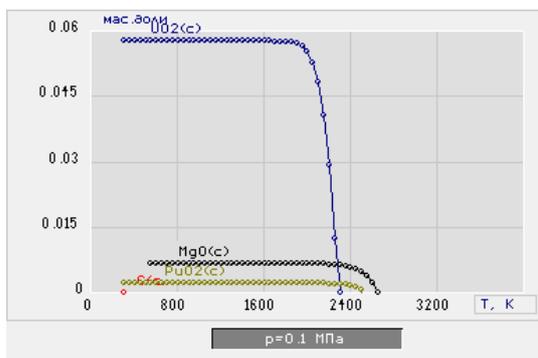


(а)

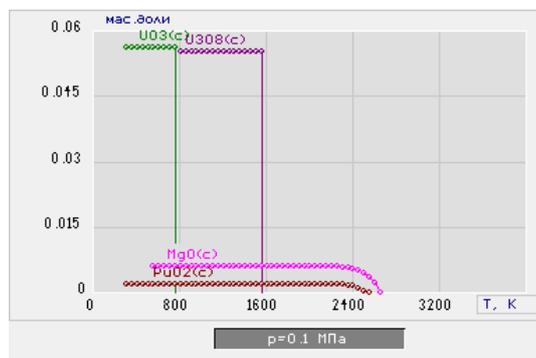


(б)

Рисунок 2.1 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-1 на основе ацетона ( $\alpha = 0,034$ ) при массовой доле воздуха 61 % (а) и 64 % (б)

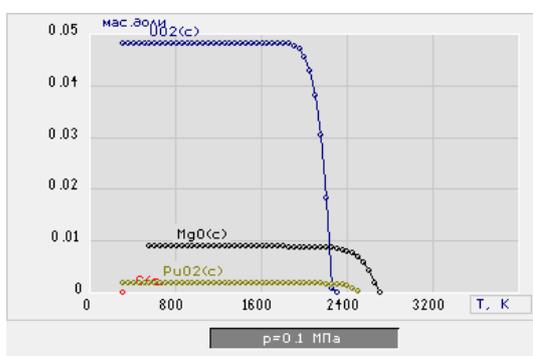


(a)

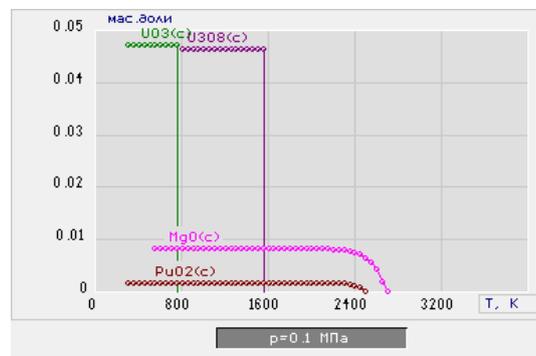


(б)

Рисунок 2.2 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-2 на основе ацетона ( $\alpha = 0,034$ ) при массовой доле воздуха 61 % (а) и 64 % (б)

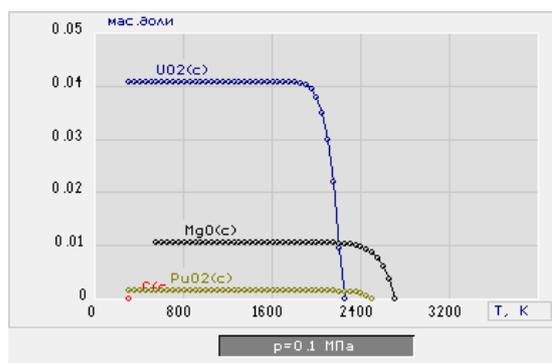


(a)

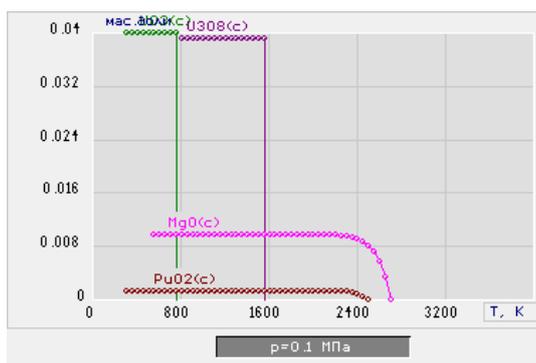


(б)

Рисунок 2.3 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-3 на основе ацетона ( $\alpha = 0,034$ ) при массовой доле воздуха 61 % (а) и 64 % (б)

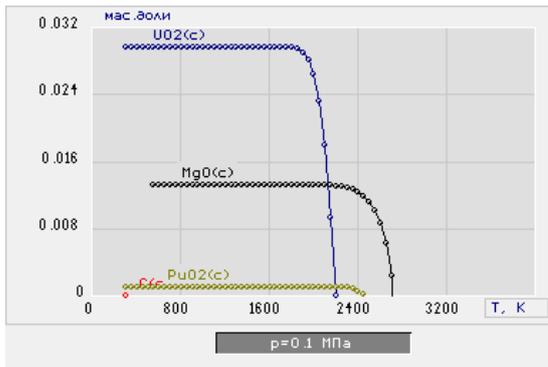


(a)

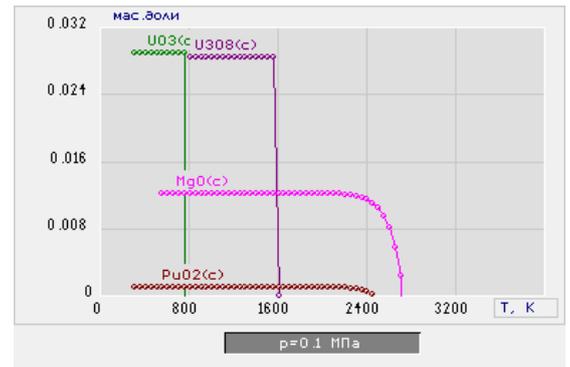


(б)

Рисунок 2.4 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-4 на основе ацетона ( $\alpha = 0,034$ ) при массовой доле воздуха 61 % (а) и 64 % (б)

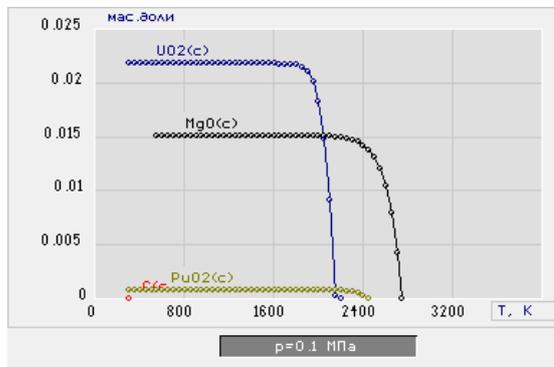


(a)

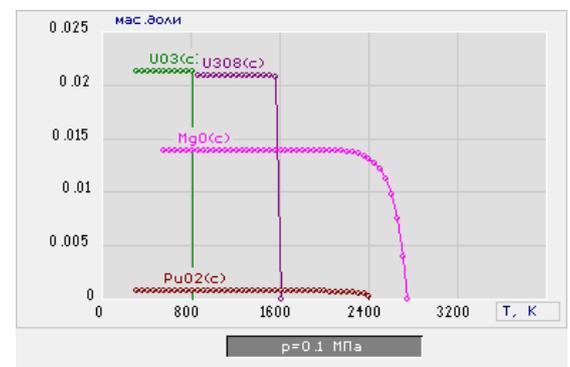


(б)

Рисунок 2.5 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-5 на основе ацетона ( $\alpha = 0,034$ ) при массовой доле воздуха 61 % (а) и 64 % (б)

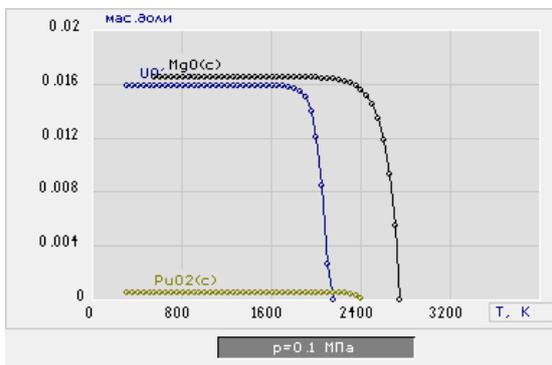


(a)

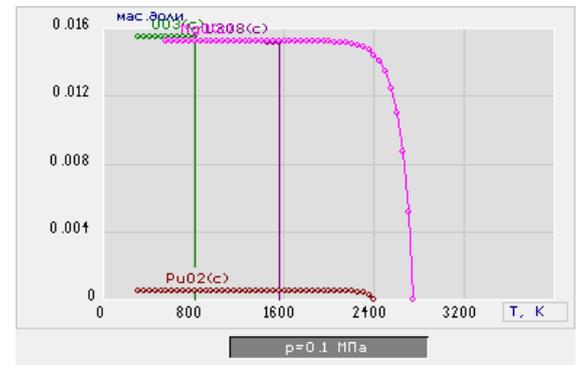


(б)

Рисунок 2.6 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-6 на основе ацетона ( $\alpha = 0,034$ ) при массовой доле воздуха 61 % (а) и 64 % (б)



(a)



(б)

Рисунок 2.7 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-7 на основе ацетона ( $\alpha = 0,034$ ) при массовой доле воздуха 61 % (а) и 64 % (б)

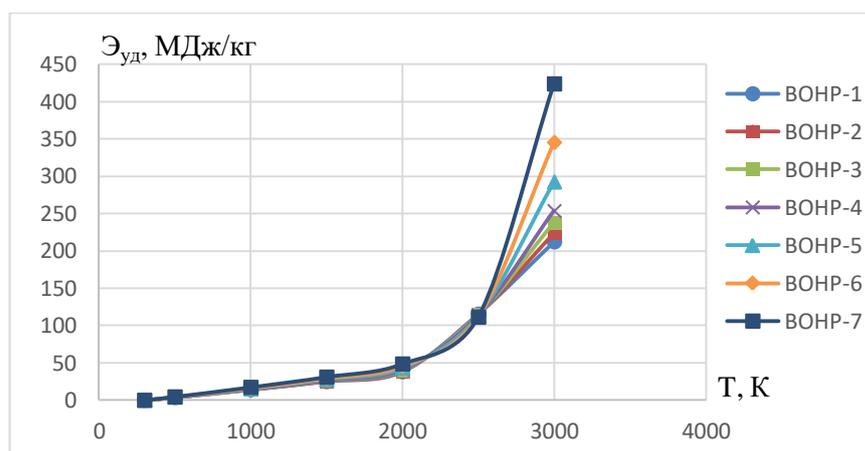
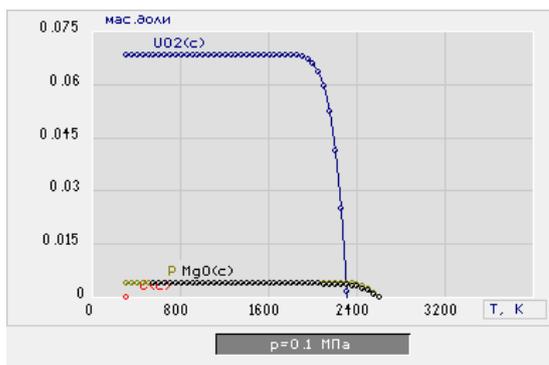


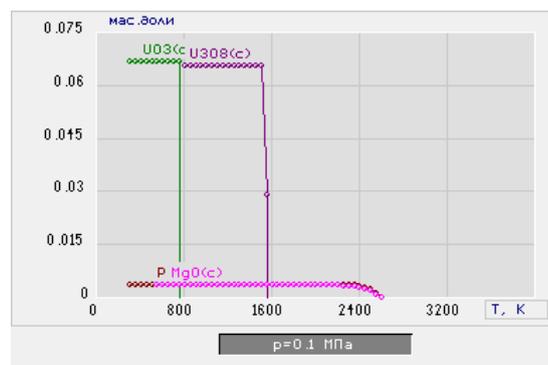
Рисунок 2.8 – Удельные энергозатраты на процесс плазмохимического синтеза ТОК-1÷7 из растворов ВОНР-1÷7 на основе ацетона ( $\alpha = 0,034$ ).

Из анализа равновесных составов продуктов плазменной переработки растворов ВОНР-1÷7 на основе ацетона (рисунок 2.1-2.7) следует, что при массовой доле воздуха 61 % основными продуктами в конденсированных фазах являются оксиды  $UO_2(c)$ ,  $PuO_2(c)$  и  $MgO(c)$ , которые образуют топливные оксидные композиции « $UO_2-PuO_2-MgO$ » заданного состава ТОК-1÷7. При этом образуется незначительное количество углерода  $C(c)$  при 300 К, содержание которого резко возрастает при снижении массовой доли воздуха менее 61 %. Увеличение доли оксида магния в составе ТОК от 5 % до 50 % приводит к увеличению  $\mathcal{E}_{уд}$  с 25,1 МДж/кг до 31,1 МДж/кг при 1500 К. Повышение массовой доли воздуха с 61 % до 64 % приводит при температурах 300÷1600 К к образованию  $U_3O_8(c)$  вместо  $UO_2(c)$  с получением композиций « $U_3O_8-PuO_2-MgO$ ».

На рисунках 2.9-2.16 представлены характерные равновесные составы продуктов плазменной переработки растворов ВОНР-8÷14 на основе ацетона и удельные энергозатраты на плазмохимический синтез ТОК-8÷14 ( $\alpha = 0,054$ )

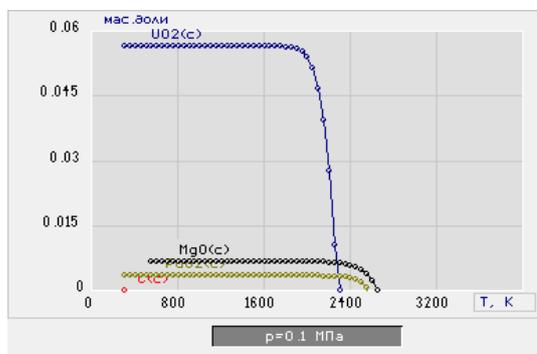


(a)

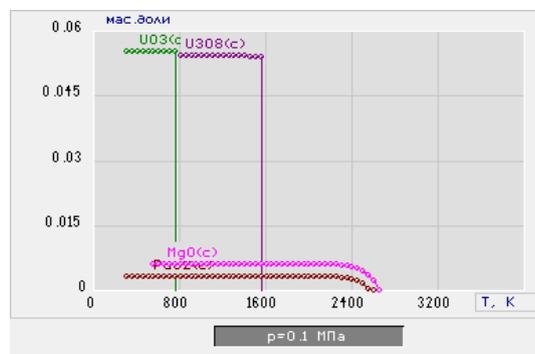


(б)

Рисунок 2.9 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-8 на основе ацетона ( $\alpha = 0,054$ ) при массовой доле воздуха 61 % (а) и 64 % (б)

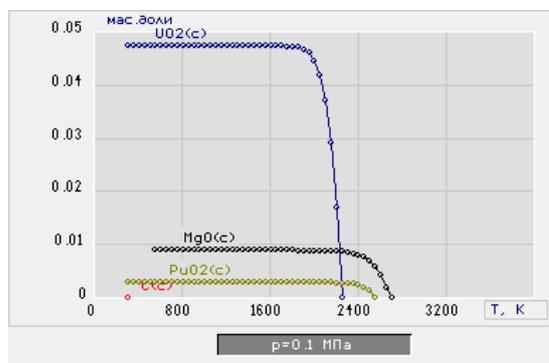


(a)

