

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

Институт Физико-технический

Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»

Кафедра Техническая физика

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Моделирование и исследование процесса плазменной конверсии отвалного гексафторида урана

УДК 661.87:621.039.534:533.9.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5A	Зубов Виктор Вячеславович		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. Менеджмент	Верховская М.В.	к.ЭКОН.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. ТФ ФТИ	Шаманин И.В.	д.ф-м.н.		

Планируемые результаты обучения по ООП

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

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

Институт ФТИ
Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»
Кафедра Техническая физика

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой
_____ «___» И.В. Шаманин

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
0AM5A	Зубов Виктор Вячеславович

Тема работы:

Моделирование и исследование процесса плазменной конверсии отвалного гексафторида урана	
Утверждена директором ФТИ	№770/с от 10.02.2017 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	22.05.2017 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Исследовать различные варианты конверсии обедненного по изотопу уран-235 (отвалного) гексафторида урана (ОГФУ) в различных плазменных теплоносителях. Определить оптимальные условия, обеспечивающие энергоэффективную и экологически безопасную обработку ОГФУ.
---------------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	При разработке магистерской диссертации должны быть рассмотрены следующие вопросы: 1. Поиск патентных источников, обзор и анализ отечественной и зарубежной литературы по применяемым промышленным методам конверсии ОГФУ. 2. Термодинамическое моделирование процесса плазменной конверсии ОГФУ. Определение оптимальных условий проведения этого процесса в различных плазменных теплоносителях. 3. Экспериментальные исследования и оптимизация режимов работы плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона. Экспериментальное подтверждение рекомендованных режимов для разрабатываемого процесса плазменной конверсии ОГФУ в воздушно-плазменном потоке. 4. Экономическое обоснование проведения НИР. 5. Выводы по работе. Заключение.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Экспериментальная часть	Доцент кафедры «Техническая физика» А.Г. Каренгин
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент кафедры «Менеджмент» М.В. Верховская
Социальная ответственность	Ассистент кафедры «Прикладная физика» Т.С. Гоголева
Часть на иностранном языке	Доцент кафедры иностранных языков института социально-гуманитарных технологий О.А. Александров
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Nukleare Brennstoffkreislauf	

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5A	Зубов В.В.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM5A	Зубов Виктор Вячеславович

Институт	Физико-технический	Кафедра	Техническая физика
Уровень образования	Магистратура	Направление/ специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Изотопные материалы и технологии

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Затраты на специальное оборудование определяются согласно стоимости оборудования по прейскурантам или по договорной цене. Заработная плата рассчитывается исходя из тарифной ставки и коэффициентов, зависящих от различных условий: организация, регион. Страховые отчисления определяются согласно Федеральному закону от 24.07.2009 №212-ФЗ. Прочие накладные расходы определяются исходя из суммы полной заработной платы исполнителя технического проекта.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценку потенциала и перспективности реализации ТП можно провести с помощью карты сегментирования рынка
2. Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет	Иерархическая структура работ Организационная структура проекта Календарный план-график проведения НИР по теме
3. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности научного исследования	Оценка научно-технического эффекта

Перечень графического материала:

1. Матрица SWOT
2. Иерархическая структура работ
3. Организационная структура работ
4. Календарный план-график проведения НИР по теме
5. Бюджет НИИ
6. Матрица ответственности
7. Оценка научно-технического эффекта

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. Менеджмент	Верховская М.В.	к.ЭКОН.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5A	Зубов В.В.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM5A	Зубов Виктор Вячеславович

Институт	Физико-технический	Кафедра	Техническая физика
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Ядерная физика и технологии / Изотопные технологии и материалы

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующее излучение, вредные вещества); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	– электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность; – требования охраны труда при работе на ПЭВМ.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5A	Зубов В.В.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа: 152 страницы, 54 рисунка, 38 таблиц, 35 источников, 5 приложений.

Ключевые слова: плазма, ВЧФ-плазмотрон, адиабатическая температура горения, обеднённый («отвальный») гексафторид урана, конверсия обеднённого («отвального») гексафторида урана.

Объектом исследования является процесс плазменной конверсии обеднённого («отвального») гексафторида урана в различных плазменных теплоносителях.

Цель работы – моделирование и исследование процесса плазменной конверсии обеднённого («отвального») гексафторида урана в различных плазменных теплоносителях.

В процессе исследования проведено математическое и термодинамическое моделирование процесса плазменной конверсии обеднённого («отвального») гексафторида урана в различных плазменных теплоносителях.

В результате исследования определены оптимальные режимы работы ВЧФ-плазмотрона для практической реализации исследуемого процесса в различных теплоносителях.

Область применения: результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании энергоэффективной плазменной технологии конверсии обеднённого («отвального») гексафторида урана.

В будущем планируется продолжить исследования по созданию и совершенствованию плазменных установок для промышленной комплексной плазменной конверсии обеднённого («отвального») гексафторида урана.

Определения

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

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

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

Низшая теплота сгорания – количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании, без учёта теплоты конденсации водяного пара.

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

Гексафторид урана – химическое соединение урана с фтором. Является единственным легколетучим соединением урана (при нагревании до 53 °С гексафторид урана непосредственно переходит из твердого состояния в газообразное) и используется в качестве исходного сырья для разделения изотопов урана-238 и урана-235 по газодиффузионной технологии или технологии газового центрифугирования и получения обогащенного урана.

Обеднённый («отвальный») гексафторид урана – гексафторид урана, в котором содержание изотопа урана-235 ниже, чем в природном уране.

Конверсия обедненного («отвального») гексафторида урана – производственный процесс плазменной обработки обедненного («отвального») гексафторида урана (ОГФУ), в ходе которой производится обесфторивание ОГФУ в более безопасную форму хранения – закись-окись урана (U_3O_8).

Обозначения и сокращения

ГФУ – гексафторид урана

ОГФУ – обедненный по изотопу уран-235 («отвальный») гексафторид урана

ВСОК – водно-солеорганическая композиция

T_{всп} – температура вспышки.

T_{восп} – температура воспламенения

T_{самовосп} – температура самовоспламенения

Q_н^c – низшая теплотворная способность жидких органических веществ

Q_н^p – низшая теплотворная способность водно-солеорганических композиций

T_{ад} – адиабатическая температура горения

Содержание

Введение.....	13
1 Обзор литературы	15
1.1 «Мокрая» конверсия ГФУ до диоксида урана	15
1.2 «Сухая» конверсия ГФУ до диоксида урана	18
1.3 Современные технологии переработки ОГФУ	22
1.3.1 Водородное восстановление ОГФУ	24
1.3.2 Плазменная конверсия ОГФУ в водопаровой плазме.....	27
1.3.3 Перспективные технологии конверсии ОГФУ	34
2 Расчет и аналитика	38
2.1 Методы расчета равновесных составов продуктов плазмохимических процессов	38
2.2 Термодинамический расчёт процесса плазменной конверсии ОГФУ	42
2.3 Оценка удельных энергозатрат на процесс плазменной конверсии ОГФУ..	56
2.4 Термодинамический расчёт процесса плазменной обработки ВСОК на основе нитрата уранила.....	60
2.4.1 Расчёт параметров ВСОК на основе нитрата уранила	60
2.4.2 Термодинамический расчёт процесса плазменной обработки ВСОК на основе нитрата уранила	61
2.4.3 Оценка удельных энергозатрат на процесс плазменной обработки ВСОК на основе нитрата уранила	67
2.4.4 Обсуждение результатов	71
3 Исследование процесса плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме .	73
3.1 Установка для проведения экспериментальных исследований	73
3.2 Исследование режимов работы плазменного реактора на базе ВЧФ-плазмотрона	75
3.2.1 Определение расхода плазмообразующего газа через разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона и газоход после реактора	78

3.2.2 Определение расхода воздуха через реактор	82
3.3 Плазменная обработка ВСОК на основе нитрата уранила	84
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	89
4.1 Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	89
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	89
4.1.2 SWOT-анализ.....	90
4.2 Планирование научно-исследовательской работы.....	92
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	92
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения НИР.....	92
4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования	93
4.3 Бюджет НТИ	95
4.3.1 Расчет материальных затрат	96
4.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	97
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы.....	98
4.3.4 Дополнительная заработная плата	100
4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	101
4.3.6 Накладные расходы.....	101
4.3.7 Формирование бюджета затрат НТИ	102
4.4 Организационная структура НТИ	102
4.5 Матрица ответственности НТИ	103
4.6 Оценка научно-технического эффекта.....	103
5 Социальная ответственность	107
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов при работе в лаборатории	107
5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ВЧФ- плазмотроне и ПЭВМ	109
5.2.1 Организационные мероприятия.....	109
5.2.2 Технические мероприятия.....	109

5.2.3 Условия безопасности работы	112
5.3 Требования безопасности при выполнении работ в химических лабораториях.....	115
5.3.1 Общие требования.....	115
5.3.2 Характеристика вредных веществ.....	116
5.4 Электробезопасность	118
5.5 Пожарная и взрывная безопасность	119
Заключение	122
Список публикаций студента.....	123
Список использованных источников	125
Приложение А	128
A.1 Vom Urangestein zum Urankonzentrat.....	130
A.2 Vom Urankonzentrat zum angereicherten Uran	130
A.3 Abgereichertem Uranhexafluorid.....	132
A.4 Brennelementherstellung.....	134
A.5 Entsorgung radioaktiver Abfälle	135
A.6 Wiederaufarbeitung radioaktiver Abfälle	136
Zusammenfassung.....	138
Verzeichnis der benutzten Quellen	139
Приложение Б.....	140
Приложение В.....	142
Приложение Г	145
Приложение Д.....	147

Введение

Технология разделения изотопов урана, основанная на применении газовых центрифуг, позволяет извлекать основную массу изотопа уран-235 из гексафторида урана (ГФУ), давая в качестве отхода обедненный по изотопу уран-235 («отвальный») гексафторид урана (ОГФУ). Процесс накопления ОГФУ продолжается в странах, обладающих разделительной технологией, с 1950 года. [1]. За это время на отвальных полях во всем мире накопились миллионы тонн ОГФУ.

Актуальность проблемы ОГФУ определяется экологическими и экономическими факторами. Экологические проблемы возникли из потенциальной и фактической опасности хранения громадных масс летучего радиоактивного фтористого продукта в стальных баллонах под открытым небом. Экономические проблемы определяются основными факторами: хранение ОГФУ требует больших эксплуатационных затрат на содержание и расширение отвальных полей, изготовление и ремонт баллонов; эти затраты еще более возрастут в недалеком будущем, когда встанут вопросы о цене омертвленных земельных участков и о стоимости их рекультивации [2].

На сегодняшний день единственной технологией конверсии ОГФУ является технология его последовательного гидролиза до уранилфторида и пирогидролиза уранилфторида до закиси-окиси урана (ЗОУ) в различном аппаратном исполнении [3]. Альтернативным методом может являться технология конверсии ОГФУ в различных плазменных теплоносителях.

С учетом вышесказанного ясно, что поиск новых решений данной проблемы является актуальным. В данной выпускной квалификационной работе будут представлены результаты исследований плазменной конверсии ОГФУ в различных плазменных теплоносителях.

Основными достоинствами плазменного метода является: высокая скорость процесса; большое число каналов воздействия на физико-химические свойства целевых продуктов.

Цель данной работы заключается в исследовании возможности энергоэффективной плазменной конверсии ОГФУ в различных плазменных теплоносителях.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

- провести обзор и анализ основных методов конверсии ОГФУ;
- провести термодинамическое моделирование процесса плазменной конверсии ОГФУ с различными плазменными теплоносителями. Определение оптимальных режимов плазменной конверсии ОГФУ, обеспечивающих получение целевых продуктов.
- провести экспериментальное подтверждение оптимальных режимов процесса плазменной конверсии ОГФУ на примере переработки уранил нитрата в воздушной плазме на модельной горючей водно-солеорганической композиции.
- оценить удельные энергозатраты на плазменное получение 1 кг целевого продукта. Оценить эффективность плазменной конверсии ОГФУ.

1 Обзор литературы

1.1 «Мокрая» конверсия ГФУ до диоксида урана

В настоящее время на заводах зарубежных фирм, производящих ядерное топливо, используют три промышленных процесса получения порошка диоксида урана из гексафторида [4]:

- «мокрый» процесс с осаждением промежуточного соединения $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ – ADU процесс (ammoniumdiuranate);
- «мокрый» процесс с осаждением промежуточного соединения $(\text{NH}_4)_4\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$ – AUC процесс (ammoniumuranylcarbonate);
- «сухой» процесс прямого восстановления – DC процесс (directconversion).

На рисунке 1.1 и 1.2 представлены технологические схемы получения ядерного топлива в виде порошка диоксида урана UO_2 «мокрым» способом по ADU (АДУ) и AUC (АУК) процессам.

Характеристика производства ядерного топлива в виде порошка диоксида урана (UO_2) из ГФУ «мокрым» способом с осаждением порошков АДУ (рис. 1.1). Производится сушка порошков АДУ при температуре равной 50°C . Далее проводится пирогидролиз порошков АДУ во вращающейся печи при температуре равной 450°C в атмосфере воздуха, пара и азота. Восстановление полученной закиси-окиси урана (U_3O_8) до диоксида урана проводится при температуре от 500 до 800°C . Изготовление таблеток из порошка диоксида урана: прессование; спекание производится при температуре больше 1600°C в печи непрерывного действия. Плотность полученных таблеток от 89 до 94 % от теоретической.