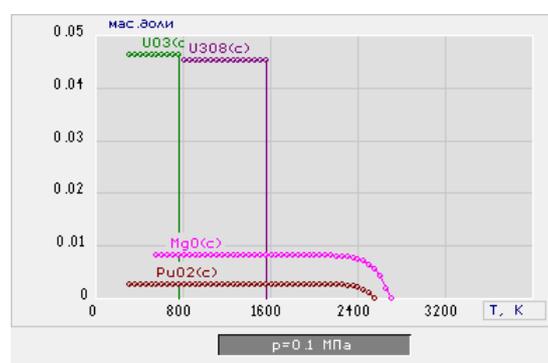


(б)

Рисунок 2.10 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-9 на основе ацетона ( $\alpha = 0,054$ ) при массовой доле воздуха 61 % (а) и 64 % (б)



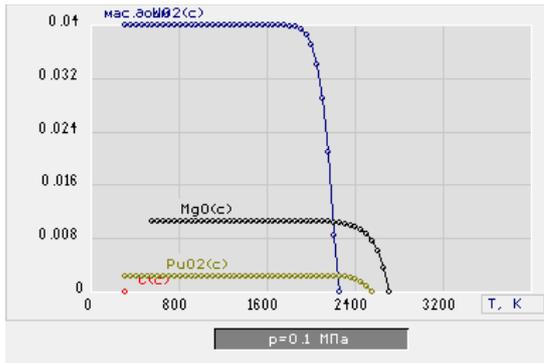
(a)



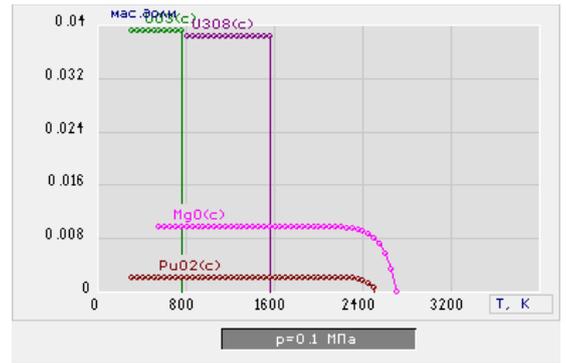
(б)

Рисунок 2.11 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-10 на основе ацетона

( $\alpha = 0,054$ ) при массовой доле воздуха 61 % (а) и 64 % (б)



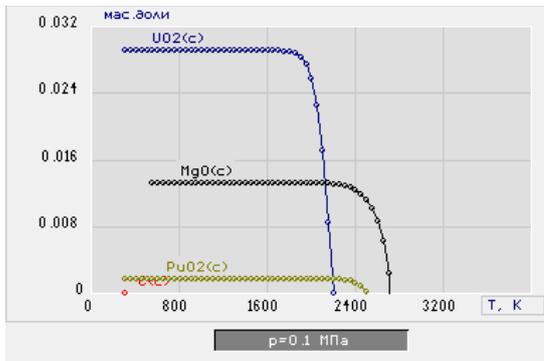
(а)



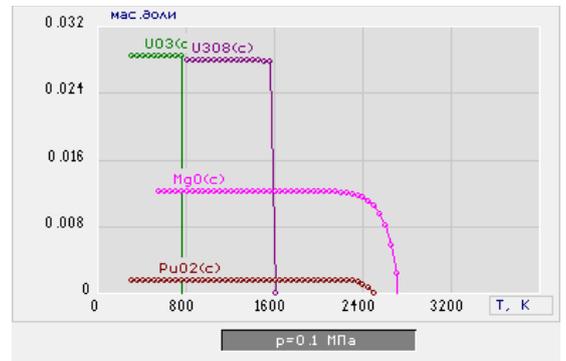
(б)

Рисунок 2.12 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-11 на основе ацетона

( $\alpha = 0,054$ ) при массовой доле воздуха 61 % (а) и 64 % (б)



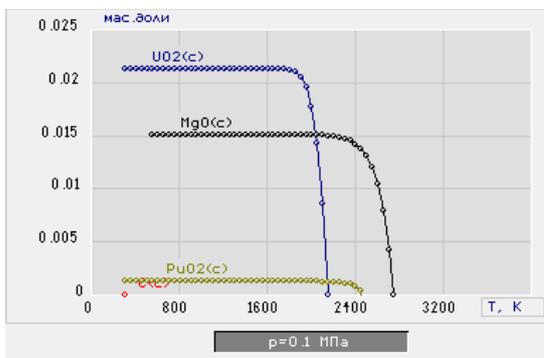
(а)



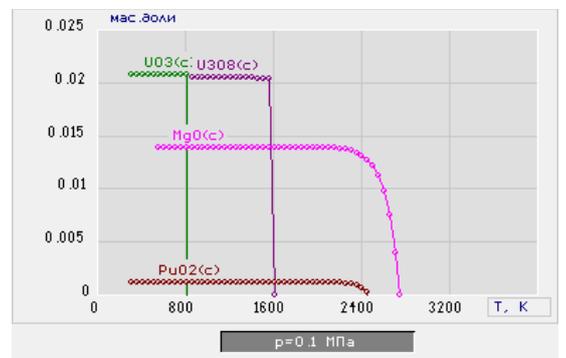
(б)

Рисунок 2.13 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-12 на основе ацетона

( $\alpha = 0,054$ ) при массовой доле воздуха 61 % (а) и 64 % (б)



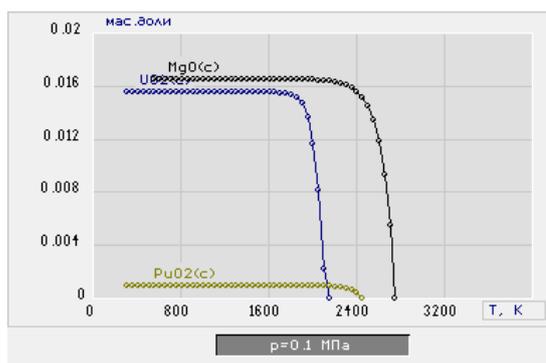
(а)



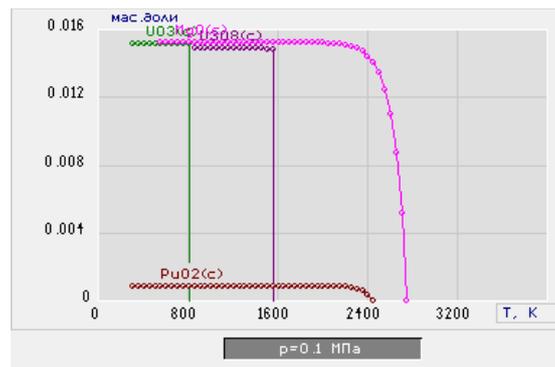
(б)

Рисунок 2.14 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-13 на основе ацетона

( $\alpha = 0,054$ ) при массовой доле воздуха 61 % (а) и 64 % (б)



(а)



(б)

Рисунок 2.15 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-14 на основе ацетона ( $\alpha = 0,054$ ) при массовой доле воздуха 61 % (а) и 64 % (б)

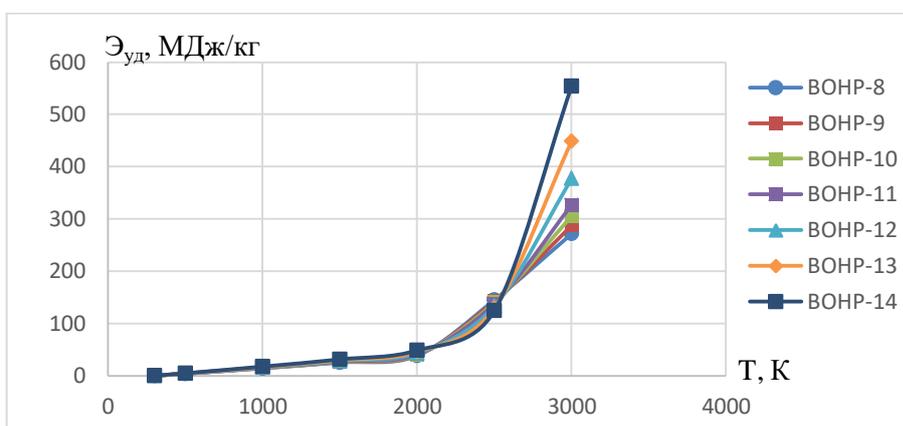
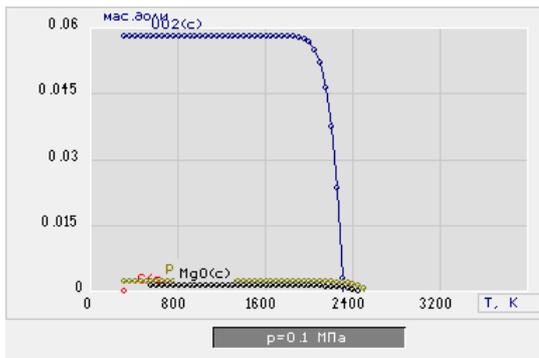


Рисунок 2.16 – Удельные энергозатраты на процесс плазмохимического синтеза ТОК-8÷14 из растворов ВОНР-8÷14 на основе ацетона ( $\alpha = 0,054$ ).

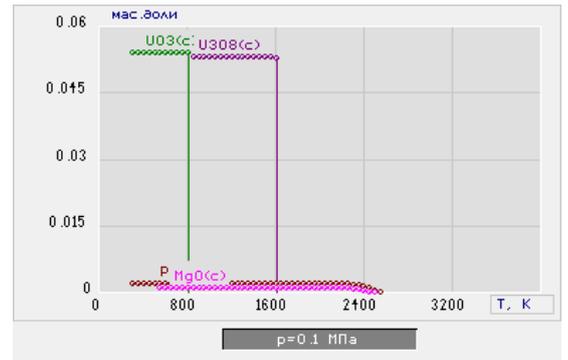
Из анализа равновесных составов продуктов плазменной переработки растворов ВОНР-8÷14 на основе ацетона (рисунок 2.9-2.15) следует, что при массовой доле воздуха 61 % основными продуктами в конденсированных фазах также являются оксиды  $UO_2(s)$ ,  $PuO_2(s)$  и  $MgO(s)$ , которые образуют топливные оксидные композиции « $UO_2-PuO_2-MgO$ » заданного состава ТОК-8÷14. При этом образуется незначительное количество углерода  $C(s)$  при 300 К, содержание которого резко возрастает при снижении массовой доли воздуха менее 61 %. Увеличение доли оксида магния в составе ТОК от 5 % до 50 % приводит к увеличению  $\mathcal{E}_{уд}$  с 25,8 МДж/кг до 31,1 МДж/кг при 1500 К. Повышение массовой доли

воздуха с 61 % до 64 % приводит при температурах 300÷1600 К к образованию  $U_3O_8(c)$  вместо  $UO_2(c)$  с получением композиций « $U_3O_8-PuO_2-MgO$ ».

На рисунках 2.17-2.19 представлены характерные равновесные составы продуктов плазменной переработки растворов ВОНР-1÷3 на основе этанола ( $\alpha = 0,034$ ).

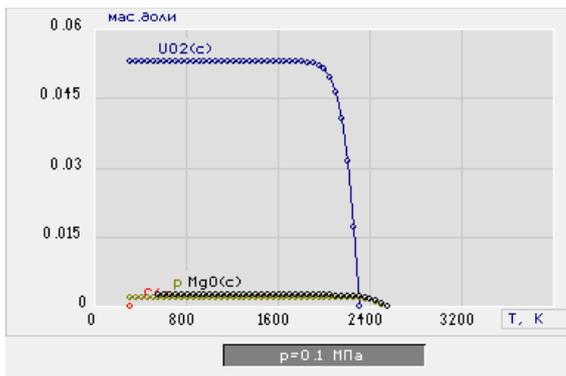


(а)

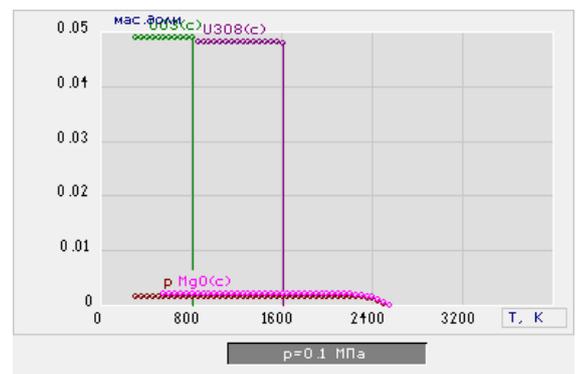


(б)

Рисунок 2.17 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-1 на основе этанола ( $\alpha = 0,034$ ) при массовой доле воздуха 68 % (а) и 72 % (б)

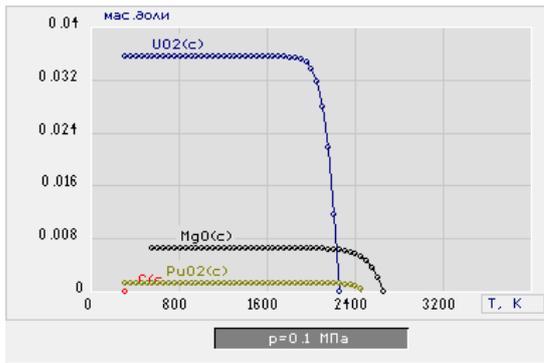


(а)

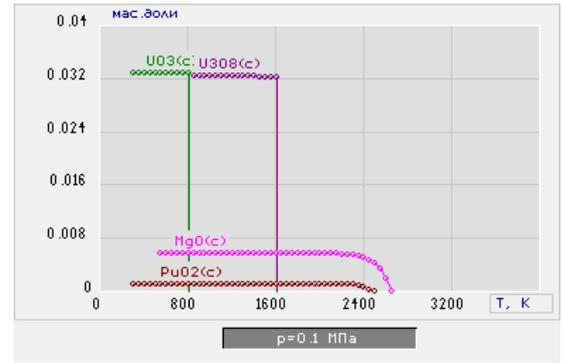


(б)

Рисунок 2.18 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-2 на основе этанола ( $\alpha = 0,034$ ) при массовой доле воздуха 68 % (а) и 72 % (б)



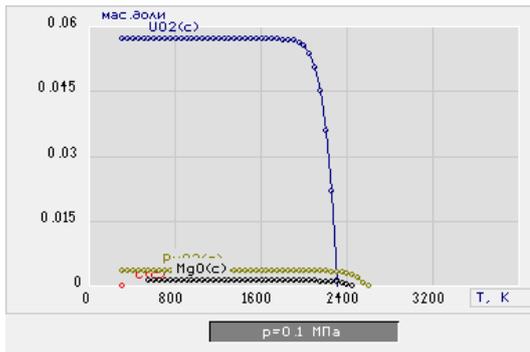
(a)



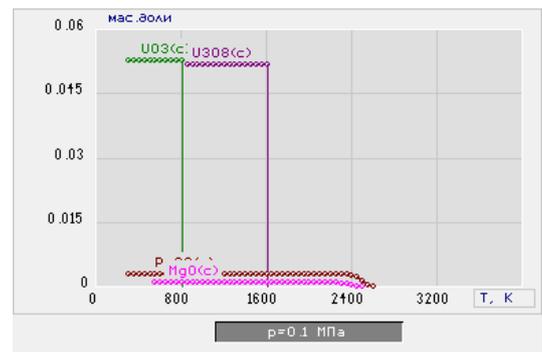
(б)

Рисунок 2.19 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-3 на основе этанола ( $\alpha = 0,034$ ) при массовой доле воздуха 68 % (а) и 72 % (б)

На рисунках 2.20-2.22 представлены характерные равновесные составы продуктов плазменной переработки растворов ВОНР-1÷3 на основе этанола ( $\alpha = 0,054$ ).