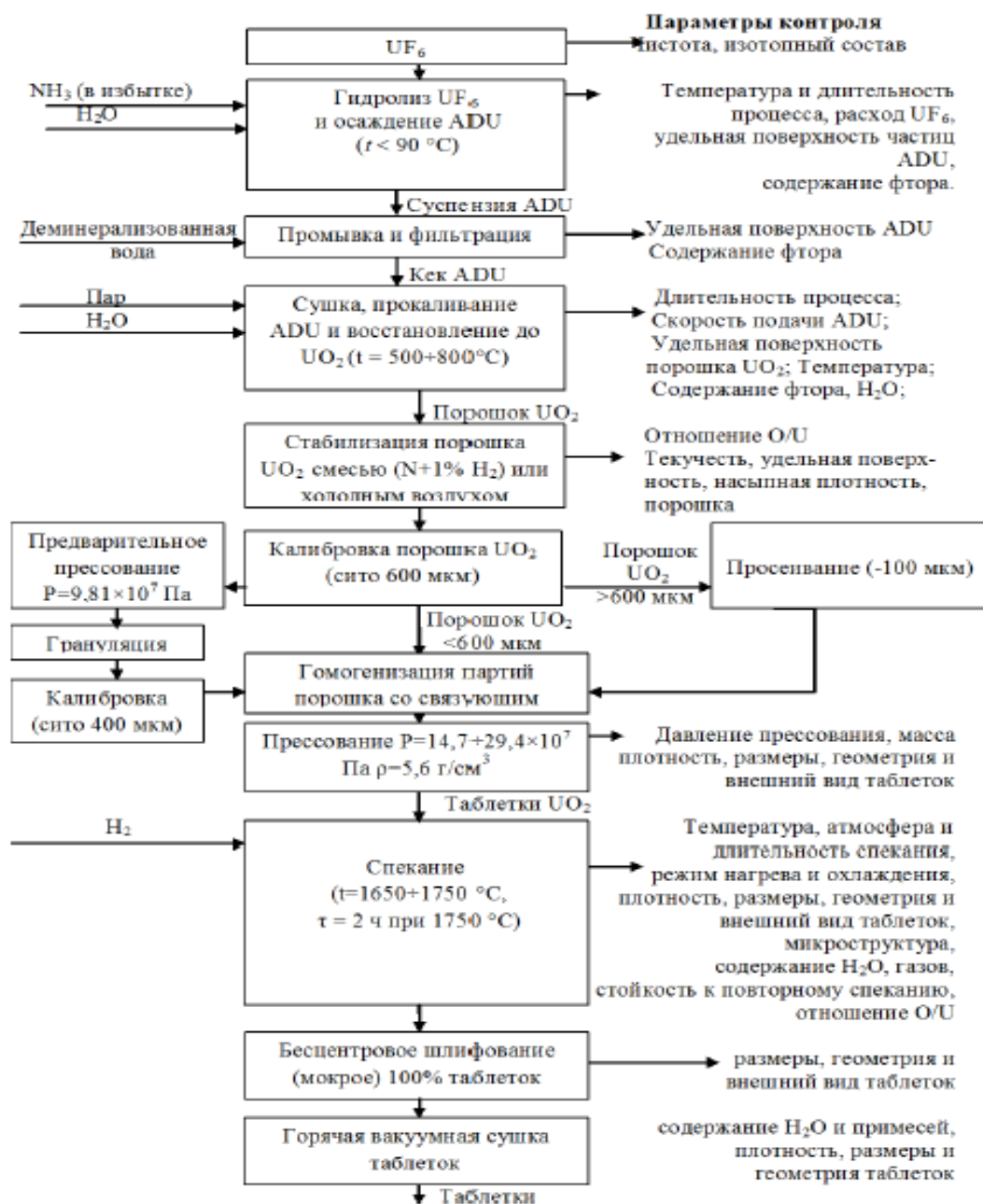


Рисунок 1.1 Технологическая схема изготовления ядерного топлива в виде диоксида урана с использованием усовершенствованного ADU-процесса (заводы фирмы «Дженерал электрик», США)

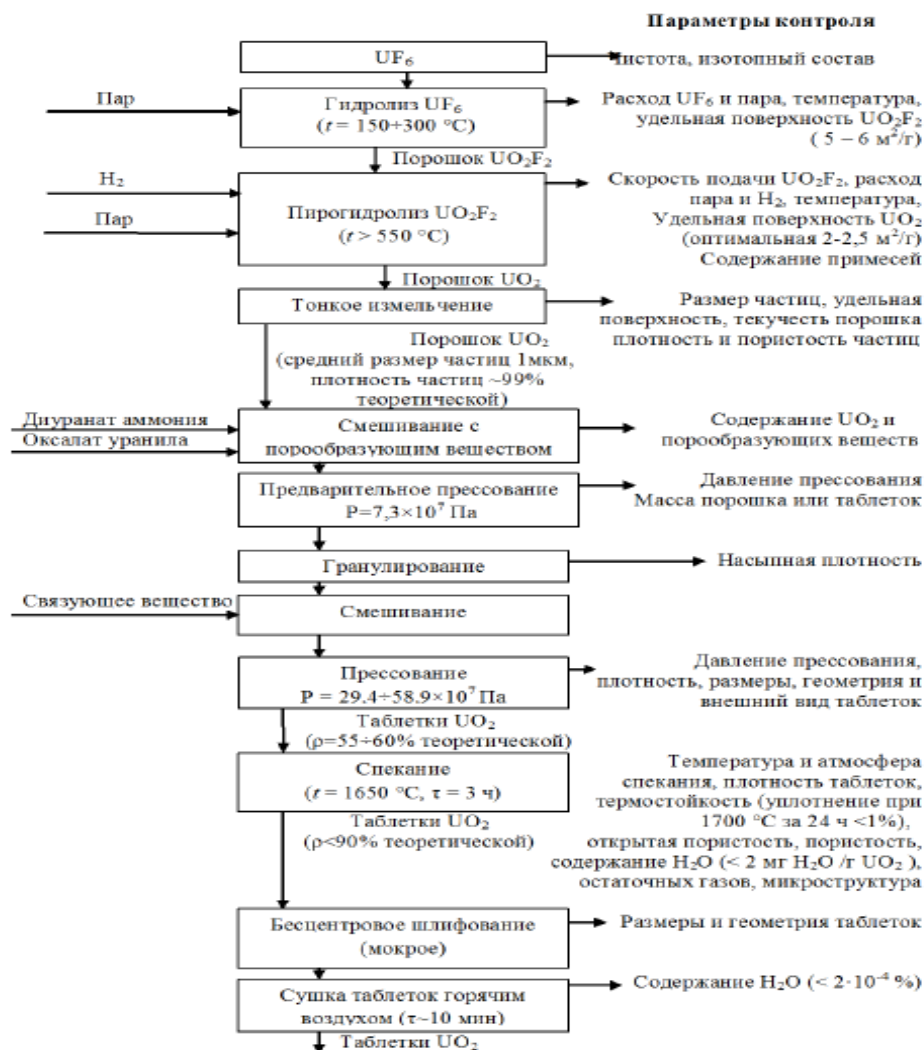


Рисунок 1.2 Технологическая схема изготовления ядерного топлива в виде диоксида урана с использованием AUC-процесса (заводы фирм «NUKEM» и «RBU», ФРГ)

Характеристика производства ядерного топлива в виде порошка диоксида урана из ГФУ «мокрым» способом с осаждением порошка AUC (рис. 1.2). Производится нагревание порошка AUC в печи с псевдоожиженным слоем с получением порошка уранилфторида (UO_2F_2). Далее проводится пирогидролиз порошка уранилфторида. Восстановление полученной закиси-оксида урана до диоксида урана проводится при температуре больше 550°C в течении 3-х часов. Изготовление таблеток из порошка диоксида урана включает прессование и спекание при температуре 1650°C в печи непрерывного действия. Плотность полученных таблеток от 92 до 93 % от теоретической.

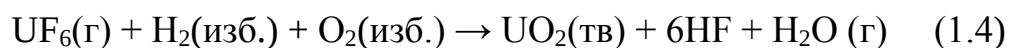
1.2 «Сухая» конверсия ГФУ до диоксида урана

В рамках программы исследования методов прямого получения тугоплавких соединений урана из газообразных галогенидов урана, выполнявшейся Ок-Риджской национальной лабораторией (шт. Теннесси, США), в 60-х годах был разработан способ конверсии ГФУ в диоксид урана в кислородно-водородном пламени. Впоследствии способ был запатентован фирмой «Дженерал электрик» (г. Сан-Хосе, шт. Калифорния). По первым буквам названия этой фирмы способ получил название GECO-процесса [4].

Цепочка превращений при кислородно-водородной конверсии ГФУ имеет следующий вид:



Суммарная реакция восстановительного гидролиза в кислородно-водородном пламени может быть записана в следующем виде:



В таблице 1.1 представлены данные расчета термодинамических величин реакций восстановительного гидролиза в кислородно-водородном пламени по реакциям (1.1), (1.2) и (1.3) соответственно. Высокое значение энергии Гиббса реакции восстановления ГФУ до тетрафторида урана (UF_4) дает основание полагать, что данная цепочка превращений через образование тетрафторида урана (1.4) с последующим гидролизом парами воды до диоксида урана при повышенных температурах наиболее благоприятна. Следует учитывать, что реакция гидролиза тетрафторида урана обратима, и в реакторе могут создаться условия, благоприятные для протекания обратной реакции фторирования диоксида урана с образованием тетрафторида урана: сравнительно низкие температуры и высокое парциальное давление паров фтористого водорода.

Ход изменений энергии Гиббса при повышении температуры, протекающих при гидролизе ГФУ парами воды, благоприятно сказывается на

глубине прохождения гидролиза и последующей реакции восстановления уранилфторида водородом. Необходимо отметить что, гидролиз уранилфторида до триоксида урана обратим и при относительно высоких температурах, протекает в прямом направлении.

В продуктах реакции пламенного реактора (температура приблизительно 1300 °С) обнаружены в конденсированной фазе UO_2 , UO_3 , UF_4 , $\text{U}(\text{OH})_4$, H_2O , UO_2F_2 . Основным элементом, загрязняющим конечный продукт, был фтор, содержание которого составляло от 4 до 8 %.

Содержание фтора в продукте, полученном пламенным пирогиогидролизом, значительно снижалось при термической обработке его в водороде при температуре 1000 °С и достигало значения менее $3 \cdot 10^{-3}$, что вполне удовлетворительно.

Известно, что уранилфторид восстанавливается водородом до тетрафторида урана при температуре от 600 до 1000 °С, а получаемый тетрафторид урана при этом далее не восстанавливается и не улетучивается. Поэтому возможный механизм глубокого обесфторирования продукта состоит в том, что тетрафторид урана гидролизует парами воды, источниками которой являются адсорбированная влага, продукт восстановления триоксида урана (UO_3) и продукт разложения гидроксида урана ($\text{U}(\text{OH})_4$).

Как показывает практика некоторых заводов, этот процесс непосредственного получения обесфторенного диоксида урана можно осуществлять в холодностеночном пламенном реакторе непрерывно и без вынужденных остановок и перебоев в работе.

Подача исходных продуктов организована следующим образом. Три газа ГФУ, кислород (O_2) и фтор (F_2) поступают по центральной трубке, а водород (H_2) – по кольцевому зазору; фтор подают только в самом начале для инициирования процесса взаимодействия ГФУ с водородом.

В 2013 г. в РФ на ПАО «Новосибирский завод химконцентратов» (ПАО «НЗХК») было освоено производство диоксида урана по «сухой» технологии фирмы «Siemens» закупленной во Франции у фирмы «Areva».

Теперь имеется возможность производства диоксида урана по двум технологиям: «мокрой» по ADU-процессу и «сухой» на установке, копирующей установку ПАО «Машиностроительный завод» (г. Электросталь) производительностью 400 тонн в год. Для обеспечения необходимой производительности 650 тонн в год к диоксиду урана, полученному «сухим» методом подмешивают 250 тонн диоксида урана, полученных «мокрым» методом.

Установка для получения керамического диоксида урана представлена на рисунке 1.3. Она состоит из реактора, выполненного в ядерно-безопасном исполнении с двумя реакционными зонами; верхней конической и нижней с газораспределительной решеткой, представляющую собой аппарат кипящего слоя. В верхней зоне практически мгновенно протекает высоко экзотермическая реакция пирогидролита ГФУ с парами воды при температуре 525 °С с образованием уранилфторида по реакции:



Образующиеся при этом вначале аэрозольные наносистемы с размерами десятков нанометров обладают большой поверхностной когезионной энергией, которая приводит к контакту тонких частиц и их коагуляции. В итоге из большого числа мелких частиц образуются агрегаты со средними размерами преобладающих фракций от 50 до 100 мкм.

В результате укрупнения и увеличения массы частиц они опускаются вниз на газораспределительную решетку, где под воздействием аэродинамических сил, предварительно нагретым газовым потоком из водорода, азота и паров воды находятся в псевдооживленном состоянии. При этом протекает экзотермическая реакция:



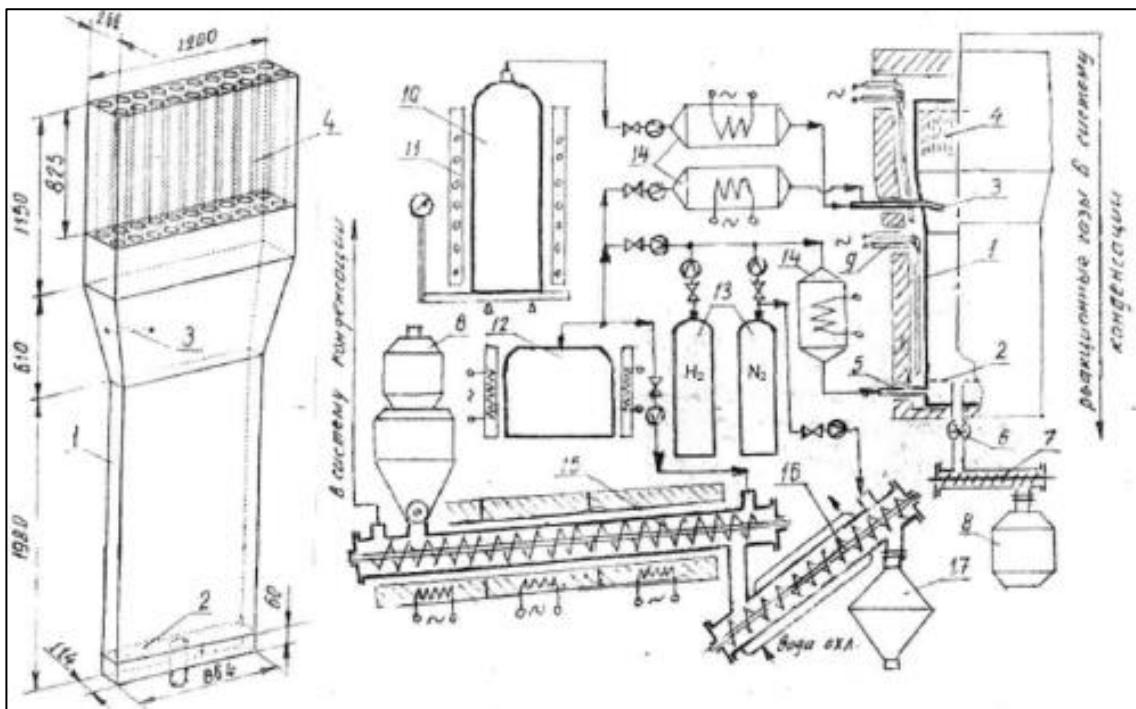


Рисунок 1.3 Реактор и аппаратурно-технологическая схема установки получения керамического диоксида урана «сухим» методом: 1 – корпус реактора; 2 – газораспределительная решетка с патрубком выгрузки диоксида урана; 3 – сопло ввода паров ГФУ и воды; 4 – металлокерамические фильтры; 5 – патрубок ввода перегретых паров воды, водорода, азота; 6 – секторный питатель; 7 – шнек выгрузки диоксида урана; 8 – контейнер с диоксидом урана; 9 – ТЭНы; 10 – ёмкость с ГФУ; 11 – индукционная печь с тензовесами; 12 – генератор пара; 13 – баллоны с водородом и азотом; 14 – перегреватели газов и их смесей; 15 – шнековая печь для обесфторивания диоксида урана; 16 – водоохлаждаемый шнек для стабилизации готового продукта; 17 – ёмкость с готовым продуктом в виде диоксида урана

По мере возрастания гидравлического сопротивления (перепада давления) кипящего слоя выше заданного, связанного с образованием диоксида урана, включается секторный питатель, после которого шнеком выгружается в контейнер готового продукта.