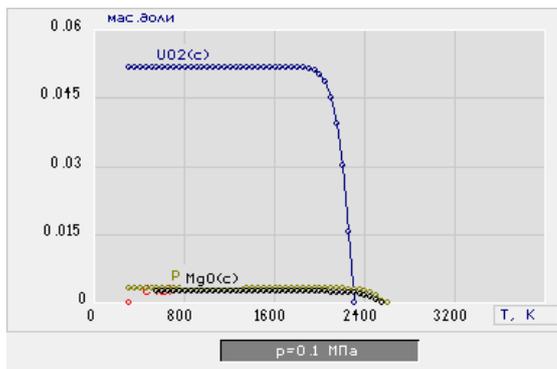


(a)

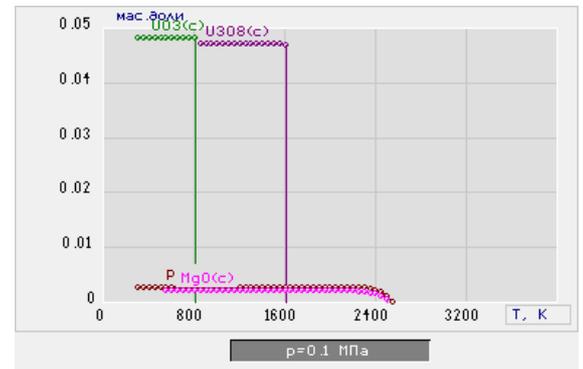


(б)

Рисунок 2.20 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-1 на основе этанола ( $\alpha = 0,054$ ) при массовой доле воздуха 68 % (а) и 72 % (б)



(a)



(б)

Рисунок 2.21 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-2 на основе этанола ( $\alpha = 0,054$ ) при массовой доле воздуха 68 % (а) и 72 % (б)

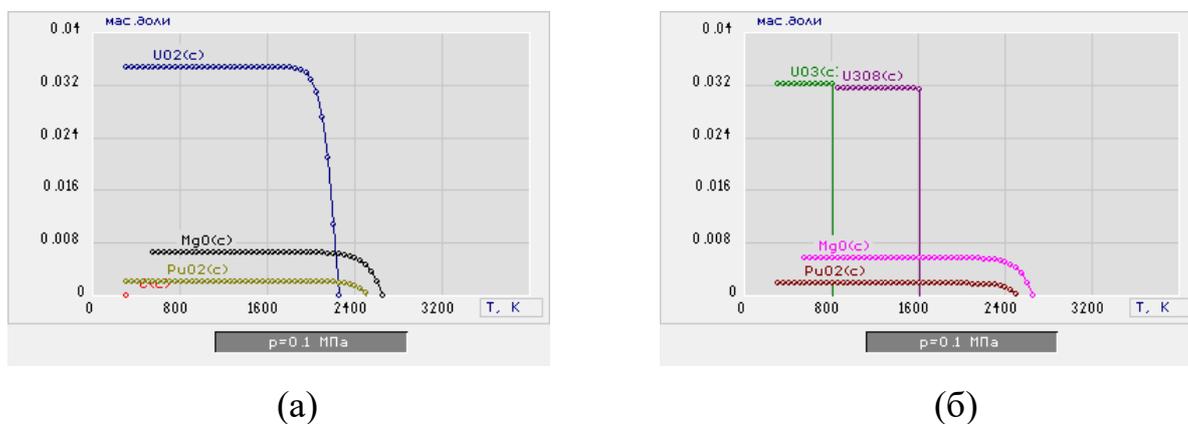


Рисунок 2.22 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-3 на основе этанола ( $\alpha = 0,054$ ) при массовой доле воздуха 68 % (а) и 72 % (б)

### 3. Экспериментальная закалка часть

#### 3.1. Описание плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона

Экспериментальные исследования проводили на лабораторном плазменном стенде (см. рис. 3.1) на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01 (рабочая частота 13,56 МГц, колебательная мощность до 60 кВт) на модельных водно-органических нитратных растворах, включающих органический компонент (ацетон), а также водные нитратные растворы металла матрицы (магния), неодима вместо делящегося металла (урана) и самария вместо делящегося металла (плутония).

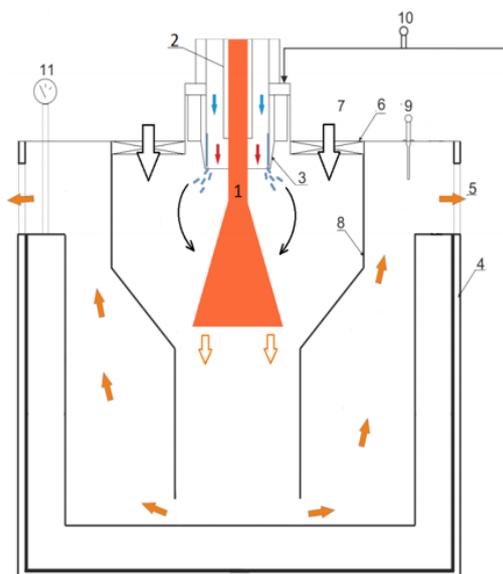


Рисунок 3.1 - Схема плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона: 1 – факел ВЧ-плазмотрона; 2 – кварцевая разрядная камера; 3 – диспергатор; 4 – корпус реактора; 5 – отходящие газы; 6 – импеллер реактора; 7 – воздух; 8 – реактор; 9, 10 – термомпара; 11 – манометр.

В ходе исследований были определены следующие оптимальные режимы совместной работы высокочастотного генератора, высокочастотного факельного плазмотрона (1) 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 м<sup>2</sup>, расход воздуха через реактор 0,95 кг/с).

Для подготовки модельных водно-органических нитратных растворов использовали соли нитрата неодима вместо нитрата уранила, нитрата самария вместо нитрата плутония и нитрата магния для образования матрицы в виде оксида магния в составе оксидной композиции «оксид неодима – оксид самария – 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 подавали с постоянным расходом 300 л/ч через диспергатор в реактор, где под действием воздушной плазменной струи, генерируемой высокочастотным факельным плазмотроном, осуществлялся «розжиг» реактора, переработка диспергированного раствора в воздушно-плазменном потоке и плазмохимический синтез оксидных композиций при температуре  $1373 \pm 50$  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. Полученные водные 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.

### **3.2. Определение расходов воздушного теплоносителя через ВЧФ-плазмотрон**

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

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

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

где  $P_n$  – полное давление, Па;

$P_{ст}$  – статическое давление, Па;

$\rho$  – плотность воздуха при температуре  $T$ , кг/м<sup>3</sup>;

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

Преобразовав формулу 3.1, выразим скорость набегающего потока  $V$ :

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

Искомое значение объёмного расхода воздуха через воздуховод вычисляется по формуле:

$$Q_{пт} = S \cdot V, \quad (3.3)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения воздуховода.

На основании этих данных построены зависимости расхода плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон ( $Q_{пт}$ ), а также воздушного теплоносителя через газоход ( $Q_{гхд}$ ) от входной площади шибера реактора. Влияние входной площади шибера реактора на массовый расход воздуха через ВЧФ-плазмотрон и газоход представлено на рисунках 3.2 и 3.3.

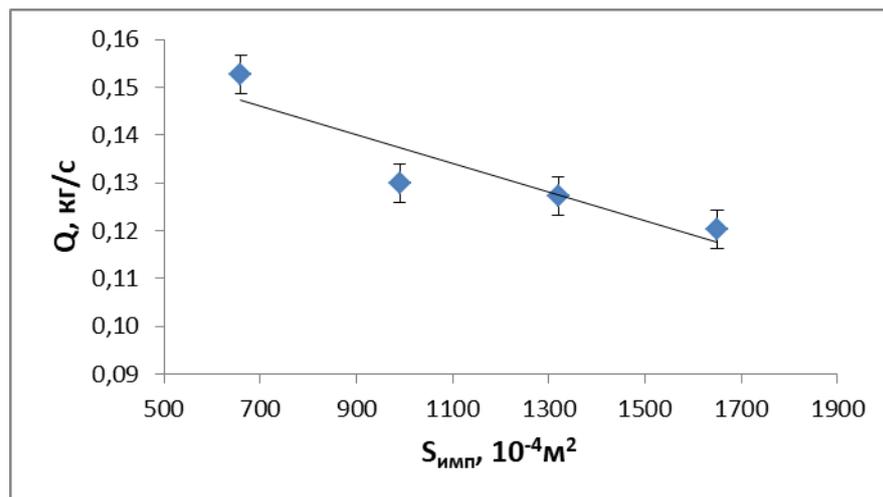


Рисунок 3.2 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздушного теплоносителя через ВЧФ-плазмотрон

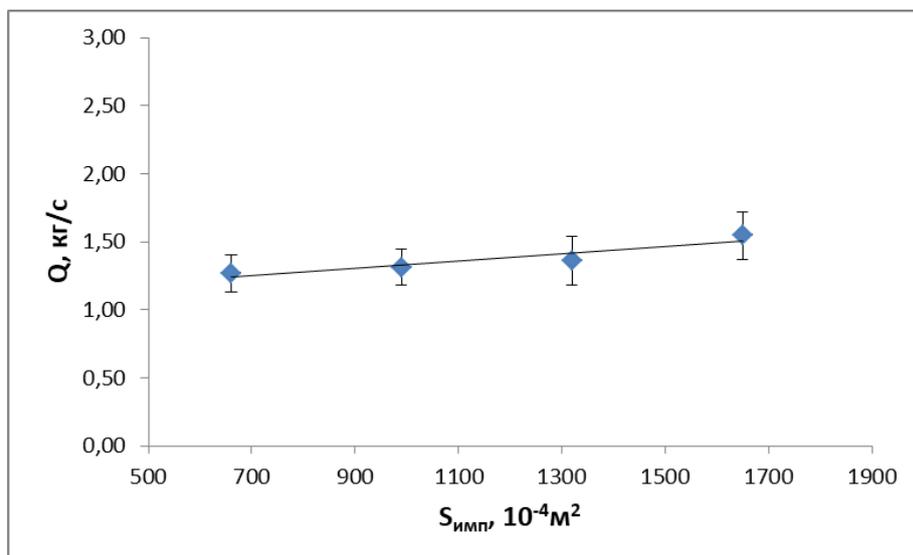


Рисунок 3.3 - Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздушного теплоносителя через газоход

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

### 3.3. Определение расходов воздушного теплоносителя через реактор

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

$$Q_p = Q_{гхд} - Q_{птр}, \quad (3.4)$$

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

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

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

В результате расчетов получены зависимости расходов воздушного теплоносителя через реактор плазменного стенда в зависимости от входной площади шибера реактора. Полученные зависимости представлены на рисунке 3.4.

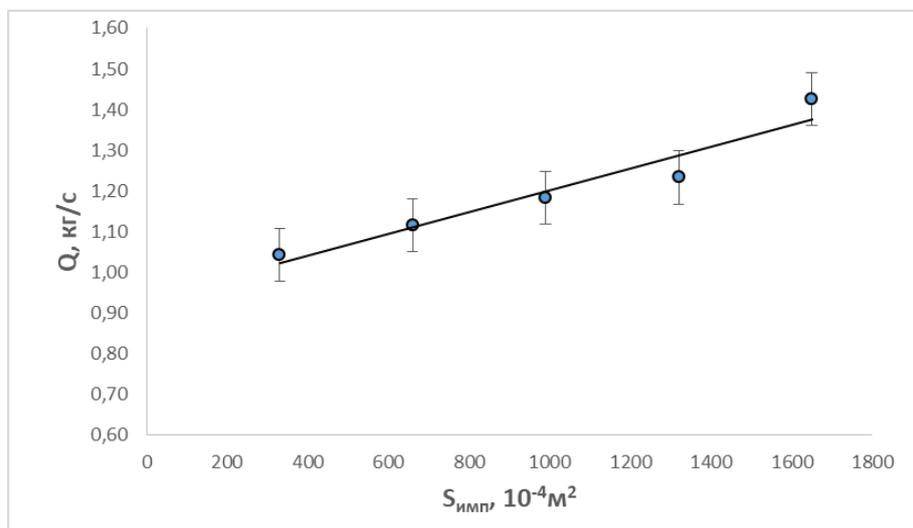


Рисунок 3.4 - Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздушного теплоносителя через реактор

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

### 3.4. Плазмохимическая переработка растворов ВОНР

Вначале готовился с использованием дистиллированной воды (1 л) водный нитратный раствор (ВНР) из нитратных солей металлов и смешивался с органическим компонентом (3 л) с получением раствора ВОНР. Предварительно подготовленные растворы ВОНР подавались с постоянным расходом (300 л/ч) на диспергатор 3 и далее в диспергированном виде поступали в реактор, где в процессе переработки в воздушно-плазменном потоке осуществлялся плазмохимический синтез простых и сложных ОК при температуре  $T_p \geq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Контроль температуры  $T_p$  осуществлялся высокоточным цифровым инфракрасным пирометром (IRE 140/45) по линии поглощения диоксида углерода. После реактора пыле-парогазовая смесь поступала на центробежно-барботажные аппараты узла «мокрой» очистки отходящих газов 5, где происходило ее резкое охлаждение (закалка) оборотной технологической водой (ОТВ) с получением водных суспензий из полученных ОК. Очищенные отходящие

газы забирались высоконапорным вытяжным вентилятором и выбрасывались в атмосферу. Полученные водные суспензии ОК помещали в емкости из нержавеющей стали, отбирали пробы для определения гранулометрического состава суспензий методом лазерной дифракции (ЛД). Затем водные суспензии ОК отстаивали, полученные осадки отделяли, фильтровали и прокаливали в течение 20 минут при температуре 120-150 °С.

### **3.5. Анализ полученных результатов**

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

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

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

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

На рисунке 3.5 представлена характерная гистограмма распределения по размерам частиц водной суспензии ОК (метод ЛД), полученной при переработке раствора ВОНР.

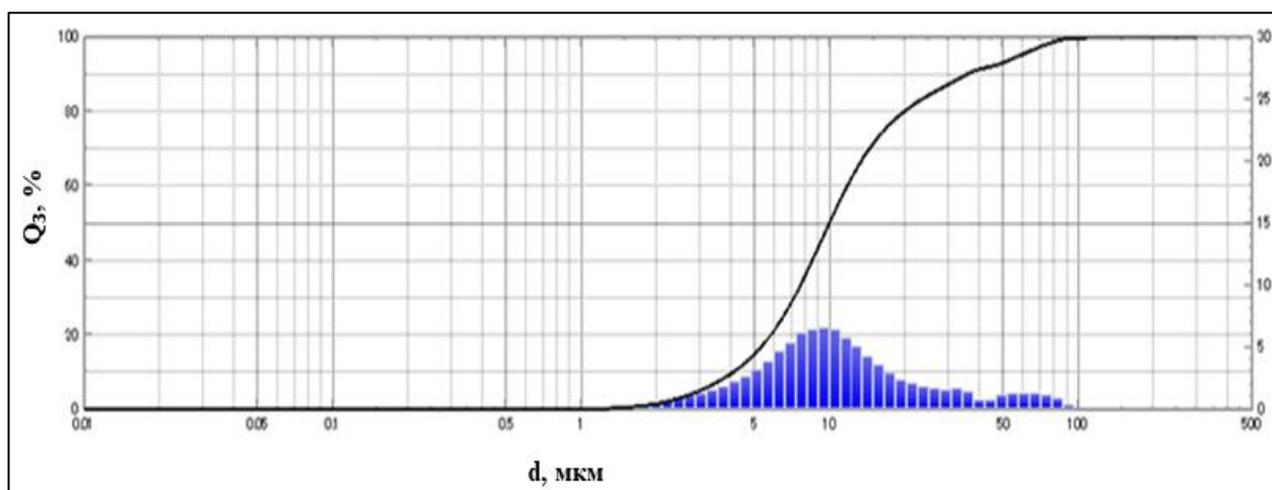


Рисунок 3.5 - Характерная гистограмма распределения по размерам частиц (агломератов) порошка ОК

Частицы водной суспензии ОК характеризуются достаточно широким распределением по размерам, близким к мономодальному. Характерные величины медианных значений распределения частиц лежат в диапазоне от 2 до 90 мкм. Среднее значение размера частиц  $D_{50}$  составляет 9,9 мкм.