Полученный диоксид урана содержит от 0,2 до 0,5 % масс. фтора при ТУ не ниже 0,015 %, поэтому необходима дополнительная операция по обесфториванию диоксид урана. Обесфторивание проводят в горизонтальной

шнековой печи с тремя зонами нагрева – 450, 600 и 750 °С в атмосфере паров воды в течение одного часа. После обесфторивания порошок диоксид урана подвергают так называемой стабилизации в наклонном водоохлаждаемом шнековом аппарате в атмосфере азота. Готовый продукт направляют на стадию таблетирования.

Для обеспечения заданной производительности 400 тонн в год по диоксиду урана на установке одновременно в эксплуатации находятся два двузонных реактора с общим узлом обесфторивания и стабилизации.

Основные недостатки этого метода:

- аппарат ВПГ не оптимизирован с точки зрения гидродинамики и имеет много «мертвых» зон, которые приводят к залипанию продукта на стенках, вследствие этого происходит периодическая остановка аппарата для очистки, а продукт невозможно обесфторить до требуемой кондиции;
- сложная система фильтрации на металлокерамических фильтрах требует постоянной очистки «обратной отдувки», что приводит к нарушению гидродинамического режима;
- шнековая печь для обесфторивания является малопродуктивным аппаратом, поскольку не может обеспечить необходимый контакт фаз;
- существующая конструкция аппарата принципиально не может быть увеличена по производительности, вследствие этого возникает необходимость монтажа нескольких однотипных аппаратов, что пропорционально увеличивает эксплуатационные расходы, а соответственно не позволяет снизить себестоимость диоксида урана с увеличением производительности.

1.3 Современные технологии переработки ОГФУ

Аммиачный гидролиз ОГФУ. Метод основан на гидролизе ОГФУ до уранилфторида и плавиковой кислоты с последующей его обработкой аммиаком

или аммиачной водой. Уран осаждается в виде полиуранатов аммония, которые отфильтровываются в виде желтого кека и прокаливаются до закиси-окиси урана. Жидкая фаза, представляющая раствор фторида аммония упаривается и кристаллизуется, фтор-ион выводится в виде кристаллического фторида или бифторида аммония.

Восстановление ОГФУ органическими соединениями. В качестве восстановителя используются трихлорэтилен (C_2HCl_3) или перхлорэтилен (C_2Cl_4) с получением тетрафторида урана и синтезом озонобезопасных хладонов из получаемых фторорганических соединений. В дальнейшем тетрафторид урана может быть восстановлен до закиси-окиси урана либо пирогидролитическим методом, либо оксидами кремния (SiO_2), молибдена (MoO_3), бора (B_2O_3). Полученные фториды кремния, молибдена и бора далее могут быть восстановлены в плазме с получением особо чистых веществ. Эта технология была ранее освоена в России 80-х годах XX столетия в промышленных масштабах – до 2 тысяч тонн урана в год, но по ряду причин, включая экономические и технические, эти работы не получили пока дальнейшего развития.

Водородное восстановление ОГФУ. Восстановление ОГФУ во фторводородном пламени. Технология не очень успешно реализуется на АО «Ангарский электролизный химический комбинат» (АО «АЭХК») на установке «Кедр». Отечественная технология лучше адаптирована под наши конструкционные материалы и рынки. В качестве продуктов возможно получить безводный фтористый водород (HF) и вернуть его в ЯТЦ. Проблемы установки «Кедр» заключаются в том, что регенерируется только 30 % фтор-иона, а 70 % остается связанным в тетрафториде урана, что также приводит к снижению желаемых экономических показателей. Фтористый водород, полученный на установке «Кедр», не может конкурировать с продуктами, полученными в результате сульфатизации природного плавикового шпата.

Пирогидролитический водным паром. Технология и установка «W-ЭХЗ» закуплена у французской фирмы «AREVA» и реализована на АО «ПО

«Электрохимический завод» (г. Зеленогорск). Несмотря на внедрение данной технологии она не оправдала желаемые экономические показатели по многим причинам. Аппаратура подвергается коррозионному воздействию агрессивных сред, выполнена из дорогостоящих сплавов, не производимых в РФ, гарантийный срок службы оборудования 2 года, затраты на капитальный ремонт весьма высоки. Основной проблемой установки «W-ЭХЗ» является то, что фтор-ион выделяется в виде 70 % плавиковой кислоты, для которого в России отсутствуют необходимые железнодорожные цистерны и непосредственное использование которого в народном хозяйстве затруднено. Получение безводного фтористого водорода из плавиковой кислоты нерентабельно, поскольку большая её часть остаётся в виде 40 % плавиковой кислоты, сбыт которой также затруднён.

Плазмохимическая конверсия ОГФУ. Конверсия в дуговой плазме приводит к получению закиси-окиси урана в случае водяной плазмы или тетрафторида урана в случае водородной плазмы. Наибольший интерес представляет собой восстановление в водяной плазме. Преимущества процесса – его высокая интенсивность (производительность) и перевод ОГФУ в более удобную для хранения оксидную форму по сравнению с тетрафторидом урана. Относительный недостаток – образование наряду с 97-98 %-ным фтористым водородом 40 %-ной плавиковой кислоты.

1.3.1 Водородное восстановление ОГФУ

В основу установки «Кедр» положено восстановление ОГФУ до тетрафторида урана во фторводородном пламени (рис.1.4).

Первая вспомогательная экзотермическая реакция ($H_2 + F_2 = 2 HF + 536$ кДж/моль) сопровождается выделением тепла, необходимого для поддержания фторводородного пламени. При температуре пламени от 1100 до 1300 °С происходит основная экзотермическая реакция восстановления ОГФУ до

тетрафторида урана с образованием безводного фтористого водорода ($\text{UF}_6 + \text{H}_2 = \text{UF}_4 + 2\text{HF} + 292 \text{ кДж/моль}$).

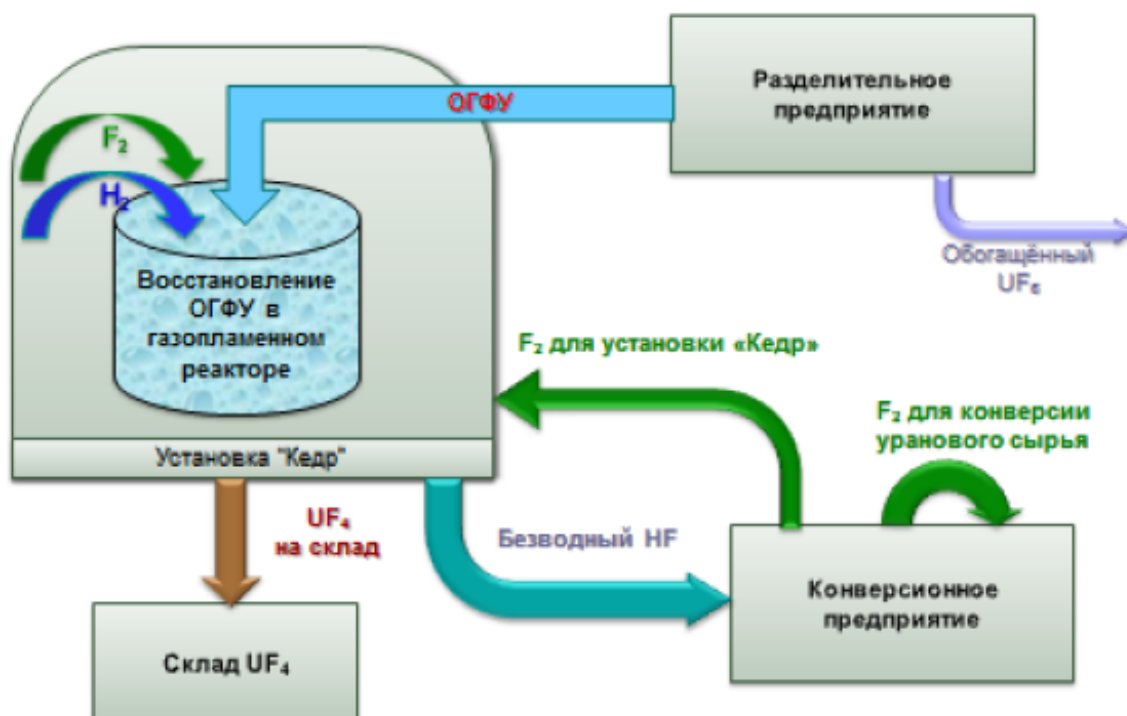


Рисунок 1.4 Схема установки «Кедр»

Порошкообразный тетрафторид урана поступает в контейнеры для последующего хранения, а газовая «взвесь» – фтористый водород, избыточный водород и не осевший в основном реакторе пылеобразный тетрафторид урана поступает на металлокерамические фильтры, где осаждается тетрафторид урана, а затем фтористый водород конденсируется жидким азотом. Реакции проводятся при давлении вплоть до атмосферного.

В результате химического реагирования вводимых компонентов по оси реактора образуется активная зона в форме факела. Поджиг факела производят при давлении в реакторе от 0,05 до 0,1 ата.

Факел после зажигания при низком давлении (до 0,1 ата) представляет собой голубовато-зелёный шнур диаметром приблизительно 10 мм и длиной от 250 до 300 мм. При повышении давления в реакторе шнуровой факел укорачивается и расширяется, переходя в «жало» с увеличенной яркостью.

Подачу ОГФУ в реактор восстановления осуществляют после зажигания фтороводородного факела. При этом резко увеличивается яркость свечения пламени. При низком давлении (режим «шнурового факела») наблюдается значительный проскок ОГФУ: рассеивается по объёму реактора и выносится из зоны факела в холодные зоны реактора, при этом величина его насыпной плотности весьма низка (не более $0,4 \text{ г/см}^3$) [5].

При повышении давления в реакторе от 0,4 до 0,8 атм. факел принимает форму конуса с расширением его до стенок реактора, то есть реакционная зона увеличивается, приобретая объёмный характер. Температура стенок реактора возрастает от 90 до 125 °С, и зона нагрева расширяется до верхней части реактора, что можно объяснить перемещением продуктов реакции в верхнюю часть реактора за счёт возникающих конвективных потоков. В этих условиях ОГФУ восстанавливается практически полностью до тетрафторида урана, и насыпная плотность получаемого порошка возрастает до $2,4 \text{ г/см}^3$ [6].

С гидродинамической точки зрения процесс горения в режиме шнурового факела представляет собой ламинарную струю реагирующих газов с весьма низкими коэффициентами тепло- и массопередачи.

С увеличением давления в конусном (объёмном) факеле процессы массо- и теплообмена несколько возрастают, но, по сравнению с другими распространёнными в технике гидродинамическими способами организации гетерогенных процессов, всё равно остаются относительно низкими.

Основным недостатком такого способа организации процесса является мало интенсивное смешение реагентов и низкая теплонапряжённость.

Скорость смешения вводимых компонентов ограничивает интенсивность суммарного процесса и определяет диффузионный характер реакции восстановления в конструкциях такого типа.

В этих условиях основным направлением интенсификации процесса является перевод его в кинетическую область реагирования, когда скорости смешения реагентов достаточно высоки и интенсивность суммарного процесса лимитируется скоростью протекания собственно химической реакции.

Как известно [7], интенсивность процессов гетерогенного реагирования по их гидродинамической организации возрастает в следующем ряду:

- ламинарный поток реагирующих компонентов;
- газовзвесь (падающий слой);
- кипящий слой;
- плотный слой;
- вихревая камера.

С этих позиций процесс восстановления ОГФУ в реакторе с холодными стенками находится на начальных позициях вышеприведённого ряда и характеризуется одними из наиболее низких критериев интенсивности.

До настоящего времени установка «Кедр» не дала запланированного экономического эффекта и её полномасштабное промышленное внедрение остается под вопросом.

1.3.2 Плазменная конверсия ОГФУ в пароводяной плазме

Пароводяная плазма используется для реализации данного процесса потому, что даёт возможность осуществить высокотемпературный гидролиз ОГФУ при соотношении реагентов, близком к стехиометрическому: в этом случае можно получить закись-окись урана и практически безводный фтористый водород [8-15]. Безводный фтористый водород является сырьём для получения элементного фтора электролитическим методом.

Во время реализации данного процесса прежде всего нужно получить поток (U-F-O-H)-плазмы – это одна из уран-фторных технологических плазм, генерируемых электрическими разрядами или в смеси ОГФУ с различными технологическими газами, или смешением плазмы тех же технологических газов с ОГФУ. В данном случае (U-F-O-H)-плазма генерировалась смешением потока ОГФУ с потоком водяной (H-OH)-плазмы, получаемой электродуговым разрядом в перегретом водяном паре.

Рассмотрим термодинамику образования (U-F-O-H)-плазмы. Равновесие системы UF_6 -НОН в области высоких температур рассчитано в работах [8-10]. Система содержит 4 элемента и 22 компонента, из которых 16 – газообразные, 6 – конденсированные: $\text{UF}_6(\text{g})$, $\text{UF}_5(\text{g})$, $\text{UF}_4(\text{g})$, $\text{UO}_2\text{F}_2(\text{g})$, $\text{UO}_2(\text{g})$, $\text{F}_2(\text{g})$, $\text{O}_2(\text{g})$, $\text{HF}(\text{g})$, $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$, $\text{H}_2(\text{g})$, $\text{H}(\text{g})$, $\text{UF}_4(\text{c})$, $\text{UO}_2\text{F}_2(\text{c})$, $\text{UO}_3(\text{c})$, $\text{U}_3\text{O}_8(\text{c})$, $\text{UO}_2(\text{c})$, $\text{UO}(\text{g})$, $\text{U}(\text{g})$, $\text{U}(\text{c})$, $\text{O}(\text{g})$, $\text{F}(\text{g})$, $\text{OH}(\text{g})$.

Уравнения, определяющие условия минимума полного термодинамического потенциала в этой системе, образуют систему из двадцати восьми нелинейных уравнений, которую решали методом Ньютона. Диапазон давлений составляет от $1,03 \cdot 10^4$ до $1,03 \cdot 10^5$ Па, интервал температур – от 800 до 4000 К, исходное мольное отношение компонентов n ($\text{НОН}/\text{UF}_6$) равно 3 (стехиометрическое), 6 и 12.

На рисунке 1.5 показано влияние температуры на состав реагирующей смеси $\text{UF}_6(\text{g}) + 3(\text{H}-\text{OH})$ при давлении 53 кПа.

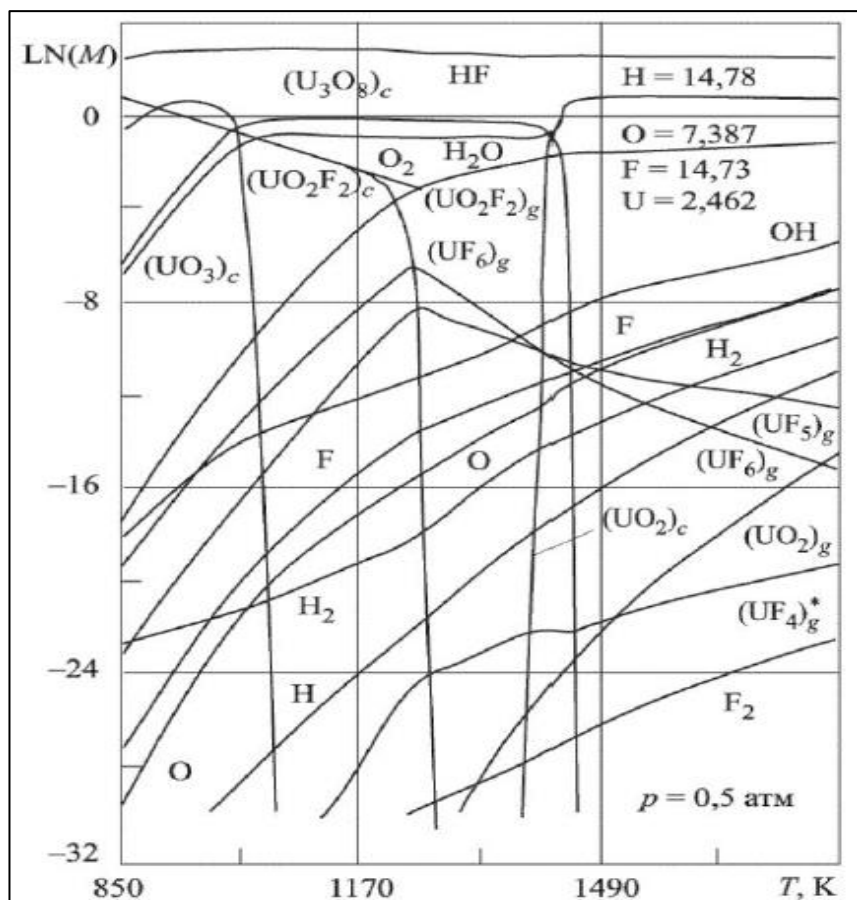


Рисунок 1.5 Влияние температуры на состав реагирующей смеси $\text{UF}_6(\text{g}) + 3(\text{H}-\text{OH})$: $n = 3,0$; $p = 53$ кПа

Уже при температуре равной 850 К система практически не содержит исходного вещества. При температурах выше 1000 К основная часть фтора находится в виде газообразного фтористого водорода; небольшая часть фтора – в виде уранилфторида, сначала конденсированного, затем газообразного. При температуре около 1450 К практически весь уран находится в виде закиси-окиси урана. Возрастание температуры ведет к образованию оксидов урана с меньшим элементным содержанием кислорода. Повышение давления способствует снижению выхода фтора во фтористый водород и урана в оксиды урана; зато увеличивается выход газообразного уранилфторида. Повышение концентрации водяного пара в реагирующей смеси приводит к уменьшению содержания фторидов урана в продуктах реакции.

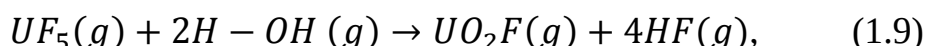
Рассмотрим детальную схему высокотемпературной конверсии газообразного ОГФУ компонентами (H-OH)-плазмы. Она описывается набором уравнений химических реакций и фазовых переходов:



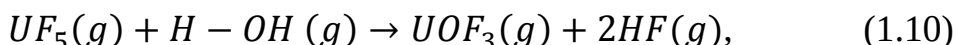
$$\Delta H = 54,8 \text{ кДж}, \Delta S = 145,1 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



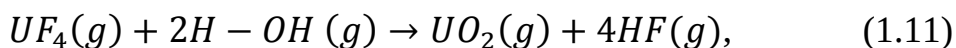
$$\Delta H = 123,0 \text{ кДж}, \Delta S = 138,1 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



$$\Delta H = 342,3 \text{ кДж}, \Delta S = 259,7 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



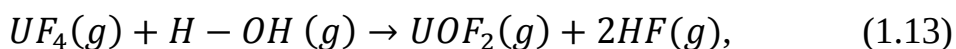
$$\Delta H = 134,4 \text{ кДж}, \Delta S = 125,3 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



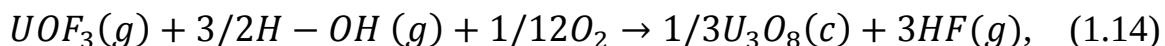
$$\Delta H = 518,8 \text{ кДж}, \Delta S = 220,5 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



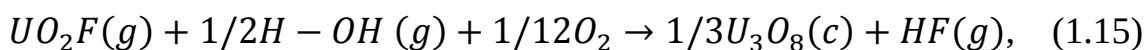
$$\Delta H = 250,5 \text{ кДж}, \Delta S = 125,6 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



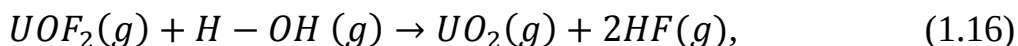
$$\Delta H = 185,9 \text{ кДж}, \Delta S = 132,0 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



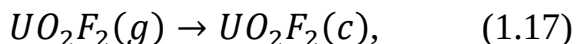
$$\Delta H = 138 \text{ кДж}, \Delta S = -38 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



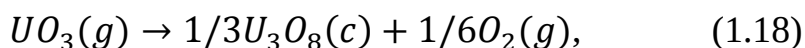
$$\Delta H = 346 \text{ кДж}, \Delta S = -172 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



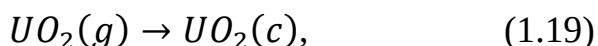
$$\Delta H = 332,9 \text{ кДж}, \Delta S = 88,4 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



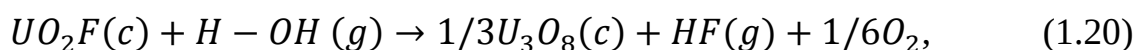
$$\Delta H = -300,0 \text{ кДж}, \Delta S = -207,22 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



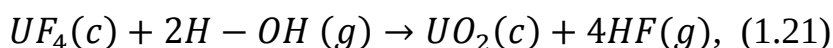
$$\Delta H = -392,4 \text{ кДж}, \Delta S = -181,2 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



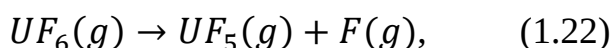
$$\Delta H = -605,0 \text{ кДж}, \Delta S = -189,3 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



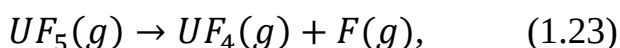
$$\Delta H = 157,2 \text{ кДж}, \Delta S = 151,5 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



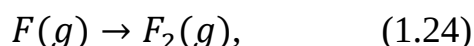
$$\Delta H = 225,9 \text{ кДж}, \Delta S = 242,6 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



$$\Delta H = 278,2 \text{ кДж}, \Delta S = 133,0 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



$$\Delta H = 423,1 \text{ кДж}, \Delta S = 136,0 \text{ Дж/м} \cdot \text{К};$$



$$\Delta H = 158,8 \text{ кДж}, \Delta S = -114,7 \text{ Дж/м} \cdot \text{К}.$$

Из анализа равновесных составов (рис. 1.5) можно сделать вывод, что вклад реакций (1.22), (1.23) и (1.24) в механизм конверсии ОГФУ водяным паром пренебрежимо мал. Этот вывод подтверждается результатами расчета термодинамической устойчивости молекул фторидов урана [16, 17]. Так как в основном фторид урана (UF_5) появляется при температурах больше 2500 К, то вклад реакций (1.9), (1.10), (1.11), (1.13), (1.14) и (1.15) тоже мал. В интервале температур от 1030 до 1430 К концентрация уранилфторида ниже концентрации оксидов урана, при этом основная масса урана содержится в закиси-окиси урана, а основная масса фтора – во фтористом водороде.

Оксифториды (UOF_3), (UO_2F), (UOF_2), (UOF) образуются в газовой фазе и неустойчивы при конденсации. Исходя из этого, механизм процесса конверсии ОГФУ можно описать шестью уравнениями: (1.7), (1.8), (1.12), (1.17), (1.18) и (1.20).

Для того чтобы получить безводный фтористый водород из первичного продукта плазменной конверсии ОГФУ водяным паром, можно применить ректификацию. Тогда получим плазменно-ректификационную технологию конверсии ОГФУ, общая схема которой представлена на рисунке 1.6.

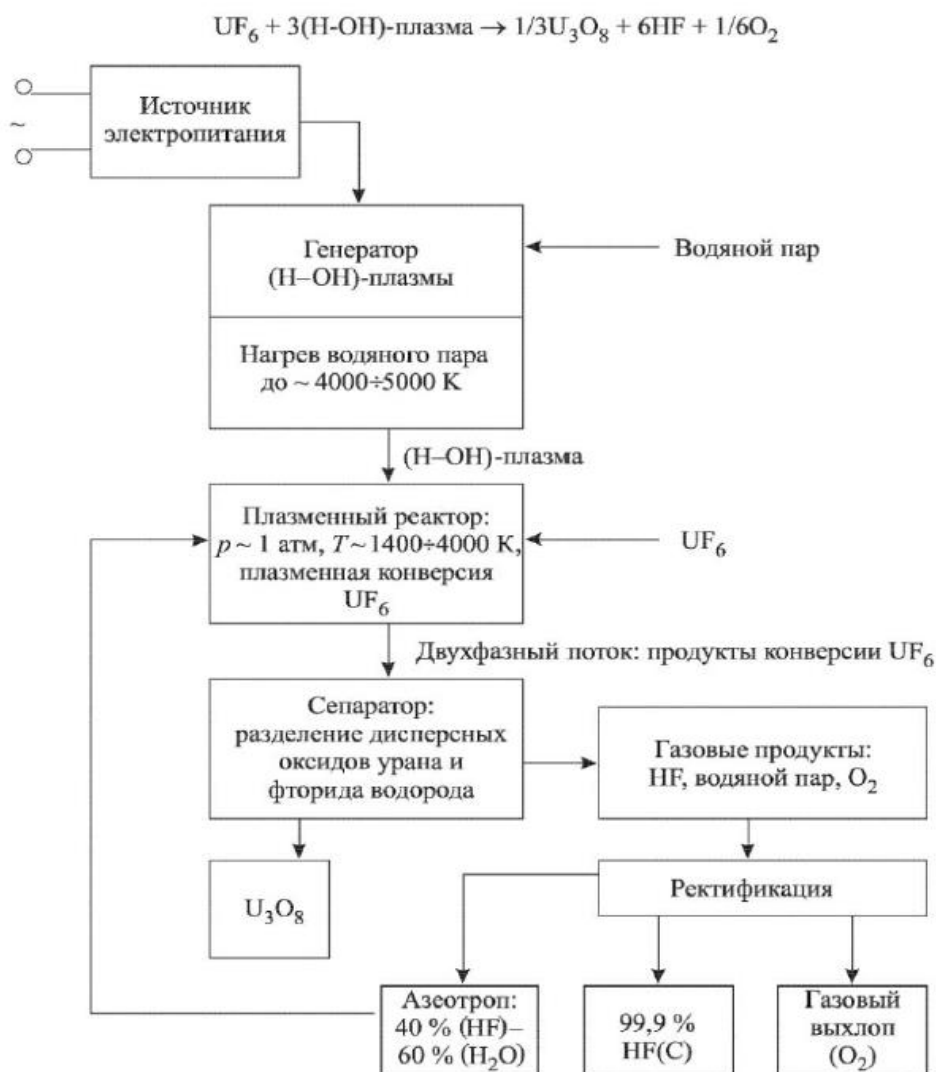


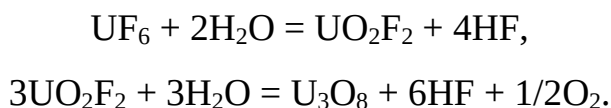
Рисунок 1.6 Общая схема плазменно-ректификационной технологии конверсии ОГФУ

В результате ректификации концентрированной фтористоводородной кислоты с содержанием от 80 до 95 % фтористого водорода получается два

продукта: безводный фтористый водород (99,99 %) и кубовый остаток: азеотроп (40 % HF – 60 % H₂O). Этот остаток концентрирует в себе и возможный проскок урана через металлокерамический фильтр в виде аэрозолей.

В установке «W-ЭХЗ» используется вышеописанный метод восстановления ОГФУ в пароводяной смеси с получением фтористоводородной кислоты и порошка закиси-окиси урана.

Сущность способа, используемого в установке «W-ЭХЗ», заключается во взаимодействии газообразного ОГФУ с водяным паром в головной части вращающегося трубчатого реактора с образованием уранилфторида, который по мере продвижения по реактору в условиях высоких температур конвертируется в закись-окись урана с помощью пароводяной смеси. В ней происходят следующие химические реакции:



Все управление технологическим процессом, за исключением отдельных ручных операций (таких, как замена контейнеров на узле испарения), осуществляется автоматизированной системой. Контроль и управление установкой производятся с центрального пульта двумя операторами. Программное управление позволяет выдерживать оптимальное соотношение реагентов в реакторе при оптимальных условиях (давление, температура, скорости вращения реторты и шнека реактора).

Технологический процесс включает следующие этапы (рис. 1.7):

- стальная емкость с ОГФУ поступает с площадки хранения в цех и устанавливается на коллектор узла испарения;
- в узле испарения ОГФУ переходит из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу, и поступает в реактор обесфторивания. В реактор также подаются водяной пар, водород и азот;
- на выходе из реактора получают два «потока»: порошок закиси-окиси урана и газообразный фтористый водород;

- закись-окись урана поступает на узел затаривания, откуда в контейнерах отправляется на специальный склад для длительного хранения;
- фтористый водород конденсируется и на узле корректировки полученная 70 % фтористоводородная кислота доводится до 40 % концентрации, а на узле ректификации получается безводный фтористый водород (ГОСТ 14022-88).