Анализ рентгенограмм образца порошка ОК после РФА показывает, что полученные в процессе плазменной переработки раствора ВОНР порошки включают целевые оксиды ниодима (вместо урана), самария (вместо плутония) и магния, что подтверждает результаты термодинамического моделирования этого процесса.

Характерное СЭМ-изображение синтезированного порошка ОК представлено на рисунке 3.6.

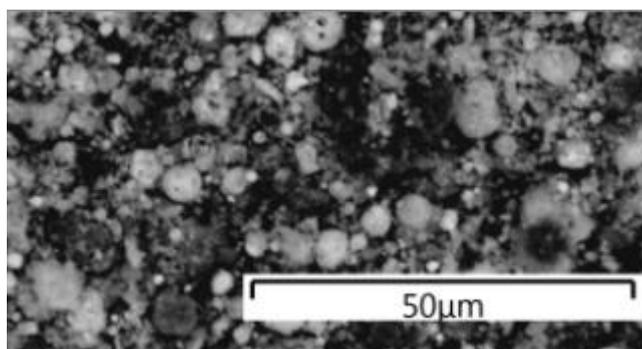


Рисунок 3.6 - Характерное СЭМ-изображение морфологической структуры частиц порошка ОК

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

Величина удельной поверхности (метод БЭТ) составила  $11,1 \text{ м}^2/\text{г}$ . Полученное значение удельной поверхности пересчитывалось в размер кристаллитов, исходя из предположения об их сферической геометрии. Таким образом, размер кристаллитов, определенный по БЭТ, составляет 86 нм.

Свойства прессуемости, найденные по результатам прессования порошка ОК, имеют характерные для большинства оксидных материалов значения: порошок принадлежит к 4 группе сложности прессования.

Таким образом, производство из этого порошка керамических таблеток возможно при использовании серийно выпускаемого оборудования и пресс-форм из углеродистой инструментальной стали.

Прессование порошка ОК проводилось в стальной цилиндрической пресс-форме диаметром 10 мм под давлением 400 МПа с последующим спеканием полученных прессовок при температуре  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Характерная микрофотография спеченной керамики из порошка ОК приведена на рисунке 3.7.

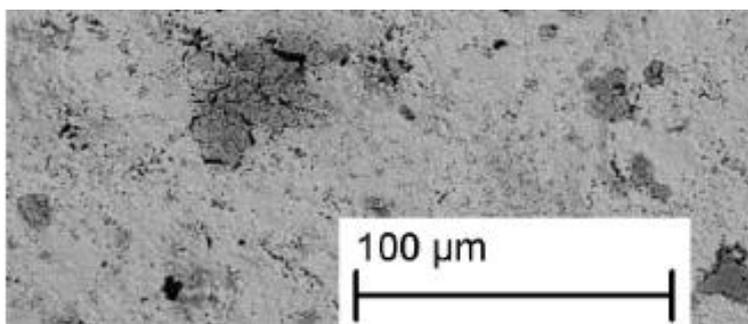


Рисунок 3.7 – Характерная микрофотография спеченной керамики из порошка ОК

На рисунках 3.8-3.10 показано влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц ОК в водных суспензиях (метод ЛД), удельной поверхности и размера кристаллитов в составе полученных порошков ОК (БЭТ-анализ).

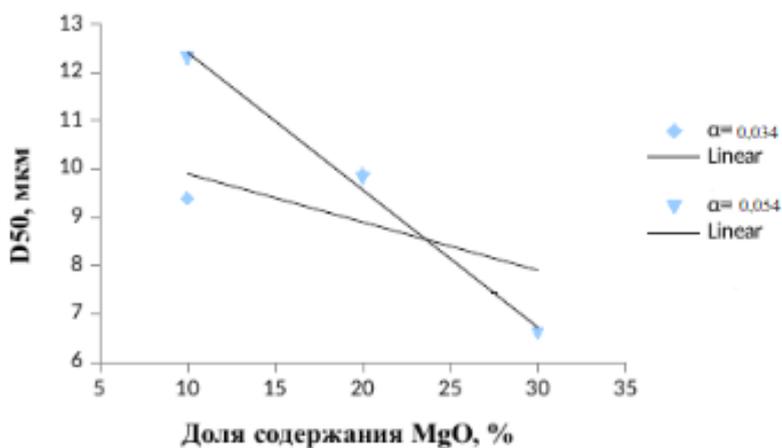


Рисунок 3.8 – Влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц в полученных водных суспензиях ОК (метод ЛД) при  $\alpha=0,034$  и  $0,054$

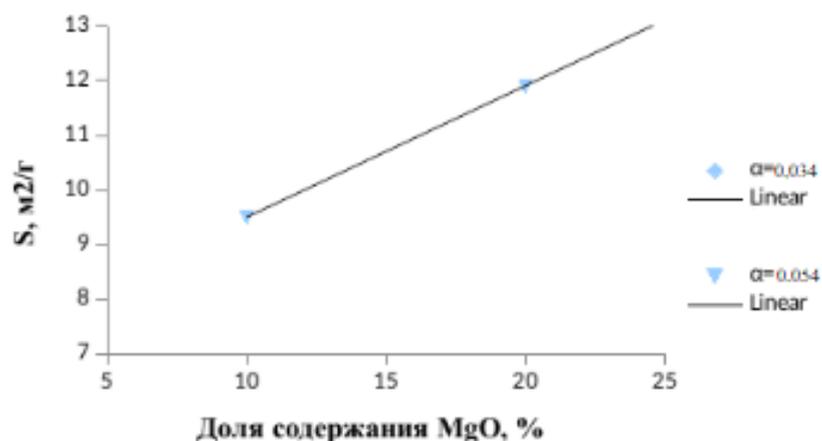


Рисунок 3.9 - Влияние содержания матрицы (MgO) на удельную поверхность и размеркристаллитов в составе порошков ОК (БЭТ-анализ) при  $\alpha=0,034$  и  $0,054$

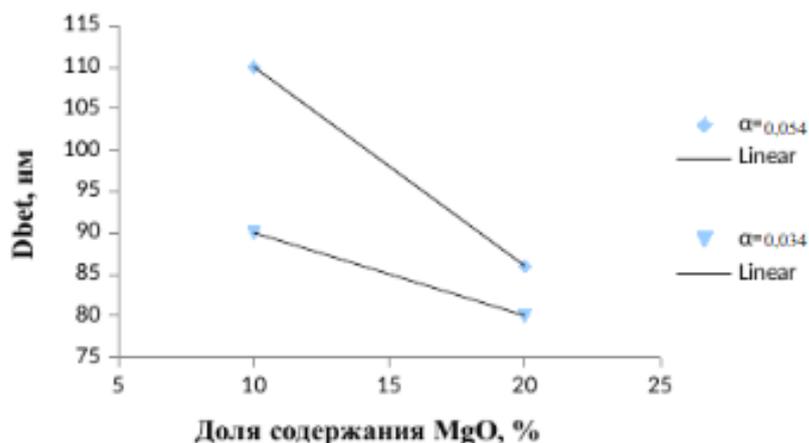


Рисунок 3.10 - Влияние содержания матрицы (MgO) на размер кристаллитов в составе полученных порошков ОК (БЭТ-анализ) при  $\alpha=0,034$  и  $0,054$

Из анализа результатов, представленных на рисунках и таблице Г1, (приложение Г) следует:

- увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК «Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO» (при  $\alpha=0,1$ ), приводит при постоянном расходе воды на закалку ОК (2,8 кг/с) и частоте диспергатора (50 Гц) к снижению размера ОК после УМО с 9,4 мкм до 7,4 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК увеличивается с 7,9 м<sup>2</sup>/г до 11,2 м<sup>2</sup>/г, а

размер кристаллитов в частицах ОК снижается с 110 нм до 86 нм (БЭТ-анализ).

- увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК (при  $\alpha=0,2$ ), приводит при частоте диспергатора 50 Гц к снижению размера ОК после УМО с 12,3 мкм до 6,6 мкм (метод ЛД).

- увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК (при  $\alpha=0,3$ ), также приводит при частоте диспергатора 50 Гц к образованию ОК после УМО от 7,4 до 7,5 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК увеличивается с 9,5 м<sup>2</sup>/г до 11,9 м<sup>2</sup>/г, а размер кристаллитов в частицах ОК уменьшается с 90 нм до 80 нм (БЭТ-анализ).

Из сравнительного анализа данных по физико-химическим свойствам (рисунки 3.8-3.10, таблица Г1) полученных наноразмерных порошков ОК (при  $\alpha=0,034$ ) и ОК (при  $\alpha=0,054$ ).

Таким образом, в результате проведенных исследований установлены закономерности влияния состава растворов ВОНР, частоты диспергатора, расхода охлаждающей воды для «закалки» на процесс плазменной переработки диспергированных растворов ВОНР и определены режимы, обеспечивающие в воздушно-плазменном потоке плазмохимический синтез наноразмерных сложных ОК с высокими физико-химическими и технологическими свойствами.

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

##### **4.1.1 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 пятибалльной 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	
		$B_\phi$	$B_k$	$K_\phi$	$K_k$
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  $K_\phi(4,6) > K_k(3,7)$ .

## 4.2 SWOT-анализ

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

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

Таблица 4.2 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-	Слабые стороны научно-
--	-------------------------	------------------------

	<p><b>исследовательского проекта:</b></p> <p><b>С1.</b> Одностадийность получения ДЯТ;</p> <p><b>С2.</b> Невысокая стоимость переработки сырья.</p> <p><b>С3.</b> Гомогенное распределение фаз в продукте с заданным стехиометрическим составом.</p> <p><b>С4.</b> Возможность активно влиять на морфологию частиц.</p> <p><b>С5.</b> Наличие необходимого оборудования для проведения испытаний предлагаемой технологии.</p> <p><b>С6.</b> Компактность необходимого оборудования.</p> <p><b>С7.</b> Маленький срок получения результатов при проведении научного исследования.</p>	<p><b>исследовательского проекта:</b></p> <p><b>Сл1.</b> Отсутствие прототипа научной разработки.</p> <p><b>Сл2.</b> Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных специалистов.</p> <p><b>Сл3.</b> Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ.</p> <p><b>Сл4.</b> Работа с модельными композициями.</p> <p><b>Сл5.</b> Большое количество возможных вариантов композиций.</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p><b>В1.</b> Увеличение отходов ядерного производства.</p> <p><b>В2.</b> Уменьшение количества урана-235.</p> <p><b>В3.</b> Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p><b>В4.</b> Повышение стоимости конкурентных разработок.</p> <p><b>В5.</b> Использование научно-исследовательских достижений ТПУ.</p>	<p><b>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»:</b></p> <p>1. ДЯТ, полученное плазмохимическим синтезом, совершеннее используемого сейчас ЯТ.</p> <p>2. Россия обладает сравнительно небольшими запасами урана-235, поэтому в недалеком будущем необходимо будет менять/усовершенствовать использующуюся технологию производства ЯТ.</p> <p>3. В случае успеха удастся переработать часть захороненного топлива.</p> <p>4. При благоприятном раскладе станет возможным строительство ядерных энергоустановок четвертого поколения.</p>	<p><b>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»:</b></p> <p>1. Повышение спроса на данную продукцию обеспечит приток кадров.</p> <p>2. Использование научно-исследовательского потенциала ТПУ позволит подобрать необходимую композицию.</p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <p><b>У1.</b> Развитая конкуренция технологии производства.</p> <p><b>У2.</b> Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p><b>У3.</b> Неудача эксперимента.</p> <p><b>У4.</b> Несвоевременное финансовое обеспечение.</p>	<p><b>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»:</b></p> <p>1. Качественные преимущества нового ДЯТ создают хорошую конкуренцию используемым методам производства ЯТ.</p>	<p><b>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»:</b></p> <p>1. Отсутствие данной, новой в своем роде, разработки может обернуться провалом без должного финансирования.</p>

	<p>2. Такие факты, как нехватка урана-235 и необходимость сокращения отходов прошлых лет, обеспечат спрос на новые технологии производства ЯТ.</p> <p>3. Наличие оборудования, необходимого сырья, множества различных композиций обещают продолжение эксперимента в случае неудачи с отдельной композицией или в случае прекращения финансирования.</p>	
--	--	--

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.

### 4.3 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 4.3.

Таблица 4.3 –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 растворов 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 4.4.



диссертации																			
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.

#### 4.4 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.

#### 4.4.1 Расчет материальных затрат

Все работы для ВКР проводились на плазматроне и на компьютере. В качестве материальных затрат представлены затраты на этанол, ацетон и нитрат магния  $Mg(NO_3)_2$ . Материальные затраты, необходимые для данной разработки, занесены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Материальные затраты

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Этанол	60	2,5 л.	150
Ацетон	244	2,5 л.	610
Нитрат магния $Mg(NO_3)_2$	1040	2,5 кг.	2600
Итого:	3360 руб.		

Таким образом общая сумма материальных затрат для данной разработки составила 3360 рублей.

#### 4.4.2 Расчет амортизации оборудования для экспериментальных работ

Расчёт амортизации производится на находящееся в использовании оборудование.

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

Таблица 4.7 – 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
<b>Итого:</b>	1045000 руб.				

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации рассчитывается по формуле 4.3:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.2)$$

где  $n$  – срок полезного использования, лет.

Амортизация рассчитывается по формуле 4.4:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m, \quad (4.3)$$

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.

#### **4.4.3 Затраты на оплату труда исполнителей научно-технического исследования**

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

$$C_{ЗП} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.4)$$

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

$$Z_{доп} = K_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (4.5)$$

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

$K_{доп}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;

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

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по формуле:

$$Z_{осн} = T_{раб} \cdot Z_{дн}, \quad (4.6)$$

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 4.7:

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{T_\phi}, \quad (4.7)$$

где  $Z_M$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

$T_{\partial}$  - действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн. (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – 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.

Для расчёта месячного должностного оклада работника применяется формула:

$$Z_M = Z_{ок} \cdot k_3, \quad (4.8)$$

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

$k_3$  – районный коэффициент, равный 1,3.

Руководителем данной научно-исследовательской работы является доцент ИЯТШ Томского политехнического университета с окладом 37700 рублей. Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{ок}$ , руб.	$Z_M$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_{раб}$ , дн	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	37700	49010	2343	8	18744
Исполнитель	13890	18057	863	63	54369
Итого $Z_{осн}$					73113 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 4.10.

Таблица 4.10 – Заработная плата исполнителей исследовательской работы

Заработная плата	Руководитель	Исполнитель
Основная зарплата	18744	54369
Дополнительная зарплата, руб.	2812	8155
Зарплата исполнителя, руб.	21556	62524
Итого по статье С <sub>зп</sub> , руб.	84080 руб.	

Таким образом в разделе рассчитаны затраты на оплату труда исполнителей научно-технического исследования. Заработная плата руководителя – 21556 руб, а исполнителя – 62524 рублей. Суммарная заработная плата исполнителей составила 84080 рублей.

#### 4.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (4.9)$$

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:

$$Z_{внеб} = 0,302 \cdot 21556 = 6510 \text{ руб.}$$

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

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

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 6510 руб., а для исполнителя 18882 рубля.

#### 4.4.5 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.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (\text{сумма статей 1-6}), \quad (4.10)$$

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

Накладные расходы составят:

$$Z_{\text{накл}} = (25105 + 3360 + 204950 + 84080) \cdot 0,16 = 50799 \text{ руб.}$$

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

Таблица 4.11 – 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.	3360 руб.	73113 руб.	10967 руб.	25105 руб.	317495 руб.	50799 руб.	368294 руб.

В итоге бюджетная стоимость научного исследования составила 368294 рублей. В эту стоимость входят: амортизация, стоимость сырья, материалов, основная заработная плата, дополнительная заработная плата, отчисления на

социальные нужды и накладные расходы, которые составили 50799 рублей при коэффициенте накладных расходов 0,16.

#### 4.5 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;

$b_i^a, b_i^b$  – балльная 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  $\Phi_i$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

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

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

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

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

$$I_{финр}^p = \frac{I_p}{I_\phi^p} = \frac{4,25}{0,89} = 4,77;$$

$$I_{финр}^a = \frac{I_a}{I_\phi^a} = \frac{3,65}{0,9} = 4.$$

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.

В результате выполнения данного раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации устройства, как наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с 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. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 368294 руб.;

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

## **5 Социальная ответственность**

В работе проводится изучение процесса синтеза в воздушной плазме оксидных композиций для ядерного топлива уран-плутониевого цикла. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании ресурсоэффективной плазменной технологии для создания матриц, для дисперсионного ядерного топлива, которое может использоваться в реакторах на тепловых нейтронах.

Эксперименты проводились в лаборатории № 001А 10 корпуса Томского политехнического университета, при этом использовался плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ 8-60/13-01.

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 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

### **5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства**

Основные положения по охране труда изложены в Трудовом кодексе Российской Федерации [20]. В этом документе указано, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются одной из главных забот государства.

Согласно [20] каждый работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда

на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;

– внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;

– гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

В трудовом кодексе Российской Федерации говорится, что нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, работодатель обязан вести учет времени, отработанного каждым работником [19].

### **5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя**

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 изображено на рисунке 5.1.

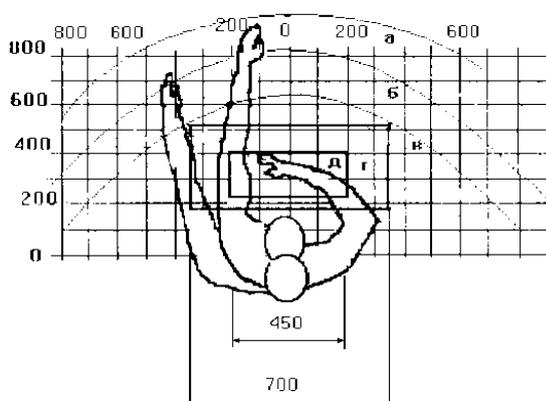


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а - зона максимальной досягаемости рук; б - зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в - зона легкой досягаемости ладони; г - оптимальное пространство для

грубой ручной работы; д - оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура - в зоне г, д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);
- литература и документация, необходимая при работе находится в зоне легкой досягаемости ладони - в (слева);
- в выдвижных ящиках стола - литература, не используемая постоянно [15].

При выборе рабочего места, а именно письменного стола должны быть учтены следующие требования, которые представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Требования к оснащению рабочего места, предусматривающего длительную работу за ПК

Ширина рабочего стола	От 80 до 140 см
Высота рабочего стола	75 см
Глубина рабочего стола	От 60 до 80 см
Расстояние от глаз до монитора	От 50 до 60 см
Расстояние клавиатуры от края стола	От 10 до 30 см
Сидение	Должно позволять регулировку по высоте, повороту и углу наклона спинки (регулировки должны быть независимыми друг от друга)
Пространство для ног	Ширина от 30 см, глубина – от 40 см, с углом наклона до 20 градусов

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 [15].

Также должна предусматриваться возможность регулировки экрана монитора:

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

В случае если работа оператора предполагает однообразную умственную работу, которая требует значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, то лучше всего выбирать неяркие, малоконтрастные цветовые оттенки (слабонасыщенные оттенки холодного голубого или зеленого цветов), которые не ослабляют внимание. Если работа требует большой умственной и физической напряженности, тогда следует использовать более теплые оттенки, которые способствуют повышению концентрации внимания [15].

В лаборатории № 001А 10 корпуса ТПУ полностью выполняются установленные нормы [15].

## **5.2 Производственная безопасность**

### **5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов**

Для проведения экспериментов в работе используется плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ 8-60/13-01.

Производственные условия на месте выполнения работы характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые по природе возникновения делятся на следующие группы:

- физические;
- химические;
- психофизиологические;
- биологические [16].

Опасные и вредные факторы, которые могут воздействовать на персонал при проведении эксперимента и работе на ПЭВМ, приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Опасные и вредные факторы в лаборатории № 001А 10 корпуса ТПУ

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 [10].
Работа на плазменной установке.	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.).	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность [11], СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона [12].
		Пожарная опасность	ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность [13].
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» [14], ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность [11].

К психологически вредным факторам, воздействующим на персонал, можно отнести:

- нервно-эмоциональные перегрузки;
- умственное напряжение;
- физические перегрузки.

Биологические и химические вредные производственные факторы в лаборатории № 001А–10 корпуса ТПУ отсутствуют.

### **5.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов**

#### **5.3.1 Отклонение показателей микроклимата**

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с нормами и приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Теплый	22-24	40	0,1

Отклонение показателей микроклимата от нормы не вызывает повреждений или нарушений состояния здоровья, но может приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности [16].

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию.

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 [16]. В используемой лаборатории установлен высоконапорный вытяжной вентилятор марки ВР-12-26-4 производительностью  $Q = 2400 - 4400 \text{ м}^3/\text{час}$ . Объем лаборатории №001А 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 (ВО) в лаборатории:

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

Таким образом, установлено, что микроклимат в используемой лаборатории №001А–10 учебного корпуса ТПУ соответствует оптимальным условиям работы [16].

### 5.3.2 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Электромагнитное излучение - распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля. ВЧФ-плазматрон питается от генератора высокочастотного тока, и является источником ВЧ-излучения. 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 [12].

Экран и системные блоки ЭВМ также 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 таблице 5.4.

Повышенный уровень электромагнитного излучения может негативно влиять на организм человека, а именно приводить к нервным расстройствам, нарушению сна, значительному ухудшению зрительной активности, ослаблению иммунной системы, расстройствам сердечно-сосудистой системы [12].

Таблица 5.4 – 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	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл

потока	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 [12].

Таким образом установлено, что в лаборатории №001А–10 учебного корпуса ТПУ уровень электромагнитного излучения соответствует санитарным нормам [12].

### **5.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны**

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

По нормативам освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк [16].

Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50 до 90° с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м, защитный угол светильников должен быть не менее 40°. Коэффициент запаса (Кз) для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5 %.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться:

- системой общего равномерного освещения.
- В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы:

- комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники;
- местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов) [16].

Площадь помещения:

$$S = a \cdot b, \quad (5.3)$$

где  $A$  – длина, м;  $B$  – ширина, м.

$$S = 6 \cdot 6 = 36 \text{ м}^2,$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор  $\rho_c = 50 \%$ , свежепобеленного потолка  $\rho_{II} = 70 \%$ . Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен  $K_3 = 1,5$ . Коэффициент неравномерности для светодиодных лент  $Z = 1,1$ .

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

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  $\lambda$ , которая для светодиодных светильников с защитным рассеивателем лежит в диапазоне 1,1 – 1,3. Принимаем  $\lambda = 1,1$ , расстояние светильников от перекрытия (свес)  $h_c = 0,5 \text{ м}$ .

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

$$\Phi_n = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{N \cdot \eta} \quad (5.6)$$

находим число светодиодных лент  $N$

$$N = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{\Phi_n \cdot \eta}. \quad (5.7)$$

$\eta$  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 светодиодных лент попадает на рабочую поверхность, для светильников типа Dioga со светодиодными лентами при  $\rho_{\text{п}} = 70 \%$ ,  $\rho_c = 50 \%$  и индексе помещения  $i = 1,5$  равен  $\eta = 0,5$ .

Тогда

$$N = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{\Phi_n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 36 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{2900 \cdot 0,2} = 11,81 \text{ лент;}$$

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

Потребный световой поток светодиодных ламп:

$$\Phi_n = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 36 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,52} = 2856 \text{ Лм.}$$

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 в лаборатории № 001А 10 учебного корпуса ТПУ.

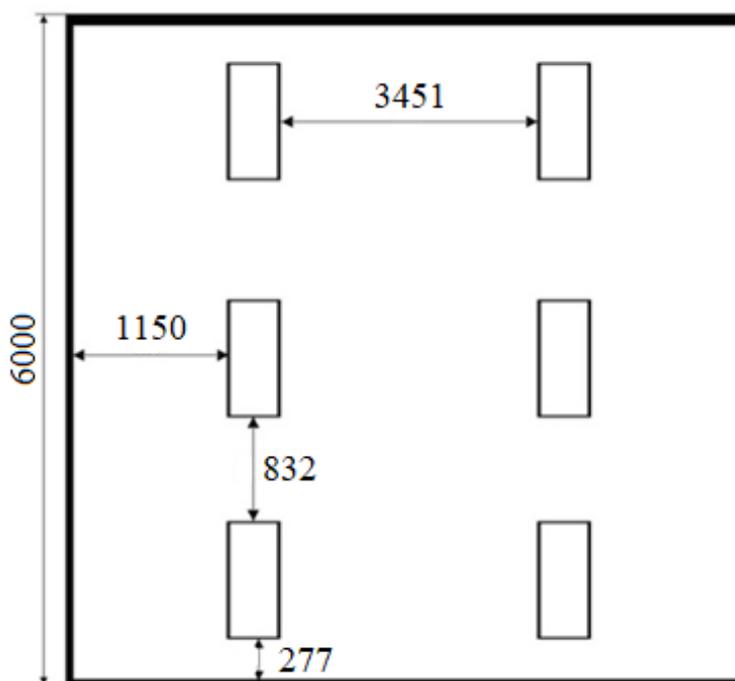


Рисунок 5.2 – План лаборатории №001А и размещения светильников со светодиодными лентами

Делаем проверку выполнения условия:

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

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

Таким образом, мы получили, что необходимый световой поток не выходит за пределы требуемого диапазона. Мощность осветительной установки получилась:

$$P = 12 \cdot 9 = 108 \text{ Вт}.$$

### 5.3.4 Превышение уровня шума

Шум, являясь общебиологическим раздражителем, оказывает влияние не только на слуховой анализатор, но действует на структуры головного мозга, вызывая сдвиги в различных функциональных системах организма. Среди

многочисленных проявлений неблагоприятного воздействия шума на организм человека выделяются: снижение разборчивости речи, неприятные ощущения, развитие утомления и снижение производительности труда, появление шумовой патологии. В нашем случае источником шума является откачивающий компрессор. Уровень шума компрессора менее 55 дБ, что соответствует санитарным нормам [14].

В таблице 5.5 приведены нормы уровня шума при различных видах работ.

Таблица 5.5 – Нормативы уровня шума при различных видах работ

	Максимально допустимый уровень шума (дБ), в полосах следующих октав (Гц)									Эквивалентные уровни шума, дБА
	80	71	63	56	50	45	40	36	32	
Научная работа, расчеты, конструирование	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50
Офисы, лаборатории	93	79	70	68	58	55	52	52	49	55

В лаборатории №001А 10 учебного корпуса ТПУ уровень шума соответствует санитарным нормам [14].

### 5.3.5 Психофизиологические факторы

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

Трудовая деятельность работников непромышленной 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 функциональных на активность центральной нервной системы, приводит к расстройствам в ее деятельности, развития утомления, переутомления, стрессу.

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 [16].

### **5.3.6 Поражение электрическим током**

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 соединению с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой [11].

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 [11].

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 [16].

Электрический ток оказывает на человека термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие [11].

Термическое воздействие тока проявляется в ожогах, нагреве кровеносных сосудов и других органов, в результате чего в них возникают функциональные расстройства [11].

Электролитическое действие тока характеризуется разложением крови и других органических жидкостей, что вызывает нарушения их физико-химического состава [11].

Механическое действие тока проявляется в повреждениях (разрыве, расслоении и др.) различных тканей организма в результате электродинамического эффекта [11].

Биологическое действие тока на живую ткань выражается в опасном возбуждении клеток и тканей организма, сопровождающемся произвольными судорожными сокращениями мышц. В результате такого возбуждения может возникнуть нарушение и даже полное прекращение деятельности органов дыхания и кровообращения [16].

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются [11]:

- 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.

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

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 [16].

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

При выполнении данной ВКР в лаборатории №001А 10 корпуса ТПУ 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.

#### **5.4 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 [16].

Мероприятия, позволяющие сохранять экологическую безопасность находясь на рабочем месте [16]:

- 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 [16].

Из этого можно сделать простой 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.

### **5.5 Химическая безопасность**

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

В таблице 5.6 приведены предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ и их класс опасности [17].

Классы опасности:

- 1 – вещества чрезвычайной опасности;
- 2 – вещества высоко опасные;
- 3 – вещества умеренно опасные;
- 4 – вещества мало опасные [17].

Таблица 5.6 – ПДК вредных веществ и их класс опасности

№	Вещество	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности
1	Оксид магния	3,0	3
2	Ацетон	0,2	4
3	Этанол	2,0	4

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

При работе использовались следующие средства индивидуальной защиты: резиновые перчатки, лабораторный халат, респиратор «лепесток» [18].

### 5.6 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 [4]. Так как помещение лаборатории по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины возгорания [13]:

- 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 этанолом должны проводиться с использованием приточно-вытяжной вентиляции вдали от огня и источников искрообразования.

При отборе проб, проведении анализа и обращении в процессе транспортных и производственных операций с этанолом применяются индивидуальные средства защиты по нормам выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств защиты, утвержденным в установленном порядке.

Для тушения горящего этанола 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 [13].

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные [13].

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 [13].

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования [16].

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 [16]:

- 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 [13]:

- сообщить руководству (дежурному);

- позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС по телефону – 112;

- принять меры по ликвидации последствий аварии в соответствии с инструкцией.

## **5.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **5.7.1 Анализ типичной ЧС при проведении исследования**

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.

При проведении исследования наиболее вероятной ЧС является пожар. Пожар в рабочем помещении может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера. В таблице 5.7 рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации, методы по их предотвращению и ликвидации их последствий.

Таблица 5.7 – Чрезвычайные ситуации, методы их предотвращения и ликвидации последствий

№	Чрезвычайная ситуация	Методы предотвращения ЧС	Ликвидация последствий ЧС
1	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
2	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
3	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

В данной главе проведен анализ вредных и опасных факторов на рабочем месте в лаборатории № 001А 10 корпуса ТПУ при проведении исследований:

- микроклимат [16];
- шум и вибрация [14];
- электромагнитное излучение [12];
- освещенность [16];

- психофизиологические факторы [16];
- химическая безопасность [17];
- электробезопасность [11];
- пожаро-взрывобезопасность [13].

Помещение № 001А–10 корпуса ТПУ отнесено:

- по электробезопасности – к 2 классу [11];
- по пожаро-взрывобезопасности – к категории В [13].