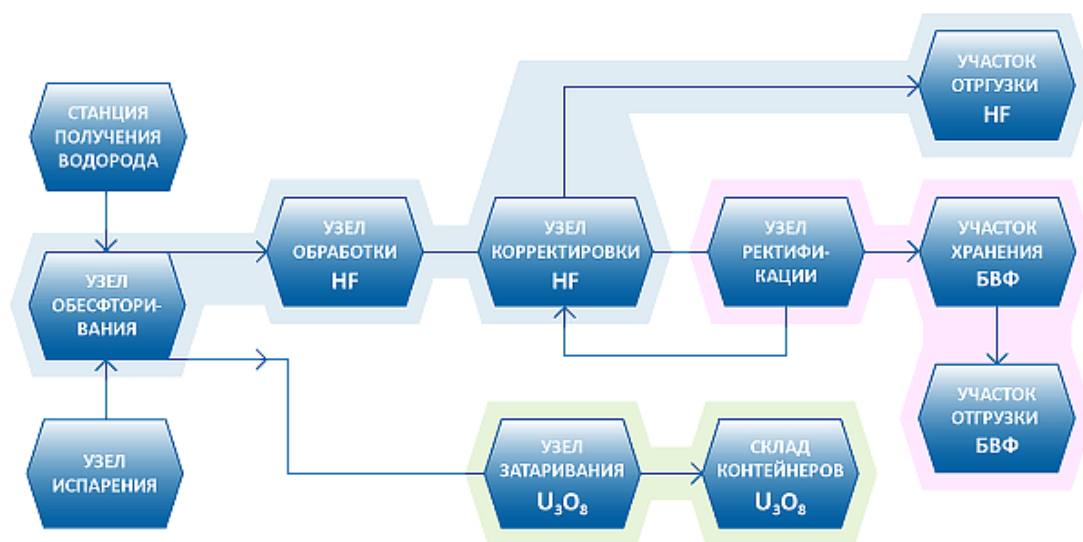


Рисунок 1.7 Структурная схема установки «W-ЭХЗ»

Ёмкость с ОГФУ нагревают, ОГФУ газифицируется и подаётся по коммуникациям на узел обесфторивания (рис. 1.8). По другим цепочкам в цех возвращается конденсат. Закись-окись урана собирается в специализированные контейнеры, а плавиковая кислота — в специализированные ёмкости. Недостатком способа является образование слабокислых растворов.



Рисунок 1.8 Схема установки «W-ЭХЗ»

Конверсия ОГФУ в закись-окись урана дает возможность безопасного длительного хранения энергетического ресурса до тех пор, пока он не будет востребован новыми энергетическими технологиями. Вложение средств в переработку ОГФУ – это инвестиции в здоровье, безопасность и энергообеспеченность будущих поколений.

1.3.3 Перспективные технологии конверсии ОГФУ

В XXI веке российские ученые вплотную занялись разработкой технологии конверсии ОГФУ. Рассмотрим некоторые из них.

Мазин В.И. в работе [18] предлагает способ конверсии ОГФУ в оксиды урана и фтористый водород водяным паром, «заключающемся в смешении первичной газовой смеси, состоящей из паров ОГФУ и газа-теплоносителя, и вторичной газовой смеси, содержащей пары воды, и включающем впрыск диспергированной жидкости в зону конверсии, в качестве жидкости используют водный раствор соли одного элемента из ряда U, Pu, Th, Eu, Gd и Er. При этом водный раствор дополнительно содержит соль аммония и/или карбамид. Кроме того, в зону конверсии дополнительно впрыскивают водный раствор аммиака, раствор соли аммония и/или карбамида. В качестве газа-теплоносителя

используют азот и/или аргон, нагретые до состояния низкотемпературной плазмы».

При нагреве паров ОГФУ в низкотемпературной плазме азота, аргона или их смеси образуется первичная высокотемпературная смесь газа-теплоносителя с продуктами диссоциации ОГФУ (UF_5 , UF_4 , UF_3 и F), которая не содержит аэрозольных частиц соединений урана. При смешении первичной высокотемпературной газовой смеси с диспергированным водным раствором соли по крайней мере одного элемента из ряда U, Pu, Th, Eu, Gd и Er происходят процессы нагрева и испарения капель раствора с последующим термическим разложением частиц солевого остатка, сопровождающиеся обогащением газовой фазы водяным паром и образованием высокодисперсных частиц оксида соответствующего металла. В результате взаимодействия паров воды с продуктами термической диссоциации ОГФУ в газовой фазе образуются фтористый водород и пары оксидов урана. Последние кристаллизуются путем конденсации на имеющейся в зоне конверсии заправке твердой фазы. Роль заправки выполняют частицы оксидов, образовавшиеся за счет термического разложения диспергированного раствора солей. В результате на выходе зоны конверсии образуется квазигомогенная смесь оксидов урана из ОГФУ с оксидами элементов из водного раствора солей.

Конверсия ОГФУ парами воды при температуре выше $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ сопровождается образованием оксидной композиции с молярным отношением O/U от 2,25 до 2,67 (в основном оксид урана (U_4O_9) и закись-окись урана). Введение в водный раствор соли аммония и/или карбамида создает в зоне конверсии газовую фазу, обогащенную водородом, поскольку при температуре выше $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении, близком к атмосферному, аммиак полностью диссоциирует на азот и водород [19, с. 200].

Обогащение газовой фазы водородом, с одной стороны, позволяет на $200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ снизить начало обратной реакции фторирования оксидов урана (металлов) газообразным фтористым водородом при охлаждении пылегазовой смеси и осуществлять отделение частиц оксидов урана при $500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ с

минимальным содержанием фтора в порошке, с другой, получить порошок оксидов урана, по составу близкий к диоксиду урана.

Группа ученых Седельников О.Л., Потоскаев Г.Г. и др. в работе [20] предлагают способ конверсии ОГФУ в оксиды урана, «включающий подачу в камеру сгорания, снабженную центральным каналом, водорода, кислородсодержащего газа и ОГФУ, который подают по центральному каналу, и взаимодействие ОГФУ с продуктами горения кислород-водородного пламени, взаимодействие ОГФУ с продуктами горения кислород-водородного пламени осуществляют при стехиометрическом соотношении водорода и кислорода или при избытке кислорода в факеле кислород-водородного пламени по отношению к водороду, причем кислородсодержащий газ подают в камеру сгорания вокруг центрального канала, водород – вокруг потока кислородсодержащего газа, а ОГФУ подают в камеру сгорания со скоростью истечения, большей скорости истечения в камеру сгорания кислородсодержащего газа и водорода».

За счет того, что взаимодействие ОГФУ с продуктами горения кислород-водородного пламени осуществляют при стехиометрическом соотношении водорода и кислорода или при избытке кислорода в факеле кислород-водородного пламени по отношению к водороду, происходит образование частиц оксидов урана с размером от 0,15 до 0,20 мкм. Причем экспериментально установлено, что для этого необходимо кислородсодержащий газ подавать в камеру сгорания вокруг центрального канала, т.е. использовать кислородсодержащий газ в качестве защитного газа. При этом водород подают вокруг потока кислородсодержащего газа, осуществляя тем самым защиту стенки камеры сгорания. Подача ОГФУ в камеру сгорания со скоростью истечения больше скорости истечения в камеру сгорания кислородсодержащего газа и водорода совместно с другими признаками обеспечивает получение технических результатов, т.к. объем факела кислород-водородного пламени находится в этом случае ниже сопла центрального канала и ОГФУ с большой скоростью вводится в факел пламени.

Кроме того, в качестве кислородсодержащего газа используют воздух, а взаимодействие ОГФУ с продуктами горения кислород-водородного пламени ведут при давлении $100 \pm 0,7$ кПа и подают в камеру сгорания ОГФУ, кислородсодержащий газ, водород и водяной пар в мольном соотношении $UF_6:O_2:H_2:H_2O = 1:(1,5-3):(3-6):(1,5-4,5)$.

Группой ученых Ольшанский В.А., Кобзарь Ю.Ф. и др. в работе [21] предложен способ конверсии ОГФУ в уранилфторид «путем его гидролиза водным раствором фтористого водорода при перемешивании с последующим отделением от уранилфторида гидролизу подвергают твердый ОГФУ при температуре от 20 до 30 °С и избыточном давлении до 100 КПа, при этом перемешивание реакционной смеси осуществляют в замкнутом объеме реактора за счет его вращения».

В предлагаемом способе взаимодействие ОГФУ с раствором фтористого водорода осуществляют при самопроизвольном изменении температуры от 20 до 30 °С в замкнутом объеме под избыточным давлением собственных паров до 100 КПа, при вращении реактора в течение 1 часа до полного протекания реакции гидролиза, что позволяет полностью исключить газоунос ОГФУ и фтористого водорода HF и прямой контакт чрезвычайно летучих и опасных в обращении веществ с окружающим пространством.

Группой ученых Атаханова Е.Л., Орехов В.Т. и др. разработан способ конверсии ОГФУ до тетрафторида урана и безводного фтористого водорода водородом [22], в котором «проводят нагревание ОГФУ до температуры 100 °С, смешивание его с сухим азотом до концентрации от 25 до 30 об.% и контактирование полученной газообразной смеси с атомарным водородом, причем в качестве источника атомарного водорода используют метанол в газовой фазе в интервале температур от 350 до 650 °С, при этом дополнительно тетрафторид урана превращают в диоксид урана и безводный фтористый водород.

Для получения тетрафторида урана и безводного фтористого водорода восстановление ОГФУ проводят при мольном соотношении $CH_3OH:UF_6 \geq 0,5$ в

интервале температур от 350 до 450 °С. Для получения диоксида урана и безводного фтористого водорода из тетрафторида урана процесс проводят при мольном соотношении $\text{CH}_3\text{OH}:\text{UF}_6 \geq 3,0$ в интервале температур от 550 до 650 °С. Газообразные исходные реагенты разбавляют инертным газом до 25 об. %.

2 Расчет и аналитика

2.1 Методы расчета равновесных составов продуктов плазмохимических процессов

Разработка технологических плазмохимических процессов и установок для их реализации обычно начинается с термодинамического расчета. При анализе квазиравновесных плазмохимических процессов последние позволяют определить равновесный состав продуктов химических реакций при различных параметрах состояния, энергозатраты на единицу целевого продукта; найти режимы, при которых содержание целевого продукта максимально при минимальных затратах или минимальном загрязнении продуктами побочных реакций; определить влияние различных добавок на равновесную концентрацию целевого продукта и т. д. Знание указанных величин помогает найти оптимальные технологические параметры процесса.

Система уравнений химического равновесия составляется с помощью [23]:

- первого вариационного принципа химической термодинамики, заключающегося в отыскании равновесного состава из условий экстремальности характеристических функций;
- второго вариационного принципа химической термодинамики, согласно которому из всех возможных значений энергии U те из них, которые максимизируют суммарный вклад отдельных атомов в систему, соответствует равновесным значениям u_i (u_i – энергия, вносимая каждым атомом в систему);

– метода, основанного на использовании закона действующих масс (метод констант равновесия).

В настоящее время метод констант равновесия находит широкое применение в практике термодинамических расчетов плазмохимических процессов. Расчеты равновесных составов заключаются в данном случае в решении системы уравнений, включающей:

1. i уравнений закона действующих масс –

$$p_a^m \cdot p_b^n \cdot p_c^l / p_j = K_{pj}, \quad (2.1.1)$$

2. уравнение полного давления –

$$p_a + p_b + p_c + \sum_{j=1}^l p_j = p, \quad (2.1.2)$$

3. уравнения элементарного баланса –

$$\frac{p_a + \sum_{j=1}^l m_j^a \cdot p_j^a}{p_b + \sum_{j=1}^l n_j^b \cdot p_j^b} = \alpha, \quad (2.1.3)$$

$$\frac{p_a + \sum_{j=1}^l m_j^a \cdot p_j^a}{p_c + \sum_{j=1}^l l_j^c \cdot p_j^c} = \beta, \quad (2.1.4)$$

где i – рассматриваемые соединения;

p_a, p_b, p_c, p_j – парциальные давления атомарных компонентов и j -го компонента состава $a_m b_n c_l$;

K_{pj} – константа равновесия данного вещества с атомарными продуктами разложения.

При исследовании сложных систем большое значение приобретает правило фаз, позволяющее определить число независимых переменных f (термодинамических степеней свободы), произвольное изменение которых не нарушает фазового равновесия [23]:

$$f = N - \Phi + 2 - n, \quad (2.1.5)$$

где N – число компонентов, при плазменных температурах равное числу разнородных атомов;

Φ – число фаз, которое находится по формуле:

$$\Phi = l + k, \quad (2.1.6)$$

k – число конденсированных фаз;

n – число дополнительных уравнений связи, налагаемых условиями проведения взаимодействия (в нашем случае это уравнение элементарного баланса), $n = N - 1$.

Тогда:

$$f = N - 1 - k + 2 - N + 1 = 2 - k. \quad (2.1.7)$$

При отсутствии конденсированных фаз ($k = 0$) результат решения получается в виде зависимости парциального давления каждого компонента от температуры и давления:

$$f = 2, p_i = F(T, p). \quad (2.1.8)$$

При наличии конденсированных компонентов в системе ($k = 1$) концентрации компонентов однозначно определяются температурой ($f = 1$). Это отражается на методике расчета. Вводится ограничение $p_j < p_j^0$, где p_j^0 – давление j -го вещества над конденсированной фазой при данной температуре [23]. Уравнения (2.1.2), (2.1.3) и (2.1.4) заменяются уравнениями вида:

$$\sum_{j=1}^d a' n_j + \sum_{j=1}^g a' n_{js} = C_n, (1 \leq n \leq q) \quad (2.1.9)$$

$$\sum_{j=1} n_j = N, \quad (2.1.10)$$

$$p_j^0 = \frac{p}{N} n_j, (1 \leq n \leq g) \quad (2.1.11)$$

где n_j и n_{js} – числа молей соответствующего компонента в газовой конденсированной фазах;

N – общее число молей всех компонентов в газовой фазе;

d – число компонентов в газовой фазе;

g – число компонентов, которые могут присутствовать в конденсированной фазе;

q – число элементов, образующих систему;

a' – матрица стехиометрических коэффициентов реакций диссоциации сложных веществ;

C_n – число атомов элемента n в системе, деленное на число Авогадро;

p_j^0 – парциальное давление насыщения над соответствующей конденсированной фазой.

Расчет процессов получения различных конденсированных продуктов по этой программе показал её универсальность и надежность.

Второй метод (первый вариационный принцип химической термодинамики) расчета равновесного состава основывается на поиске максимума энтропии или минимума энергии Гиббса [24]. Термодинамическую систему рассматривают как совокупность индивидуальных веществ, не вводя понятие химической реакции. Экстремальные значения характеристических функций (S либо Φ^*) определяют для газовой фазы, конденсированной фазы и твердого раствора. При этом должны быть соблюдены законы сохранения вещества, сохранения заряда и уравнение состояния. Число фаз в системе должно соответствовать правилу фаз Гиббса. Для отыскания экстремума использован метод неопределенных множителей Лагранжа. Составив функцию Лагранжа и взяв частные производные по всем переменным, получают систему уравнений, которую решают методом последовательных приближений. Число уравнений может оказаться порядка нескольких десятков и сотен, особенно для систем с большим количеством химических элементов, что создает определенные трудности, обусловленные ограничением объема памяти и быстродействия ЭВМ. В настоящее время в нашей стране создана универсальная программа для расчета равновесных составов, базирующихся на втором методе. С помощью этой программы рассчитывают не только газообразные системы, но и системы, включающие конденсированные фазы, а также твердые растворы. Программа удобна в использовании, снабжена обширной библиотекой индивидуальных веществ и предназначена для реализации на больших современных ЭВМ [24].

2.2 Термодинамический расчёт процесса плазменной конверсии ОГФУ

Для определения оптимальных режимов исследуемого процесса проведены расчёты равновесных составов газообразных и конденсированных продуктов плазменной конверсии ОГФУ. Для расчётов использовалась лицензионная программа TERRA. Расчёты проведены при атмосферном давлении 0,1 МПа, в широком диапазоне температур от 300 до 4000 К и массовых долей различных плазменных теплоносителей от 20 до 80 % (в случае водорода, от 1 до 3 %)

На рисунке 2.1 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных и конденсированных продуктов плазменной конверсии ОГФУ в водородной плазме при массовой доле водорода 1 %.