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

## Выводы

1. Проведен расчет показателей горючести водно-органических нитратных растворов, включающих водные нитратные растворы делящихся металлов (уран, плутоний), металла матрицы (магний) и органический компонент (ацетон, этанол) и определены оптимальные по составу растворы ВОНР, имеющие адиабатическую температуру горения  $\approx 1500$  К и обеспечивающие их энергоэффективную плазменную переработку.

2. По результатам термодинамического моделирования процесса плазменной переработки растворов ВОНР в широком диапазоне температур (300÷4000) К и массовых долей воздуха (10–90 %) установлены закономерности влияния массовой доли воздушного теплоносителя на состав образующихся продуктов и определены условия, обеспечивающие в воздушной плазме синтез топливных оксидных композиций «диоксид плутония – диоксид урана – оксид магния» для REMIX-топлива: массовая доля воздуха – не менее 61 %; температура –  $1500 \pm 100$  К; удельные энергозатраты – 25÷31 МДж/кг.

3. В ходе экспериментальных исследований определены режимы работы плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона, обеспечивающие эффективную плазменную переработку диспергированных модельных растворов ВОНР в воздушно-плазменном потоке: мощность ВЧФ-разряда – 14,5 кВт; расход раствора ВОНР – 300 л/ч; расход воздуха – 1,2 кг/с; частота вращения ротора диспергатора – 50 Гц; расход воды на «закалку» ОК – 2,8 кг/с.

4. Осуществлен плазмохимический синтез оксидных композиций в воздушно-плазменном потоке из диспергированных модельных водно-органических нитратных растворов самария (вместо плутония), неодима (вместо урана), магния и ацетона и исследованы их свойства. Установлены закономерности влияния массовой доли матрицы (оксид магния) на

площадь удельной поверхности и размер получаемых оксидных композиций. Показано, что при постоянном расходе воды на «закалку» (2,8 кг/с) и частоте диспергатора (50 Гц) увеличение массовой доли оксида магния в составе ОК «оксид самария – оксид неодима – оксид магния» от 5 % до 50 % (при  $\alpha=0,034$  и  $0,054$ ) приводит к увеличению удельной поверхности порошков ОК с 7,9 до 11,9 м<sup>2</sup>/г и уменьшению размера кристаллитов в их составе с 110 до 86 нм.

## **Заключение**

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза из диспергированных водно-органических нитратных растворов наноструктурных топливных оксидных композиций для REMIX-топлива.

## Список использованных источников

1. Г. А. Кравченко, С. В. Рассамагин, С. В. Русанов, И. Ю. Косарев Получение МОКС-топлива как один из этапов замыкания ядерного топливного цикла // Ядерная и альтернативная энергетика. – 2014. - № 2.
2. А.А. Маслов, Г.В. Каляцкая, Г.Н. Амелина, А.Ю. Водянкин, Н.Б. Егоров Технология урана и плутония: учебное пособие. Томский политехнический университет. – 2-е изд. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008. – 144 с.
3. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015 – 248 с.
4. Апсэ В.А., Шмелев А.Н. Ядерные технологии: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. – 128 с.
5. В.А. Карелин, А.Н. Страшко / Технология переработки облученного ядерного топлива : учебное пособие. Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – 89 с.
6. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. – М.: Техносфера, 2005. –336 с.
7. Пархоменко В.Д., Сорока П.И., Краснокутский Ю.И., Верещак В.Г.Плазмохимические методы получения порошкообразных веществ и их свойства. // Всесоюзный журнал химического общества им. Д.И.Менделеева. 1991 (2). Т.36. С. 166-170.
8. REMIX-топливо [Электронный ресурс] // REMIX-топливо: [сайт]. – 2015. – Режим доступа: [http://sosny.bas-net.by/wp-content/blogs.dir/2/files/2015/11/bul\\_2015\\_2.pdf](http://sosny.bas-net.by/wp-content/blogs.dir/2/files/2015/11/bul_2015_2.pdf) , свободный. – Загл. с экрана.
9. Самсонов Г.В. и др. Физико-химические свойства окислов. Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
10. ГОСТ 12.1.007-76 «ССБТ. Вредные вещества».
11. ГОСТ 12.1.038-82 «ССБТ. Электробезопасность».
12. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона».

13. ГОСТ 12.1.004-91 «ССБТ. Пожарная безопасность».
14. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».
15. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ».
16. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
17. ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
18. ГОСТ 12.4.011-89 «ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация».
19. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ
20. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 28.03.2021) // Собрание законодательства РФ. - 07.01.2002.

## Приложение А

Таблица А1 – Условия получения топливных оксидных композиций в воздушной плазме из водно-органических нитратных растворов урана, плутония и ацетона ( $\alpha = 0,034$ )

Состав оксидной композиции		Состав ВОНР						
		Состав ВНР, %				Ацетон, %	А	W
$\alpha = 0,034$ (Pu <sup>239</sup> + U <sup>235</sup> )/(Pu+U)		UO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Pu(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O, %			
ОК-1	3,20 % PuO <sub>2</sub> – 91,80 % UO <sub>2</sub> – 5,00 % MgO	33,25	1,41	6,23	37,11	22,00	40,89	37,11
		30,69	1,30	5,75	34,26	28,00	37,74	34,26
		30,26	1,28	5,67	33,78	29,00	37,22	33,78
		29,84	1,27	5,59	33,30	30,00	36,70	33,30
ОК-2	3,00 % PuO <sub>2</sub> – 87,00 % UO <sub>2</sub> – 10,00 % MgO	27,48	1,17	10,88	38,48	22,00	39,52	38,48
		25,36	1,08	10,04	35,52	28,00	36,48	35,52
		25,01	1,06	9,90	35,03	29,00	35,97	35,03
		24,66	1,05	9,76	34,53	30,00	35,47	34,53
ОК-3	2,90 % PuO <sub>2</sub> – 82,10 % UO <sub>2</sub> – 15,00 % MgO	23,02	0,98	14,47	39,54	22,00	38,46	39,54
		21,24	0,90	13,35	36,50	28,00	35,50	36,50
		20,95	0,89	13,17	35,99	29,00	35,01	35,99
		20,65	0,88	12,98	35,49	30,00	34,51	35,49
ОК-4	2,70 % PuO <sub>2</sub> – 77,30 % UO <sub>2</sub> – 20,00 % MgO	19,46	0,83	17,33	40,39	22,00	37,61	40,39
		17,96	0,76	16,00	37,28	28,00	34,72	37,28
		17,71	0,75	15,77	36,76	29,00	34,24	36,76

		17,46	0,74	15,55	36,24	30,00	33,76	36,24
<b>OK-5</b>	<b>2,40 % PuO<sub>2</sub> – 67,60 % UO<sub>2</sub> – 30,00 % MgO</b>	14,15	0,60	21,60	41,65	22,00	36,35	41,65
		13,06	0,55	19,94	38,44	28,00	33,56	38,44
		12,88	0,55	19,66	37,91	29,00	33,09	37,91
		12,70	0,54	19,39	37,38	30,00	32,62	37,38
		10,38	0,44	24,64	42,54	22,00	35,46	42,54
<b>OK-6</b>	<b>2,00 % PuO<sub>2</sub> – 58,00 % UO<sub>2</sub> – 40,00 % MgO</b>	9,58	0,41	22,74	39,27	28,00	32,73	39,27
		9,44	0,40	22,43	38,73	29,00	32,27	38,73
		9,31	0,40	22,11	38,18	30,00	31,82	38,18
		7,55	0,32	26,91	43,21	22,00	34,79	43,21
<b>OK-7</b>	<b>1,70 % PuO<sub>2</sub> – 48,30 % UO<sub>2</sub> – 50,00 % MgO</b>	6,97	0,30	24,84	39,89	28,00	32,11	39,89
		6,88	0,29	24,50	39,34	29,00	31,66	39,34
		6,78	0,29	24,15	38,78	30,00	31,22	38,78

Таблица А2 – Условия получения топливных оксидных композиций в воздушной плазме из водно-органических нитратных растворов урана, плутония и ацетона ( $\alpha = 0,054$ )

Состав оксидной композиции		Состав ВОИР						
		Состав ВНР, %				Ацетон, %	А	W
$\alpha = 0,054$ (Pu <sup>239</sup> + U <sup>235</sup> )/(Pu+U)		UO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Pu(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O, %			
ОК-1	5,10 % PuO <sub>2</sub> – 89,90 % UO <sub>2</sub> – 5,00 % MgO	32,55	2,26	6,23	36,97	22,00	41,03	36,97
		30,04	2,08	5,75	34,12	28,00	37,88	34,12
		29,62	2,05	5,67	33,65	29,00	37,35	33,65
		29,21	2,03	5,59	33,17	30,00	36,83	33,17
ОК-2	4,90% PuO <sub>2</sub> – 85,10 % UO <sub>2</sub> – 10,00 % MgO	26,90	1,87	10,87	38,36	22,00	39,64	38,36
		24,83	1,72	10,04	35,41	28,00	36,59	35,41
		24,49	1,70	9,90	34,92	29,00	36,08	34,92
		24,14	1,67	9,76	34,43	30,00	35,57	34,43
ОК-3	4,60 % PuO <sub>2</sub> – 80,40 % UO <sub>2</sub> – 15,00 % MgO	22,53	1,56	14,47	39,44	22,00	38,56	39,44
		20,80	1,44	13,35	36,41	28,00	35,59	36,41
		20,51	1,42	13,17	35,90	29,00	35,10	35,90
		20,22	1,40	12,98	35,40	30,00	34,60	35,40
ОК-4	4,30 % PuO <sub>2</sub> – 75,70 % UO <sub>2</sub> – 20,00 % MgO	19,05	1,32	17,33	40,30	22,00	37,70	40,30
		17,56	1,22	16,00	37,20	28,00	34,80	37,20
		17,34	1,20	15,77	36,68	29,00	34,32	36,68
		17,10	1,19	15,55	36,17	30,00	33,83	36,17
ОК-5	2,40 % PuO <sub>2</sub> – 67,60 % UO <sub>2</sub> – 30,00 %	13,85	0,96	21,60	41,59	22,00	36,41	41,59

	<b>MgO</b>	12,79	0,89	19,94	38,39	28,00	33,61	38,39
		12,61	0,87	19,66	37,85	29,00	33,15	37,85
		12,43	0,86	19,39	37,32	30,00	32,68	37,32
<b>OK-6</b>	<b>2,00 % PuO<sub>2</sub> – 58,00 % UO<sub>2</sub> – 40,00 % MgO</b>	10,16	0,70	24,64	42,50	22,00	35,50	42,50
		9,38	0,65	22,74	39,23	28,00	32,77	39,23
		9,25	0,64	22,43	38,68	29,00	32,32	38,68
		9,12	0,63	22,11	38,14	30,00	31,86	38,14
<b>OK-7</b>	<b>1,70 % PuO<sub>2</sub> – 48,30 % UO<sub>2</sub> – 50,00 % MgO</b>	7,40	0,51	26,91	43,18	22,00	34,82	43,18
		6,83	0,47	24,84	39,86	28,00	32,14	39,86
		6,73	0,47	24,49	39,31	29,00	31,69	39,31
		6,64	0,46	24,15	38,75	30,00	31,25	38,75

Таблица А3 – Условия получения топливных оксидных композиций в воздушной плазме из водно-органических нитратных растворов урана, плутония и этанола ( $\alpha = 0,034$ )

Состав оксидной композиции		Состав ВОИР						
		Состав ВНР, %				Этанол, %	А	W
$\alpha = 0,034$ (Pu <sup>239</sup> + U <sup>235</sup> )/(Pu+U)		UO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Pu(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O, %			
ОК-1	3,03 % PuO <sub>2</sub> – 86,97 % UO <sub>2</sub> – 10,00 % MgO	33,84	1,44	2,37	32,35	30,00	37,65	32,35
		32,39	1,37	2,27	30,97	33,00	36,03	30,97
		31,91	1,35	2,24	30,50	34,00	35,50	30,50
		31,42	1,33	2,20	30,04	35,00	34,96	30,04
ОК-2	2,69 % PuO <sub>2</sub> – 77,31 % UO <sub>2</sub> – 20,00 % MgO	30,76	1,31	4,85	33,08	30,00	36,92	33,08
		29,44	1,25	4,64	31,67	33,00	35,33	31,67
		29,00	1,23	4,57	31,19	34,00	34,81	31,19
		28,56	1,21	4,50	30,72	35,00	34,28	30,72
ОК-3	1,68 % PuO <sub>2</sub> – 48,32 % UO <sub>2</sub> – 50,00 % MgO	20,63	0,88	13,01	35,49	30,00	34,51	35,49
		19,74	0,84	12,45	33,97	33,00	33,03	33,97
		19,45	0,83	12,26	33,46	34,00	32,54	33,46
		19,15	0,81	12,08	32,96	35,00	32,04	32,96

Таблица А4 – Условия получения топливных оксидных композиций в воздушной плазме из водно-органических нитратных растворов урана, плутония и этанола ( $\alpha = 0,054$ )

Состав оксидной композиции		Состав ВОНР						
		Состав ВНР, %				Этанол, %	А	W
$\alpha = 0,054$ (Pu <sup>239</sup> + U <sup>235</sup> )/(Pu+U)		UO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Pu(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O, %			
ОК-1	4,85 % PuO <sub>2</sub> – 85,15 % UO <sub>2</sub> – 10,00 % MgO	33,13	2,30	2,37	32,21	30,00	37,79	32,21
		31,71	2,20	2,27	30,83	33,00	36,17	30,83
		31,23	2,17	2,23	30,37	34,00	35,63	30,37
		30,76	2,13	2,20	29,91	35,00	35,09	29,91
ОК-2	4,31 % PuO <sub>2</sub> – 75,69 % UO <sub>2</sub> – 20,00 % MgO	30,11	2,09	4,85	32,95	30,00	37,05	32,95
		28,82	2,00	4,64	31,54	33,00	35,46	31,54
		28,39	1,97	4,57	31,07	34,00	34,93	31,07
		27,96	1,94	4,50	30,60	35,00	34,40	30,60
ОК-3	2,69 % PuO <sub>2</sub> – 47,31 % UO <sub>2</sub> – 50,00 % MgO	20,19	1,40	13,00	35,40	30,00	34,60	35,40
		19,33	1,34	12,45	33,88	33,00	33,12	33,88
		19,04	1,32	12,26	33,38	34,00	32,62	33,38
		18,75	1,30	12,07	32,87	35,00	32,13	32,87

## Приложение Б

Таблица Б1 – Условия получения топливных оксидных композиций в воздушной плазме из водно-органических нитратных растворов урана, плутония и ацетона ( $\alpha = 0,034$ )

Состав топливной оксидной композиции, %	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O, %	Q <sub>н<sup>p</sup></sub> , МДж/кг	Воздух, %	T <sub>ад</sub> , К	C(c)	UO <sub>2</sub> (c)	PuO <sub>2</sub> (c)	MgO(c)	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (c)
<b>3,20 % PuO<sub>2</sub> – 91,80 % UO<sub>2</sub> – 5,00 % MgO</b>	30,00	8,63	70,00	1849,00	+	+	+	+	–
	30,00	8,63	72,00	1761,00	–	–	+	+	+
	29,00	8,30	70,00	1794,00	–	+	+	+	–
	29,00	8,30	72,00	1702,00	–	–	+	+	+
	28,00	7,97	70,00	1725,00	–	–	+	+	+
	28,00	7,97	72,00	1630,00	–	–	+	+	+
	<b>22,00</b>	<b>6,01</b>	<b>61,00</b>	<b>1613,00</b>	–	+	+	+	–
<b>3,00 % PuO<sub>2</sub> – 87,00 % UO<sub>2</sub> – 10,00 % MgO</b>	30,00	8,59	70,00	1825,00	–	+	+	+	–
	30,00	8,59	72,00	1738,00	–	–	+	+	+
	29,00	8,27	70,00	1769,00	–	+	+	+	–
	29,00	8,27	72,00	1679,00	–	–	+	+	+
	28,00	7,94	70,00	1344,00	–	–	+	+	+
	28,00	7,94	72,00	1607,00	–	–	+	+	+
	<b>22,00</b>	<b>5,98</b>	<b>61,00</b>	<b>1583,00</b>	–	+	+	+	–
<b>2,90 % PuO<sub>2</sub> – 82,10 % UO<sub>2</sub> – 15,00 % MgO</b>	30,00	8,57	69,00	1842,00	+	+	+	+	–
	30,00	8,57	72,00	1721,00	–	–	+	+	+
	29,00	8,25	69,00	1785,00	+	+	+	+	–
	29,00	8,25	72,00	1662,00	–	–	+	+	+
	28,00	7,92	69,00	1728,00	–	+	+	+	–
	28,00	7,92	72,00	1603,00	–	–	+	+	+
	<b>22,00</b>	<b>5,95</b>	<b>61,00</b>	<b>1560,00</b>	–	+	+	+	–
<b>2,70 % PuO<sub>2</sub> – 77,30 % UO<sub>2</sub> – 20,00 % MgO</b>	30,00	8,56	69,00	1827,00	+	+	+	+	–
	30,00	8,56	72,00	1707,00	–	–	+	+	+

	29,00	8,23	69,00	1770,00	-	+	+	+	-
	29,00	8,23	72,00	1649,00	-	-	+	+	+
	28,00	7,90	69,00	1713,00	-	+	+	+	-
	28,00	7,90	72,00	1590,00	-	-	+	+	+
	<b>22,00</b>	<b>5,93</b>	<b>61,00</b>	<b>1542,00</b>	-	+	+	+	-
<b>2,40 % PuO<sub>2</sub> – 67,60 % UO<sub>2</sub> – 30,00 % MgO</b>	30,00	8,53	69,00	1805,00	+	+	+	+	-
	30,00	8,53	72,00	1687,00	-	-	+	+	+
	29,00	8,20	69,00	1748,00	-	+	+	+	-
	29,00	8,20	72,00	1629,00	-	-	+	+	+
	28,00	7,87	69,00	1691,00	-	+	+	+	-
	28,00	7,87	72,00	1571,00	-	-	+	+	+
	<b>22,00</b>	<b>5,90</b>	<b>61,00</b>	<b>1515,00</b>	-	+	+	+	-
<b>2,00 % PuO<sub>2</sub> – 58,00 % UO<sub>2</sub> – 40,00 % MgO</b>	30,00	8,51	69,00	1789,00	+	+	+	+	-
	30,00	8,51	72,00	1673,00	-	-	+	+	+
	29,00	8,18	69,00	1733,00	-	+	+	+	-
	29,00	8,18	72,00	1615,00	-	-	+	+	+
	28,00	7,85	69,00	1675,00	-	+	+	+	-
	28,00	7,85	72,00	1557,00	-	-	+	+	+
	<b>22,00</b>	<b>5,88</b>	<b>61,00</b>	<b>1497,00</b>	-	+	+	+	-
<b>1,70 % PuO<sub>2</sub> – 48,30 % UO<sub>2</sub> – 50,00 % MgO</b>	30,00	8,49	69,00	1778,00	+	+	+	+	-
	30,00	8,49	72,00	1663,00	-	-	+	+	+
	29,00	8,16	69,00	1721,00	-	+	+	+	-
	29,00	8,16	72,00	1605,00	-	-	+	+	+
	28,00	7,83	69,00	1663,00	-	+	+	+	-
	28,00	7,83	72,00	1547,00	-	-	+	+	+
	<b>22,00</b>	<b>5,86</b>	<b>61,00</b>	<b>1484,00</b>	-	+	+	+	-

Таблица Б2 – Условия получения топливных оксидных композиций в воздушной плазме из водно-органических нитратных растворов урана, плутония и ацетона ( $\alpha = 0,054$ )

Состав топливной оксидной композиции, %	$C_3H_6O$ , %	$Q_{н.р}$ , МДж/кг	Воздух, %	$T_{ад}$ , К	C(c)	UO <sub>2</sub> (c)	PuO <sub>2</sub> (c)	MgO(c)	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (c)
<b>5,10 % PuO<sub>2</sub> – 89,90 % UO<sub>2</sub> – 5,00 % MgO</b>	30,00	8,63	70,00	1851,00	+	+	+	+	–
	30,00	8,63	72,00	1762,00	–	–	+	+	+
	29,00	8,31	70,00	1795,00	–	+	+	+	–
	29,00	8,31	72,00	1703,00	–	–	+	+	+
	28,00	7,98	70,00	1363,00	–	–	+	+	+
	28,00	7,98	72,00	1644,00	–	–	+	+	+
	<b>22,00</b>	<b>6,01</b>	<b>61,00</b>	<b>1615,00</b>	–	+	+	+	–
<b>4,90 % PuO<sub>2</sub> – 85,10 % UO<sub>2</sub> – 10,00 % MgO</b>	30,00	8,60	70,00	1826,00	+	+	+	+	–
	30,00	8,60	72,00	1739,00	–	–	+	+	+
	29,00	8,27	70,00	1771,00	–	+	+	+	–
	29,00	8,27	72,00	1680,00	–	–	+	+	+
	28,00	7,95	70,00	1703,00	–	–	+	+	+
	28,00	7,95	72,00	1621,00	–	–	+	+	+
	<b>22,00</b>	<b>5,98</b>	<b>61,00</b>	<b>1584,00</b>	–	+	+	+	–
<b>4,60 % PuO<sub>2</sub> – 80,40 % UO<sub>2</sub> – 15,00 % MgO</b>	30,00	8,58	70,00	1808,00	+	+	+	+	–
	30,00	8,58	72,00	1722,00	–	–	+	+	+
	29,00	8,25	70,00	1752,00	–	+	+	+	–
	29,00	8,25	72,00	1663,00	–	–	+	+	+
	28,00	7,92	70,00	1684,00	–	–	+	+	+
	28,00	7,92	72,00	1604,00	–	–	+	+	+
	<b>22,00</b>	<b>5,95</b>	<b>61,00</b>	<b>1561,00</b>	–	+	+	+	–
<b>4,30 % PuO<sub>2</sub> – 75,70 % UO<sub>2</sub> – 20,00 % MgO</b>	30,00	8,56	69,00	1828,00	+	+	+	+	–
	30,00	8,56	72,00	1708,00	–	–	+	+	+
	29,00	8,23	69,00	1771,00	–	+	+	+	–
	29,00	8,23	72,00	1649,00	–	–	+	+	+

	28,00	7,90	69,00	1714,00	-	+	+	+	-
	28,00	7,90	72,00	1591,00	-	-	+	+	+
	<b>22,00</b>	<b>5,93</b>	<b>61,00</b>	<b>1543,00</b>	-	+	+	+	-
<b>2,40 % PuO<sub>2</sub> – 67,60 % UO<sub>2</sub> – 30,00 % MgO</b>	30,00	8,53	69,00	1805,00	+	+	+	+	-
	30,00	8,53	72,00	1688,00	-	-	+	+	+
	29,00	8,20	69,00	1749,00	-	+	+	+	-
	29,00	8,20	72,00	1629,00	-	-	+	+	+
	28,00	7,87	69,00	1691,00	-	+	+	+	-
	28,00	7,87	72,00	1571,00	-	-	+	+	+
	<b>22,00</b>	<b>5,90</b>	<b>61,00</b>	<b>1516,00</b>	-	+	+	+	-
<b>2,00 % PuO<sub>2</sub> – 58,00 % UO<sub>2</sub> – 40,00 % MgO</b>	30,00	8,51	69,00	1790,00	+	+	+	+	-
	30,00	8,51	72,00	1673,00	-	-	+	+	+
	29,00	8,18	69,00	1733,00	-	+	+	+	-
	29,00	8,18	72,00	1615,00	-	-	+	+	+
	28,00	7,85	69,00	1676,00	-	+	+	+	-
	28,00	7,85	72,00	1557,00	-	-	+	+	+
	<b>22,00</b>	<b>5,88</b>	<b>61,00</b>	<b>1498,00</b>	-	+	+	+	-
<b>1,70 % PuO<sub>2</sub> – 48,30 % UO<sub>2</sub> – 50,00 % MgO</b>	30,00	8,49	69,00	1778,00	+	+	+	+	-
	30,00	8,49	72,00	1663,00	-	-	+	+	+
	29,00	8,16	69,00	1722,00	-	+	+	+	-
	29,00	8,16	72,00	1605,00	-	-	+	+	+
	28,00	7,83	69,00	1664,00	-	+	+	+	-
	28,00	7,83	72,00	1547,00	-	-	+	+	+
	<b>22,00</b>	<b>5,86</b>	<b>61,00</b>	<b>1484,00</b>	-	+	+	+	-

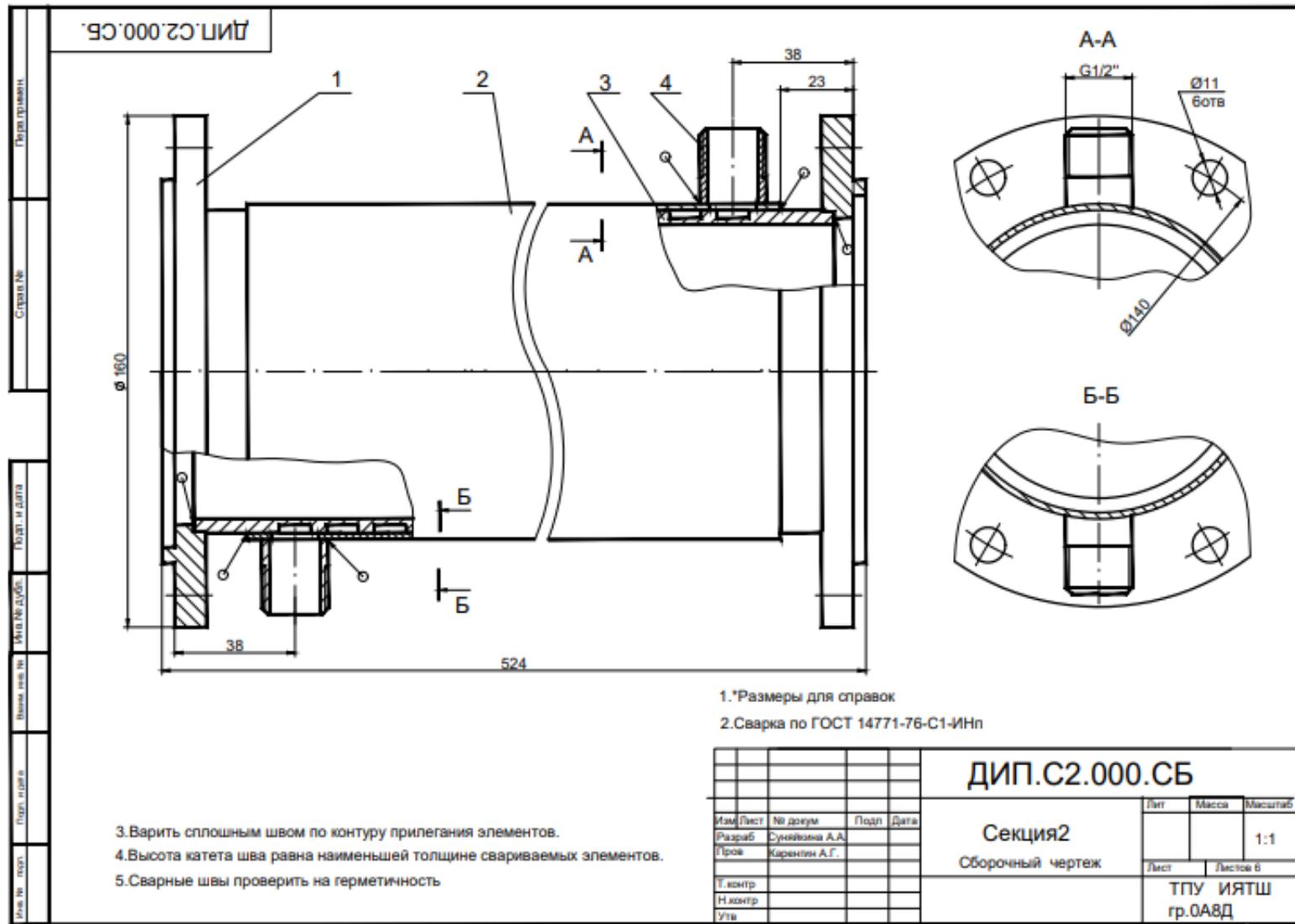
Таблица Б3 – Условия получения топливных оксидных композиций в воздушной плазме из водно-органических нитратных растворов урана, плутония и этанола ( $\alpha = 0,034$ )

Состав топливной оксидной композиции, %	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH, %	Q <sub>н<sup>р</sup></sub> , МДж/кг	Воздух, %	T <sub>ад</sub> , К	C(c)	UO <sub>2</sub> (c)	PuO <sub>2</sub> (c)	MgO(c)	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (c)
<b>3,03 % PuO<sub>2</sub> – 86,97 % UO<sub>2</sub> – 10,00 % MgO</b>	35,00	8,63	72,00	1720,00	+	+	+	+	–
	35,00	8,63	74,00	1635,00	–	–	+	+	+
	34,00	8,35	72,00	1677,00	+	+	+	+	–
	34,00	8,35	74,00	1592,00	–	–	+	+	+
	33,00	8,07	72,00	1634,00	+	+	+	+	–
	33,00	8,07	74,00	1546,00	–	–	+	+	+
	<b>30,00</b>	<b>7,23</b>	<b>68,00</b>	<b>1623,00</b>	–	+	+	+	–
<b>2,69 % PuO<sub>2</sub> – 77,31 % UO<sub>2</sub> – 20,00 % MgO</b>	35,00	8,61	72,00	1708,00	+	+	+	+	–
	35,00	8,61	74,00	1625,00	–	–	+	+	+
	34,00	8,33	72,00	1665,00	+	+	+	+	–
	34,00	8,33	74,00	1581,00	–	–	+	+	+
	33,00	8,05	72,00	1622,00	+	+	+	+	–
	33,00	8,05	74,00	1535,00	–	–	+	+	+
	<b>30,00</b>	<b>7,21</b>	<b>68,00</b>	<b>1609,00</b>	–	+	+	+	–
<b>1,68 % PuO<sub>2</sub> – 48,32 % UO<sub>2</sub> – 50,00 % MgO</b>	35,00	8,56	72,00	1670,00	–	+	+	+	–
	35,00	8,56	74,00	1590,00	–	–	+	+	+
	34,00	8,28	72,00	1627,00	–	+	+	+	–
	34,00	8,28	74,00	1545,00	–	–	+	+	+
	33,00	7,99	72,00	1584,00	–	+	+	+	–
	33,00	7,99	74,00	1500,00	–	–	+	+	+
	<b>30,00</b>	<b>7,15</b>	<b>68,00</b>	<b>1565,00</b>	–	+	+	+	–

Таблица Б4 – Условия получения топливных оксидных композиций в воздушной плазме из водно-органических нитратных растворов урана, плутония и этанола ( $\alpha = 0,054$ )