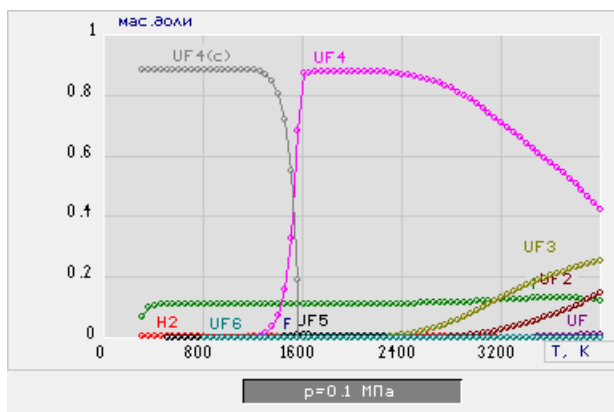


Рисунок 2.1 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных и конденсированных продуктов плазменной конверсии ОГФУ в водородной плазме: (99 % ОГФУ : 1% H_2)

Из анализа равновесного состава (рис. 2.1) следует, что при массовой доле водорода 1 % и температурах до 1550 К основным продуктом является тетрафторид урана в конденсированной фазе ($UF_4(c)$), а при температурах выше 1550 К – тетрафторид урана в газовой фазе (UF_4).

На рисунке 2.2 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных и конденсированных продуктов плазменной конверсии

ОГФУ в водородной плазме при массовой доле водорода 2 %.

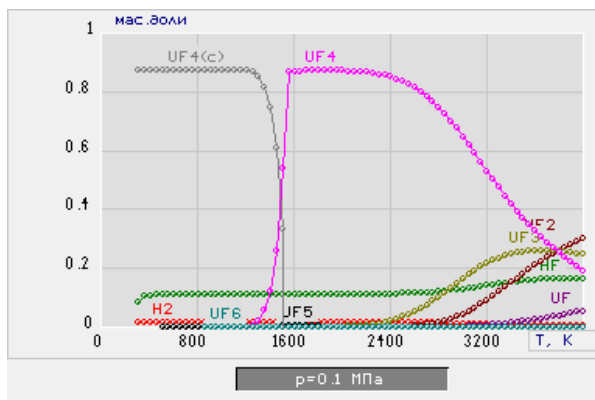


Рисунок 2.2 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных и конденсированных продуктов плазменной конверсии ОГФУ в водородной плазме: (98 % ОГФУ : 2 % H_2)

Из анализа равновесного состава (рис. 2.2) следует, что при массовой доле водорода 2 % и температурах до 1500 К основным продуктом является тетрафторид урана в конденсированной фазе, а при температурах свыше 1500 К – тетрафторид урана в газовой фазе. Понижение или повышение массовой доли водорода не оказывает существенного влияния на состав образующихся продуктов.

На рисунке 2.3 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных и конденсированных продуктов плазменной конверсии ОГФУ в водородной плазме при массовой доле водорода 3 %.

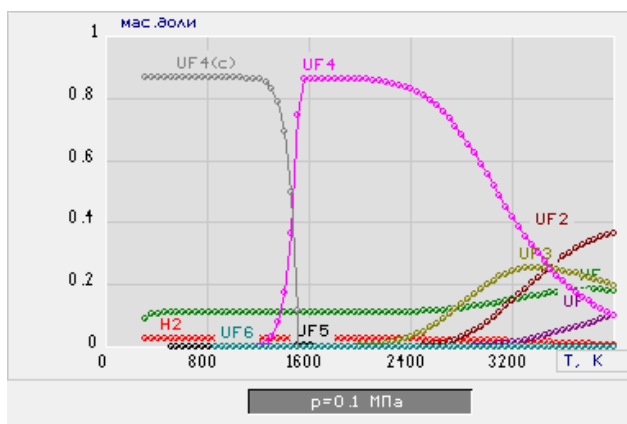


Рисунок 2.3 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных и конденсированных продуктов плазменной конверсии ОГФУ в водородной плазме: (97 % ОГФУ : 3 % H_2)

Из анализа равновесного состава (рис. 2.3) следует, что при массовой доле водорода 3 % и температурах до 1500 К основным продуктом является тетрафторид урана в конденсированной фазе, а при температурах свыше 1500 К – тетрафторид урана в газовой фазе.

По результатам анализа равновесных составов можно сделать вывод, что понижение или повышение массовой доли водорода не оказывает существенного влияния на состав образующихся продуктов.

Для плазменной конверсии ОГФУ с получением тетрафторида урана в конденсированной фазе установлен следующий оптимальный технологический режим:

- водородная плазма;
- рабочая температура в пределах 700 ± 300 К;
- оптимальный состав исходных веществ (99 % ОГФУ : 1 % H_2).

На рисунке 2.4 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в пароводяной плазме при массовой доле водяного пара 20 %.

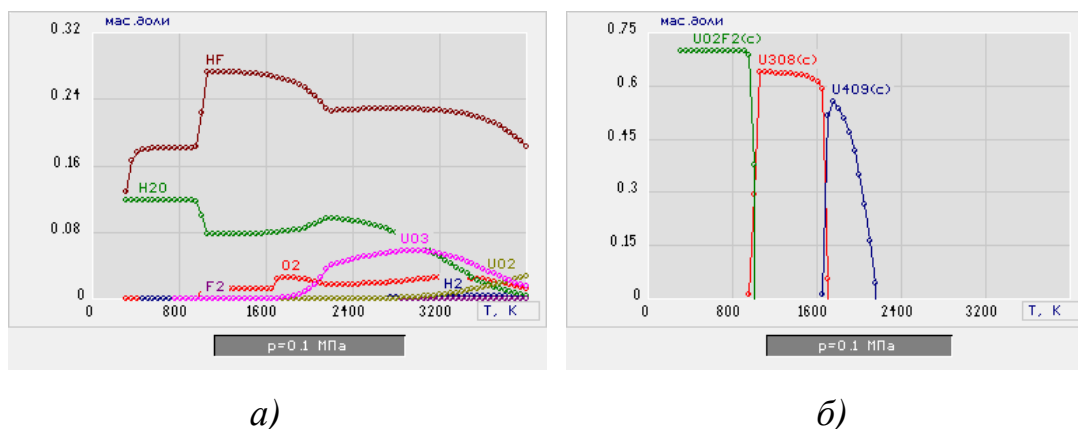


Рисунок 2.4 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в пароводяной плазме: (80 % ОГФУ : 20 % H_2O)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.4) следует, что при массовой доле водяного пара 20 % и температурах до 1700 К основным газообразным продуктом является фтористый водород, а в конденсированной фазе при

температурах до 1050 К – уранилфторид ($\text{UO}_2\text{F}_2(\text{c})$), в интервале температур от 950 до 1700 К – закись-окись урана ($\text{U}_3\text{O}_8(\text{c})$), а свыше 1600 К – оксид урана ($\text{U}_4\text{O}_9(\text{c})$).

На рисунке 2.5 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в пароводяной плазме при массовой доле водяного пара 30 %.

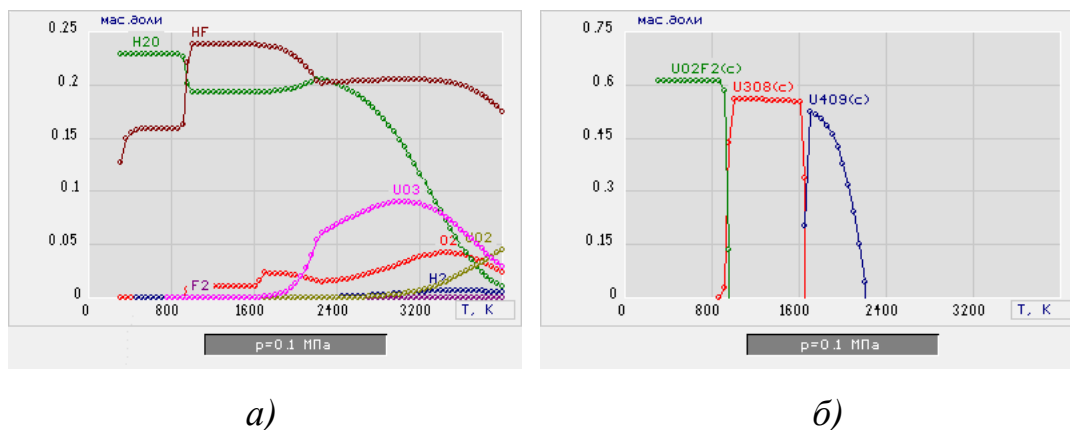
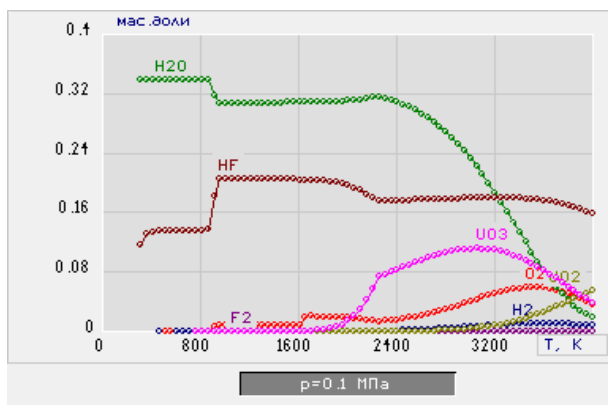


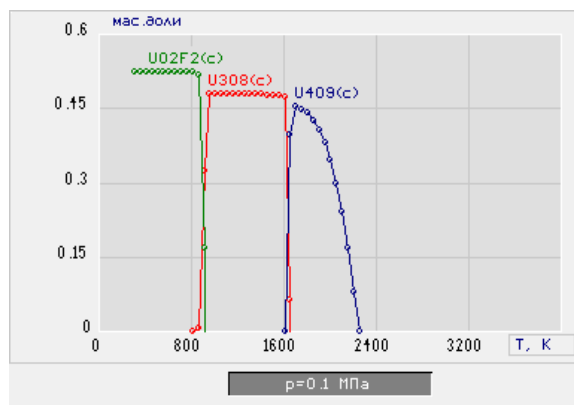
Рисунок 2.5 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в пароводяной плазме: (70 % ОГФУ : 30 % H_2O)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.5) следует, что при массовой доле водяного пара 30 % и температурах до 1650 К основным газообразным продуктом является фтористый водород, а в конденсированной фазе при температурах до 950 К – уранилфторид, в интервале температур от 850 до 1650 К – закись-окись урана, а свыше 1650 К – оксид урана ($\text{U}_4\text{O}_9(\text{c})$).

На рисунке 2.6 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в пароводяной плазме при массовой доле водяного пара 40 %.



а)

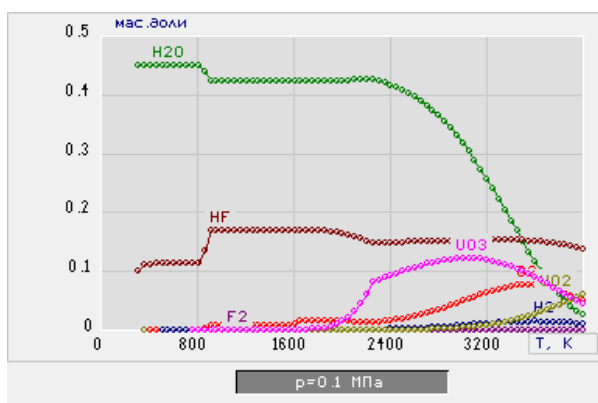


б)

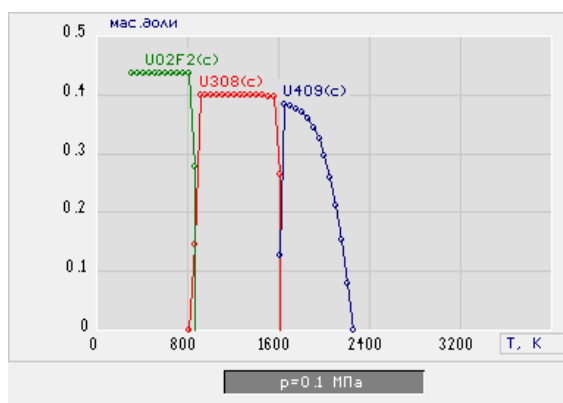
Рисунок 2.6 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в пароводяной плазме: (60 % ОГФУ : 40 % H_2O)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.6) следует, что при массовой доле водяного пара 40 % и температурах до 1650 К основным газообразным продуктом является водяной пар, а в конденсированной фазе при температурах до 900 К – уранилфторид, в интервале температур от 800 до 1650 К – закись-окись урана, а свыше 1600 К – оксид урана ($\text{U}_4\text{O}_9(\text{с})$).

На рисунке 2.7 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в пароводяной плазме при массовой доле водяного пара 50 %.



а)



б)

Рисунок 2.7 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в пароводяной плазме: (50 % ОГФУ : 50 % H_2O)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.7) следует, что при массовой доле водяного пара 50 % и температурах до 1600 К основным газообразным продуктом является водяной пар, а в конденсированной фазе при температурах до 900 К – уранилфторид, в интервале температур от 800 до 1600 К – закись-окись урана, а свыше 1600 К – оксид урана ($U_4O_9(c)$).

На рисунке 2.8 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в пароводяной плазме при массовой доле водяного пара 60 %.