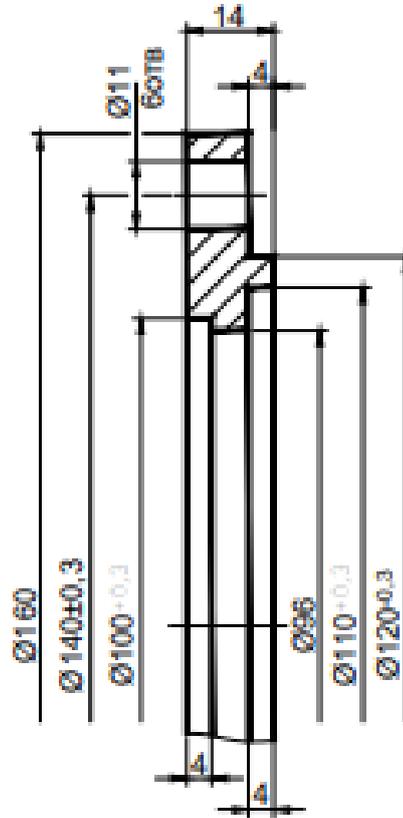
Состав топливной оксидной композиции, %	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH, %	Q <sub>н<sup>р</sup></sub> , МДж/кг	Воздух, %	T <sub>ад</sub> , К	C(c)	UO <sub>2</sub> (c)	PuO <sub>2</sub> (c)	MgO(c)	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (c)
<b>4,85 % PuO<sub>2</sub> – 85,15 % UO<sub>2</sub> – 10,00 % MgO</b>	35,00	8,63	72,00	1721,00	+	+	+	+	–
	35,00	8,63	74,00	1636,00	–	–	+	+	+
	34,00	8,35	72,00	1678,00	+	+	+	+	–
	34,00	8,35	74,00	1593,00	–	–	+	+	+
	33,00	8,07	72,00	1636,00	+	+	+	+	–
	33,00	8,07	74,00	1547,00	–	–	+	+	+
	<b>30,00</b>	<b>7,23</b>	<b>68,00</b>	<b>1625,00</b>	–	+	+	+	–
<b>4,31 % PuO<sub>2</sub> – 75,69 % UO<sub>2</sub> – 20,00 % MgO</b>	35,00	8,62	72,00	1709,00	+	+	+	+	–
	35,00	8,62	74,00	1626,00	–	–	+	+	+
	34,00	8,34	72,00	1667,00	+	+	+	+	–
	34,00	8,34	74,00	1582,00	–	–	+	+	+
	33,00	8,06	72,00	1624,00	+	+	+	+	–
	33,00	8,06	74,00	1536,00	–	–	+	+	+
	<b>30,00</b>	<b>7,22</b>	<b>68,00</b>	<b>1611,00</b>	–	+	+	+	–
<b>2,69 % PuO<sub>2</sub> – 47,31 % UO<sub>2</sub> – 50,00 % MgO</b>	35,00	8,56	72,00	1671,00	–	+	+	+	–
	35,00	8,56	74,00	1591,00	–	–	+	+	+
	34,00	8,28	72,00	1628,00	–	+	+	+	–
	34,00	8,28	74,00	1546,00	–	–	+	+	+
	33,00	8,00	72,00	1585,00	–	+	+	+	–
	33,00	8,00	74,00	1501,00	–	–	+	+	+
	<b>30,00</b>	<b>7,15</b>	<b>68,00</b>	<b>1567,00</b>	–	+	+	+	–

## Приложение В



ДИП.С2.001.

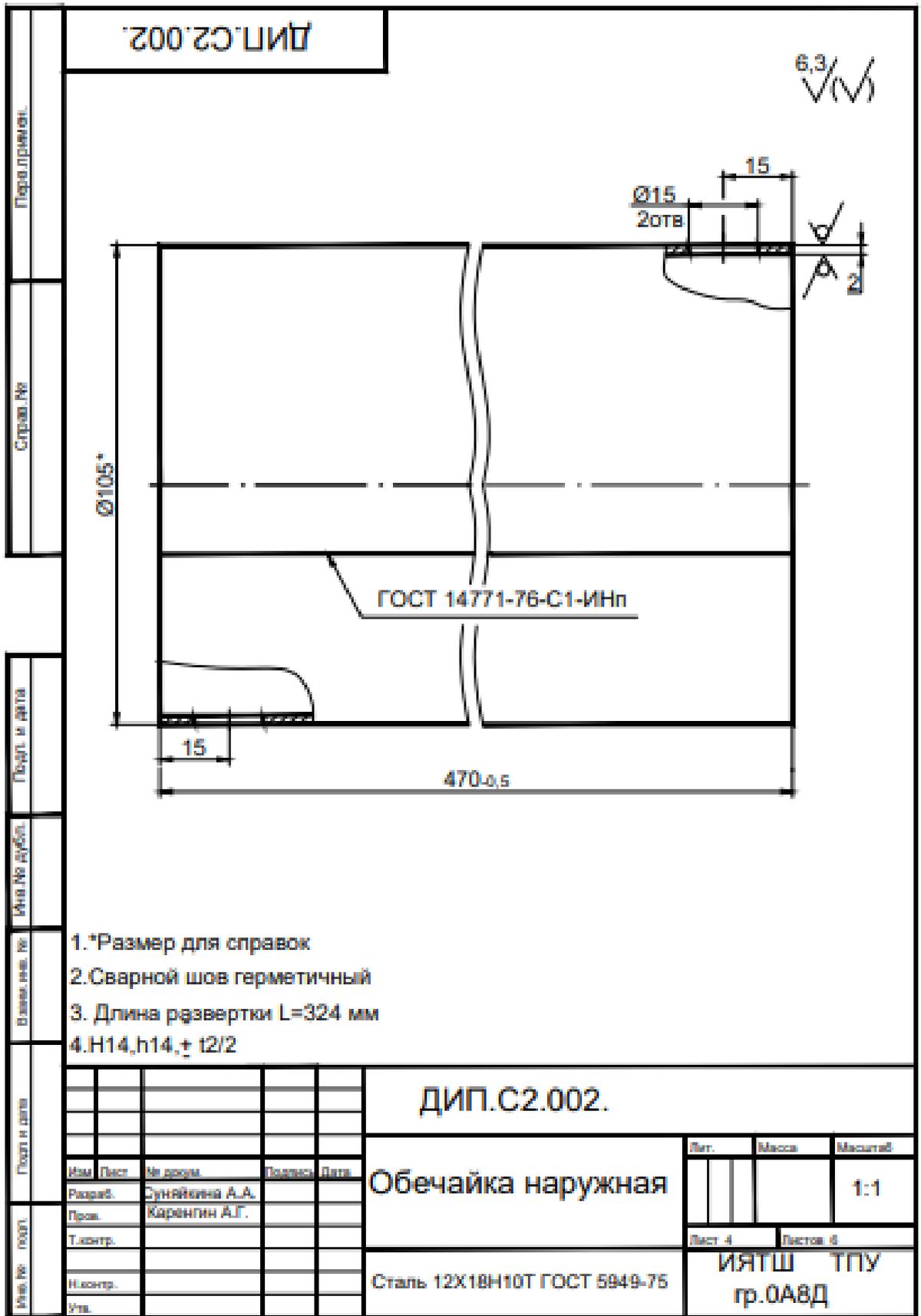
6,3



4.Н14,н14,+ t2/2

Лист и дата		Имя № дубл.		Время, мин. №		Лист и дата		ДИП.С2.001.	
Имя № лист		Имя № лист		Имя № лист		Имя № лист		Фланец	
Разраб.	Лист	№ докум.	Получено	Дата	Лист	Лист	Масштаб	1:1	
Пров.		Сундеева А.А.						Лист 4	
Техногр.		Харитон А.Г.						Листов 8	
Исполн.								ИЯТШ ТПУ	
Усть.								гр.0А8Д	
						Сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5949-75			

Формат А4



Формат А4

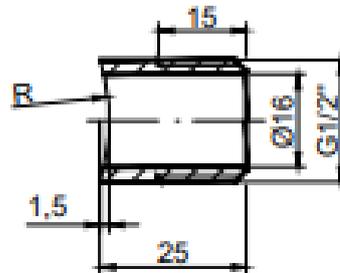


ДИП.С2.004.

6.3

Перо примен.

Стрел. №



Размеры в мм

Обозначение	R	Кол.
ДИП.02.004.	53	2

Подп. и дата

Имя № дубл.

Время нач. №

H14,h14,± t2/2

Подп. и дата

ДИП.С2.004.

Имя	Подп.	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Сундьякина А.А.		
Пров.		Каренгин А.Г.		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Штуцер 1/2"

Лист	Масса	Масштаб
		1:1

Лист 4 Листов 6

Сталь 12Х18Н9Т ГОСТ 11068-80

ИЯТШ ТПУ  
гр.0А8Д

Формат А4

## Приложение Г

Таблица Г1 – Измерение динамического напора воздуха, проходящего через газоход

№	S <sub>имп</sub>		ρv <sup>2</sup> /2, мБар							(ρv <sup>2</sup> /2) <sub>ср</sub>
	Зхп	см <sup>2</sup>	1	2	3	4	5	6	7	мБар
1	3х10	1650	2,59	2,61	2,53	2,66	2,62	2,58	2,60	2,60
2	3х8	1320	2,42	2,50	2,53	2,46	2,54	2,47	2,48	2,49
3	3х6	990	2,39	2,38	2,40	2,45	2,43	2,37	2,38	2,40
4	3х4	660	2,21	2,25	2,23	2,29	2,27	2,22	2,28	2,25

Таблица Г2 – Измерение динамического напора воздуха, проходящего через ВЧФ-плазматрон

№	S <sub>имп</sub>		ρv <sup>2</sup> /2, мБар							(ρv <sup>2</sup> /2) <sub>ср</sub>
	Зхп	см <sup>2</sup>	1	2	3	4	5	6	7	мБар
1	3х10	1650	2,24	2,27	2,20	2,18	2,25	2,22	2,28	2,23
2	3х8	1320	2,43	2,47	2,53	2,55	2,49	2,52	2,48	2,50
3	3х6	990	2,55	2,64	2,57	2,66	2,62	2,58	2,61	2,60
4	3х4	660	3,60	3,57	3,58	3,63	3,65	3,59	3,56	3,60

Таблица Г3 – Определение расхода воздуха, проходящего через газоход, ВЧФ-плазматрон и реактор

№	Симп		Газоход			ВЧФ-плазматрон			Реактор		
	Зхп	см <sup>2</sup>	Ргхд, мБар	Ргхд, Па	Qгхд, кг/с	Рпг, мБар	Рпг, Па	Qпг, кг/с	Твозд, °С	ρвозд, кг/м <sup>3</sup>	Qр, кг/с
1	3х10	1650	3,99	397,66	1,55	2,23	222,76	0,12	21,0	1,20	1,42
2	3х8	1320	3,09	308,22	1,36	2,50	248,82	0,13			1,23
3	3х6	990	2,88	287,14	1,31	2,60	259,65	0,13			1,18
4	3х4	660	2,68	250,53	1,27	3,60	358,64	0,15			1,12

Таблица Г4 – Полученные значения при проведении исследования и оптимизации режимов работы плазменного реактора на базе ВЧФ – плазматрона

№	I, А	U <sub>a</sub> , кВт	P <sub>0</sub> , кВт	T <sub>дг</sub> , °С	S, см <sup>2</sup>	Анод				Сетка				Электрод				Корпус			
						m <sub>a</sub> , кг/с	ΔT <sub>a</sub> , °С	P <sub>a</sub> , кВт	T <sub>a</sub> , °С	m <sub>c</sub> , кг/с	ΔT <sub>c</sub> , °С	P <sub>c</sub> , кВт	T <sub>c</sub> , °С	m <sub>э</sub> , кг/с	ΔT <sub>э</sub> , °С	P <sub>э</sub> , кВт	T <sub>э</sub> , °С	m <sub>кп</sub> , кг/с	ΔT <sub>кп</sub> , °С	P <sub>кп</sub> , кВт	T <sub>кп</sub> , °С
1	3,0	5,7	17,10	34,0	3x10	0,24	6,70	6,84	0,06	0,5	0,14	0,12	3,4	1,70	0,06	0,3	0,07	0,24	6,7	6,84	0,07
2	3,0	5,7	17,10	34,6	3x8	0,24	6,70	6,84	0,06	0,6	0,17	0,12	3,4	1,70	0,06	0,3	0,07	0,24	6,7	6,84	0,07
3	3,0	5,8	17,40	35,7	3x6	0,24	6,80	6,94	0,06	0,8	0,22	0,12	3,5	1,75	0,06	0,3	0,07	0,24	6,8	6,94	0,07
4	3,0	5,8	17,40	36,6	3x4	0,24	6,70	6,84	0,06	1,0	0,28	0,12	3,4	1,70	0,06	0,3	0,07	0,24	6,7	6,84	0,07
1	3,5	5,8	20,30	37,3	3x10	0,24	7,80	7,96	0,07	2,1	0,58	0,12	4,4	2,20	0,06	0,4	0,10	0,24	7,8	7,96	0,07
2	3,5	5,8	20,30	36,8	3x8	0,24	8,00	8,16	0,07	2,4	0,66	0,12	4,4	2,20	0,06	0,6	0,14	0,24	8	8,16	0,07
3	3,5	6,3	22,05	36,5	3x6	0,24	8,10	8,26	0,07	2,6	0,72	0,12	4,5	2,25	0,06	0,6	0,14	0,24	8,1	8,26	0,07
4	3,5	6,5	22,75	37,0	3x4	0,24	8,30	8,47	0,07	2,8	0,77	0,12	4,8	2,40	0,06	0,7	0,17	0,24	8,3	8,47	0,07
1	4,0	6,5	26,00	37,8	3x10	0,24	9,30	9,49	0,07	3,6	0,99	0,12	5,4	2,70	0,06	1,0	0,24	0,24	9,3	9,49	0,07
2	4,0	6,7	26,80	38,0	3x8	0,24	9,40	9,59	0,07	3,5	0,96	0,12	5,5	2,75	0,06	1,0	0,24	0,24	9,4	9,59	0,07
3	4,0	6,9	27,60	37,9	3x6	0,24	9,60	9,79	0,07	3,3	0,91	0,12	5,6	2,80	0,06	0,9	0,21	0,24	9,6	9,79	0,07
4	4,0	7,0	28,00	36,8	3x4	0,24	9,60	9,79	0,07	3,0	0,83	0,12	5,7	2,85	0,06	0,8	0,19	0,24	9,6	9,79	0,07

## Приложение Д

Таблица Д1 – Состав и режимы переработки растворов ВОНР, физико-химические и технологические свойства полученных оксидных композиций

Состав ВОНР					Состав СОК			Физико-химические свойства СОК		
Состав ВНР				Ацетон						
№	Nd(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O, г/л	Sm(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O, г/л	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O, г/л	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O, %	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	MgO, %	D <sub>50</sub> , мкм	S <sub>уд</sub> , м <sup>2</sup> /Г	D <sub>крист</sub> , нм
<b>α = 0,034</b>										
1	278,7	30,3	80,1	63,3	85,5	9,5	5,0	10,2	-	-
2	264,0	28,7	160,2	62,3	81,0	9,0	10,0	9,6	-	-
3	249,4	27,1	240,3	61,3	76,5	8,5	15,0	9,1	14,8	56
4	234,7	25,5	320,4	60,3	72,0	8,0	20,0	8,7	15,3	53
5	205,4	22,3	480,6	58,4	63,0	7,0	30,0	8,5	16,7	48
6	146,7	15,9	801,0	55,0	45,0	5,0	50,0	4,3	21,0	38