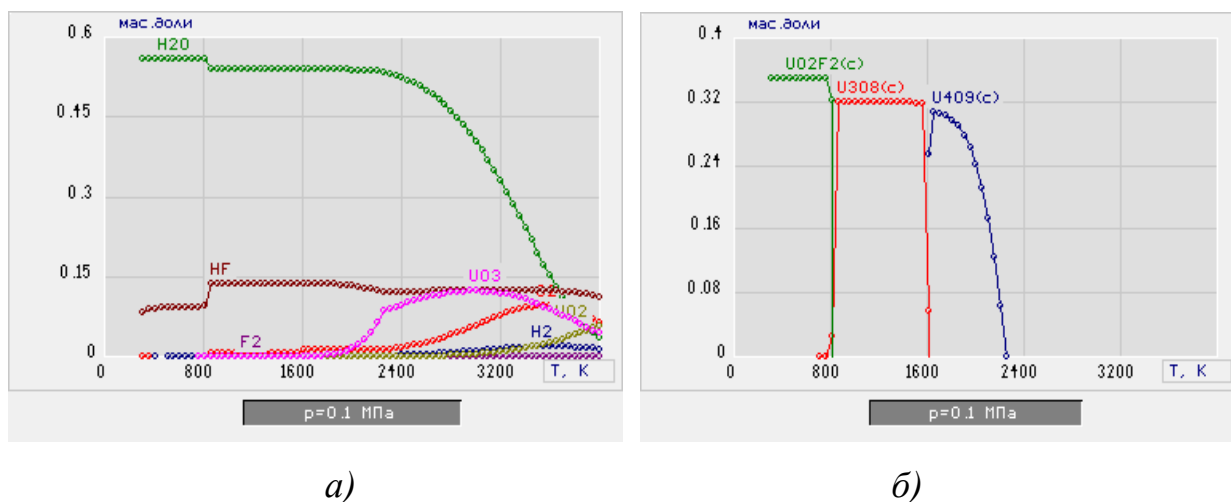
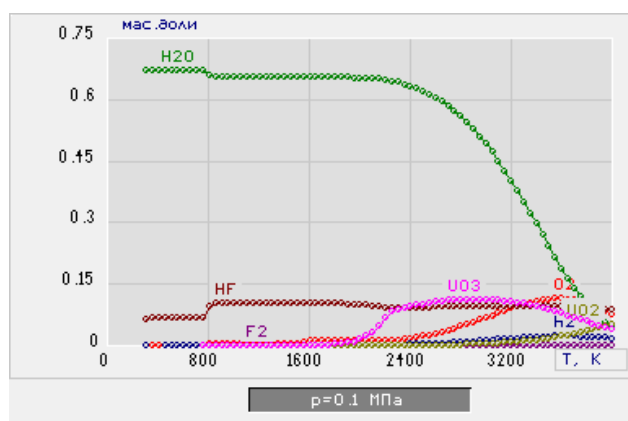


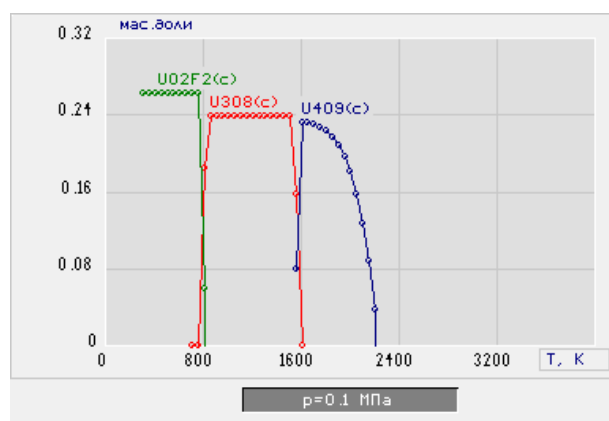
Рисунок 2.8 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в пароводяной плазме: (40 % ОГФУ : 60 % H_2O)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.8) следует, что при массовой доле водяного пара 60 % и температурах до 1600 К основным газообразным продуктом является водяной пар, а в конденсированной фазе при температурах до 800 К – уранилфторид, в интервале температур от 700 до 1600 К – закись-окись урана, а свыше 1600 К – оксид урана ($U_4O_9(c)$).

На рисунке 2.9 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в пароводяной плазме при массовой доле водяного пара 70 %.



a)

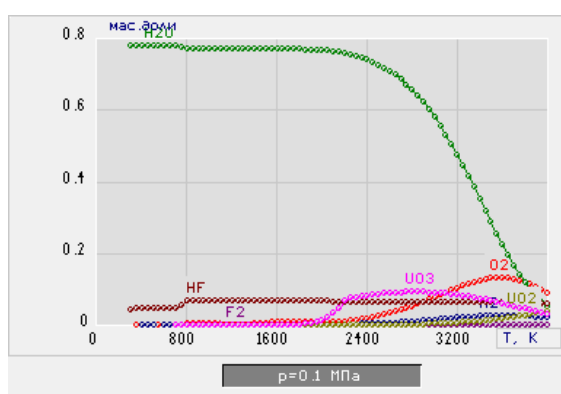


б)

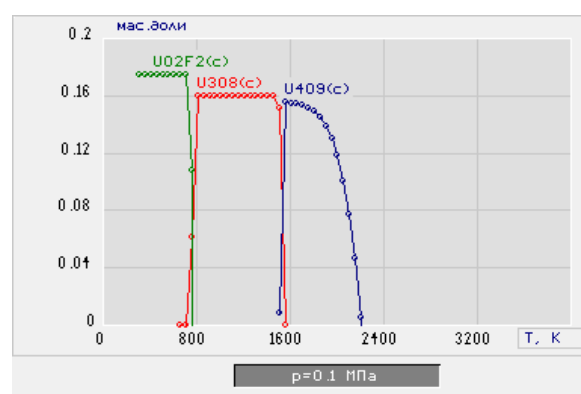
Рисунок 2.9 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (a) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в пароводяной плазме: (30 % ОГФУ : 70 % H_2O)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.9) следует, что при массовой доле водяного пара 70 % и температурах до 1600 К основным газообразным продуктом является водяной пар, а в конденсированной фазе при температурах до 800 К – уранилфторид, в интервале температур от 700 до 1600 К – закись-окись урана, а свыше 1550 К – оксид урана ($\text{U}_4\text{O}_9(\text{c})$).

На рисунке 2.10 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (a) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в пароводяной плазме при массовой доле водяного пара 80 %.



a)



б)

Рисунок 2.10 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (a) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в пароводяной плазме: (20 % ОГФУ : 80 % H_2O)

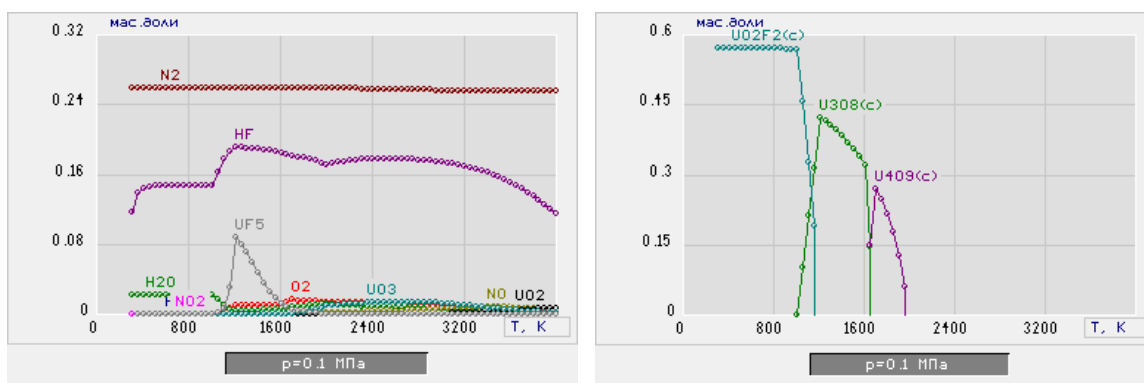
Из анализа равновесных составов (рис. 2.10) следует, что при массовой доле водяного пара 80 % и температурах до 1500 К основным газообразным продуктом является водяной пар, а в конденсированной фазе при температурах до 750 К – уранилфторид, в интервале температур от 650 до 1550 К – закись-окись урана, а свыше 1500 К – оксид урана ($U_4O_9(c)$).

По результатам анализа равновесных составов можно сделать вывод, что понижение или повышение массовой доли водяного пара не оказывает существенного влияния на состав образующихся продуктов.

Для плазменной конверсии ОГФУ с получением закиси-оксида урана в конденсированной фазе установлен следующий оптимальный технологический режим:

- пароводяная плазма;
- рабочая температура в пределах 1200 ± 100 К;
- оптимальный состав (80 % ОГФУ : 20 % H_2O).

На рисунке 2.11 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме с инжекцией водорода при массовой доле воздуха 33,9 % и водорода 1 %.



а)

б)

Рисунок 2.11 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме с инжекцией водорода:

(65,1 % ОГФУ : 33,9 % Воздух : 1 % H_2)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.11) следует, что при массовой доле воздуха 33,9 % и водорода 1 % и температурах до 1650 К основным газообразными продуктами являются азот и безводный фтористый водород, а в конденсированной фазе при температурах до 1200 К – уранилфторид, в интервале температур от 1000 до 1650 К – закись-окись урана, при температуре свыше 1650 К – оксид урана ($U_4O_9(c)$).

На рисунке 2.12 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме с инъекцией водорода при массовой доле воздуха 33,5 % и водорода 2 %.

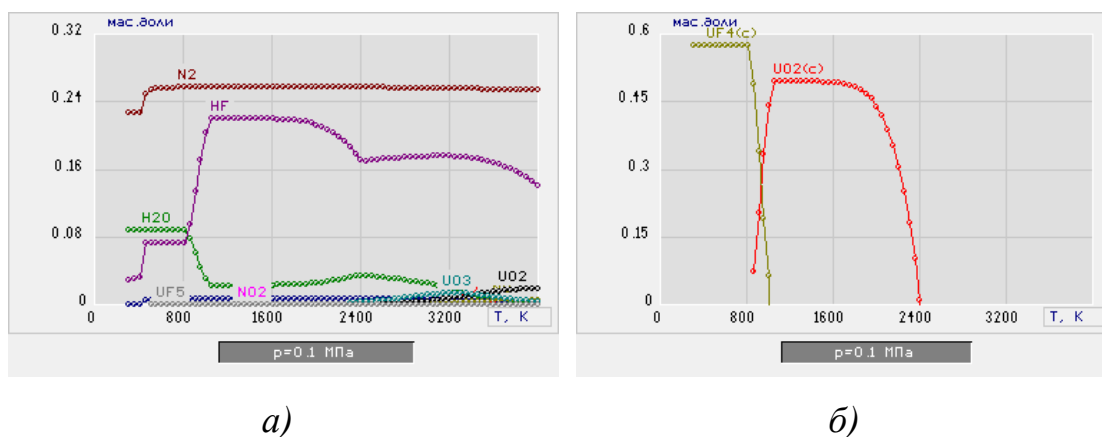
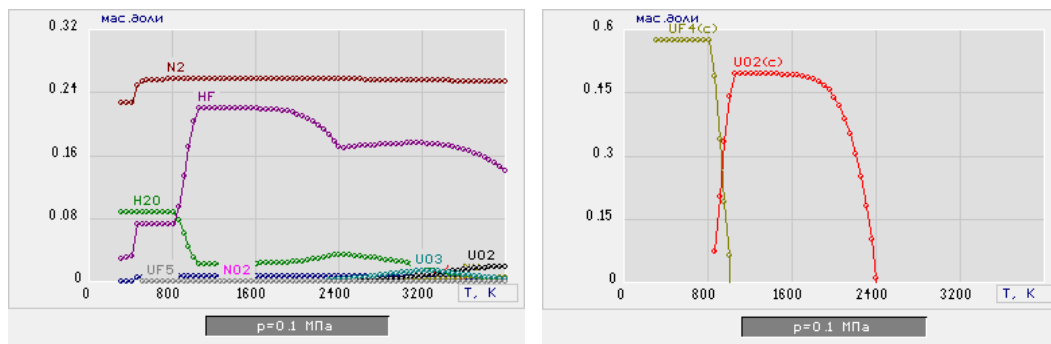


Рисунок 2.12 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме с инъекцией водорода:
(64,5 % ОГФУ : 33,5 % Воздух : 2 % H_2)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.12) следует, что при массовой доле воздуха 33,5 % и водорода 2 % и температурах до 2400 К основным газообразными продуктами являются азот и безводный фтористый водород, а в конденсированной фазе при температурах до 1000 К – тетрафторид урана, в интервале температур от 850 до 2400 К – диоксид урана ($UO_2(c)$).

На рисунке 2.13 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме с инъекцией водорода при массовой доле

воздуха 33,2 % и водорода 3 %.



а)

б)

Рисунок 2.13 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии

ОГФУ в воздушной плазме с инжекцией водорода:

(63,8 % ОГФУ : 33,2 % Воздух : 3 % H_2)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.13) следует, что при массовой доле воздуха 33,2 % и водорода 3 % и температурах до 2400 К основными газообразными продуктами являются азот и безводный фтористый водород, а в конденсированной фазе при температурах до 950 К – тетрафторид урана, в интервале температур от 850 до 2400 К – диоксид урана.

По результатам анализа равновесных составов можно сделать вывод, что понижение или повышение массовой доли воздуха с инжекцией водорода не оказывает существенного влияния на состав образующихся продуктов.

Для плазменной конверсии ОГФУ с получением диоксида урана в конденсированной фазе установлен следующий оптимальный технологический режим:

- воздушная плазма с инжекцией водорода;
- рабочая температура в пределах 1300 ± 300 К;
- оптимальный состав (64,5 % ОГФУ : 33,5 % Воздух : 2 % H_2).

На рисунке 2.14 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме при массовой доле воздуха 80 %.

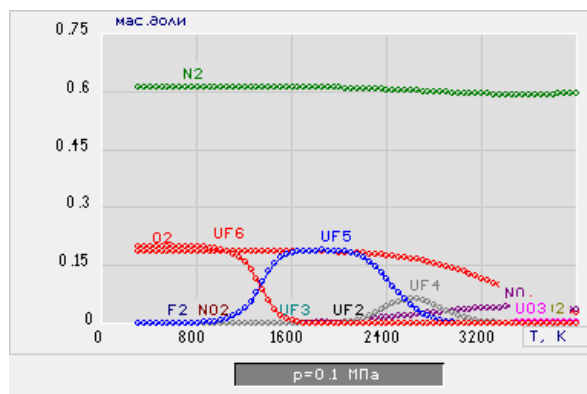


Рисунок 2.14 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных и конденсированных продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме: (20 % ОГФУ : 80 % Воздух)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.14) следует, что при массовой доле воздуха 80 % и во всем диапазоне температур основным газообразным продуктом является азот. Продуктов в конденсированной фазе не образуется.

На рисунке 2.15 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме при массовой доле воздуха 70 %.

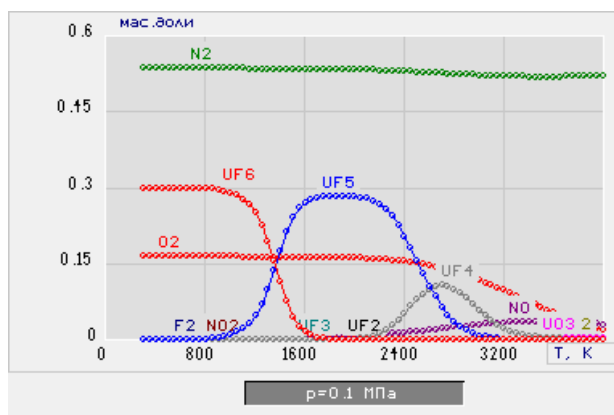


Рисунок 2.15 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных и конденсированных продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме: (30 % ОГФУ : 70 % Воздух)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.15) следует, что при массовой доле воздуха 70 % и во всем диапазоне температур основным газообразным продуктом является азот. Продуктов в конденсированной фазе не образуется.

На рисунке 2.16 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме при массовой доле воздуха 60 %.

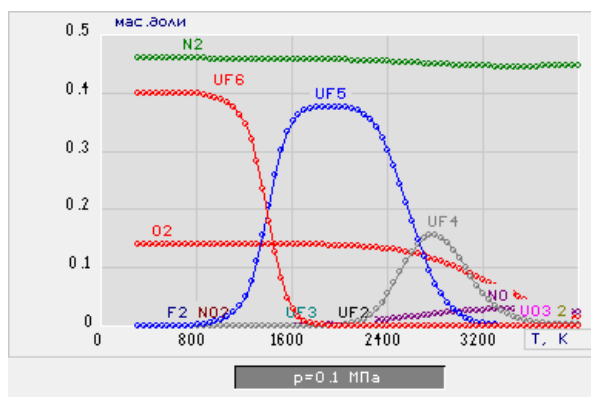


Рисунок 2.16 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных и конденсированных продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме: (40 % ОГФУ : 60 % Воздух)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.16) следует, что при массовой доле воздуха 60 % и во всем диапазоне температур основным газообразным продуктом является азот. Продуктов в конденсированной фазе не образуется.

На рисунке 2.17 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме при массовой доле воздуха 50 %.

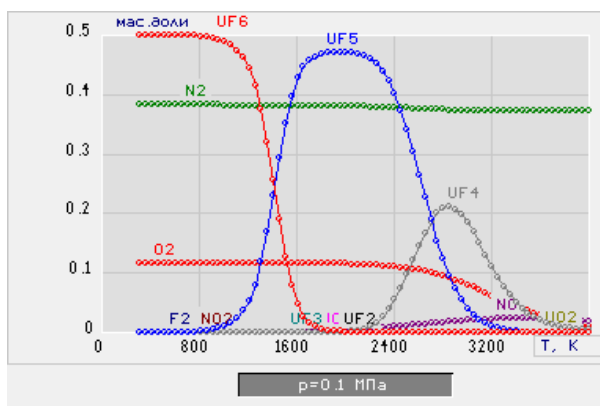


Рисунок 2.17 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных и конденсированных продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме: (50 % ОГФУ : 50 % Воздух)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.17) следует, что при массовой доле воздуха 50 % и при температуре до 1200 К основным газообразным продуктом является ОГФУ, при температуре от 1200 К до 2400 К – фторид урана (UF_5), свыше 2400 К – азот. Продуктов в конденсированной фазе не образуется.

На рисунке 2.18 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме при массовой доле воздуха 40 %.

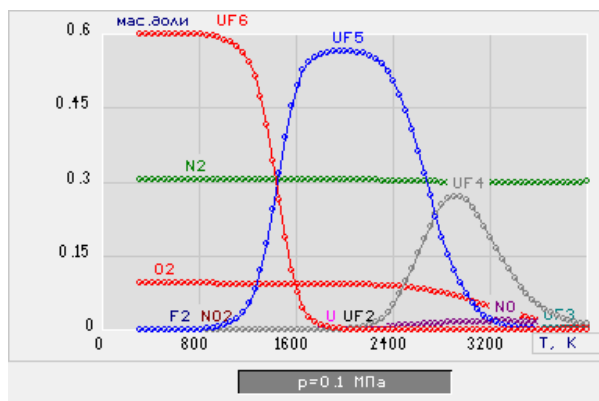


Рисунок 2.18 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных и конденсированных продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме: (60 % ОГФУ : 40 % Воздух)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.18) следует, что при массовой доле воздуха 40 % и температурах до 1400 К основным газообразным продуктом является ОГФУ, в интервале температур от 1400 до 2500 К – фторид урана (UF_5), а свыше 2500 К – азот. Продуктов в конденсированной фазе не образуется.

На рисунке 2.19 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме при массовой доле воздуха 30 %.

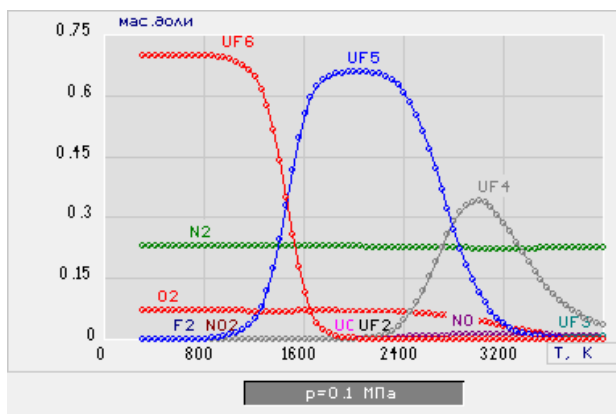


Рисунок 2.19 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных и конденсированных продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме: (70 % ОГФУ : 30 % Воздух)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.19) следует, что при массовой доле воздуха 30 % и температурах до 1500 К основным газообразным продуктом является ОГФУ, в интервале температур от 1500 до 2800 К – фторид урана (UF_5), а свыше 2400 К – тетрафторид урана. Продуктов в конденсированной фазе не образуется.

На рисунке 2.20 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме при массовой доле воздуха 20 %.

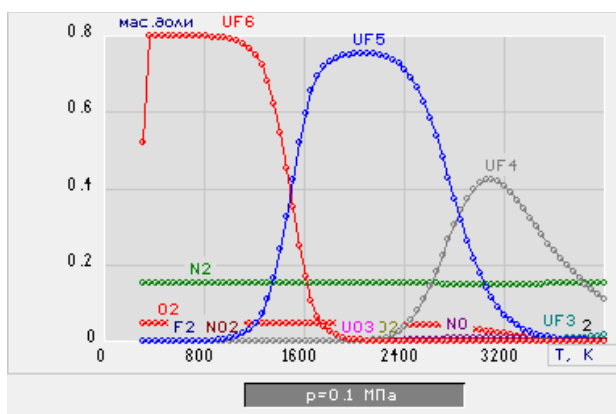


Рисунок 2.20 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных и конденсированных продуктов плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме: (80 % ОГФУ : 20 % Воздух)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.20) следует, что при массовой доле воздуха 20 % и температурах до 1500 К основным газообразным продуктом является ОГФУ, в интервале температур от 1500 до 2400 К – фторид урана (UF_5), а свыше 2400 К – тетрафторид урана. Продуктов в конденсированной фазе не образуется.

Понижение или повышение массовой доли воздуха не оказывает существенного влияния на состав образующихся продуктов.

Таким образом, проведённые термодинамические расчеты для ОГФУ показали, что процесс плазменной конверсии ОГФУ протекает в различных плазменных теплоносителях и в широком диапазоне температур с получением различных целевых продуктов в конденсированной фазе: тетрафторид урана, закись-окись урана, диоксид урана. Однако только в воздушной плазме не могут быть получены различные целевые продукты в конденсированной фазе: тетрафторид урана, закись-окись урана, диоксид урана.

2.3 Оценка удельных энергозатрат на процесс плазменной конверсии ОГФУ

Оценка удельных энергозатрат на процесс плазменного получения требуемых целевых продуктов проводилась с помощью лицензионной программы TERRA. С помощью этой программы были рассчитаны полные энтальпии J_T образующихся продуктов плазменной конверсии ОГФУ при различных температурах и массовая доля Z образующихся целевых продуктов в виде тетрафторида урана, закиси-окиси урана, диоксида урана в конденсированной фазе.

Далее определялись общие энергозатраты на процесс плазменной конверсии ОГФУ по формуле:

$$\mathcal{E}_{общ} = J_T - J_{300} \text{ [кДж/кг]} \quad (2.3.1)$$

Затем рассчитывались удельные энергозатраты на получение целевого продукта в виде тетрафторида урана, закиси-оксида урана, диоксида урана по формуле:

$$\mathcal{E}_{уд} = \mathcal{E}_{общ}/Z \text{ [кДж/кг]} \quad (2.3.2)$$

Результаты расчётов удельных энергозатрат на процесс плазменной конверсии ОГФУ в тетрафторид урана в конденсированной фазе в оптимальном технологическом режиме приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Удельные энергозатраты на получение тетрафторида урана в конденсированной фазе в оптимальном технологическом режиме

<i>T</i> , К	<i>I</i> _т , кДж/кг	<i>Z</i> , м.д.	$\mathcal{E}_{общ}$, кДж/кг	$\mathcal{E}_{уд}$, МДж/кг
300	-6970	0,88314	0	0
450	-6850	0,88314	120	0,14
600	-6770	0,88314	200	0,23
750	-6680	0,88314	290	0,33
900	-6590	0,88314	380	0,43
1050	-6500	0,88312	470	0,53
1200	-6400	0,88159	570	0,65
1350	-6150	0,84756	820	0,97
1500	-5810	0,54806	1160	2,12
1650	-5320	0	1650	0
1800	-5230	0	1740	0
1950	-5140	0	1830	0
2100	-5050	0	1920	0

Из анализа удельных энергозатрат (табл. 2.1) можно сделать вывод, что в пределах температур от 450 до 1050 К происходит максимальный выход целевого продукта в виде тетрафторида урана в конденсированной фазе, а удельные энергозатраты находятся в пределах от 0,14 до 0,53 МДж/кг.

Результаты удельных энергозатрат на процесс плазменной конверсии ОГФУ в закись-окись урана в конденсированной фазе в оптимальном технологическом режиме приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Удельные энергозатраты на получение закиси-оксида урана в конденсированной фазе в оптимальном технологическом режиме

<i>T</i> , К	<i>I</i> _г , кДж/кг	<i>Z</i> , м.д.	<i>Э</i> _{общ} , кДж/кг	<i>Э</i> _{уд} , МДж/кг
300	-7870	0	0	0
450	-7720	0	150	0
600	-7600	0	270	0
750	-7480	0	390	0
900	-7360	0	510	0
1050	-6880	0,63746	990	1,55
1200	-6750	0,63663	1120	1,76
1350	-6620	0,63366	1250	1,97
1500	-6480	0,62549	1390	2,22
1650	-6330	0,59176	1540	2,60
1800	-6010	0	1860	0
1950	-5760	0	2110	0
2100	-5380	0	2490	0

Из анализа удельных энергозатрат (табл. 2.2) можно сделать вывод, что в пределах рабочих температур от 1050 до 1650 К происходит максимальный выход целевого продукта в виде закиси-оксида урана в конденсированной фазе, а удельные энергозатраты находятся в пределах от 1,55 до 2,60 МДж/кг.

Результаты удельных энергозатрат на процесс плазменной конверсии ОГФУ в диоксид урана в конденсированной фазе в оптимальном технологическом режиме приведены в таблице 2.3.

Из анализа удельных энергозатрат (табл. 2.3) можно сделать вывод, что в пределах рабочих температур 1300 ± 300 К происходит максимальный выход целевого продукта в виде диоксида урана в конденсированной фазе, а удельные энергозатраты находятся в пределах от 0,61 до 1,89 МДж/кг.

Таблица 2.3 – Удельные энергозатраты на получение диоксида урана в конденсированной фазе в оптимальном технологическом режиме

T, K	$I_T, \text{кДж/кг}$	$Z, \text{м.д.}$	$\mathcal{E}_{\text{общ}}, \text{кДж/кг}$	$\mathcal{E}_{\text{уд}}, \text{МДж/кг}$
300	-6120	0	0	0
450	-5610	0	510	0
600	-5450	0	670	0
750	-5310	0	810	0
900	-5010	0,20360	1110	5,45
1050	-4620	0,49450	1500	3,03
1200	-4480	0,49442	1640	3,32
1350	-4340	0,49421	1780	3,60
1500	-4190	0,49361	1930	3,91
1650	-4030	0,49133	2090	4,25
1800	-3870	0,48282	2250	4,66
1950	-3690	0,45611	2430	5,33
2100	-3450	0,38872	2670	6,87

По результатам удельных энергозатрат на получение целевых продуктов в оптимальном технологическом режиме (рис. 2.21) можно сделать вывод, что наименее энергозатратным является получение целевого продукта в виде тетрафторида урана в конденсированной фазе в водородной плазме, а наиболее энергозатратным – получение целевого продукта в виде диоксида урана в конденсированной фазе в воздушной плазме с инъекцией водорода.

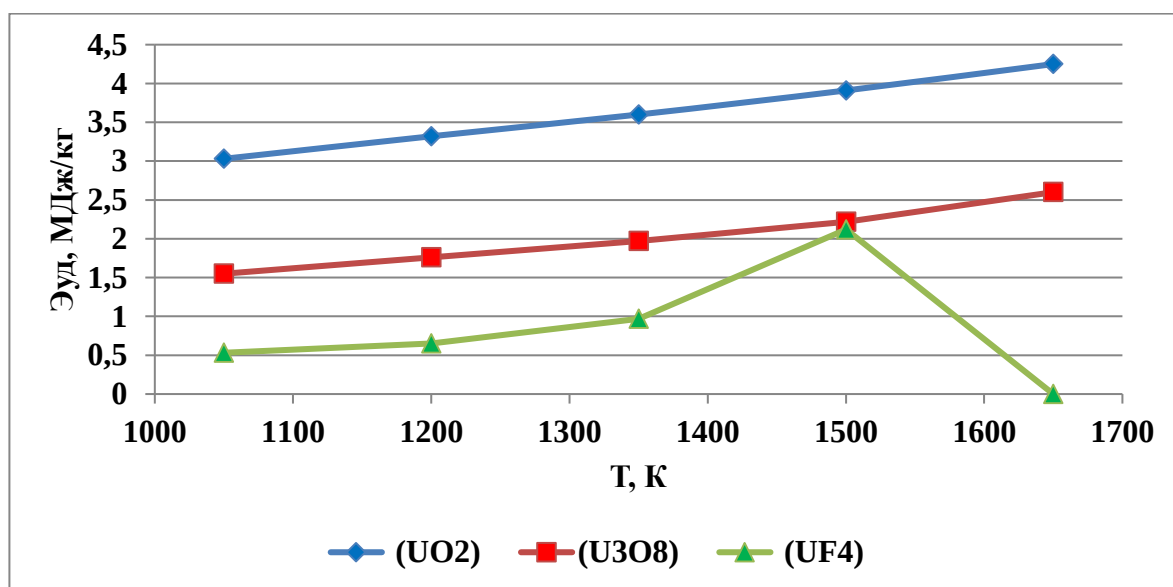


Рисунок 2.21 Влияние температуры на энергозатраты на получение 1 кг целевых продуктов в виде тетрафторида урана, закиси-оксида урана, диоксида урана в конденсированной фазе.

2.4 Термодинамический расчёт процесса плазменной обработки ВСОК на основе нитрата уранила

2.4.1 Расчёт параметров ВСОК на основе нитрата уранила

Низшую теплотворную способность водно-солеорганических композиций на основе водно-солевых растворов и горючих органических веществ (спирты, ацетон и др.) можно рассчитывать по формуле [25]:

$$Q_H^p = \frac{(100-W-A) \cdot Q_H^c}{100} - \frac{2,5 \cdot W}{100}, \quad (2.4.1)$$

где Q_H^c – низшая теплотворная способность горючих компонентов композиции, МДж/кг;

W и A – содержание соответственно воды и негорючих минеральных веществ в композиции, %;

2,5 – скрытая теплота испарения воды при 0 °С, МДж/кг.

Жидкие композиции становятся горючими при различных значениях теплоты сгорания в зависимости от теплоты сгорания горючих компонентов и принадлежности их к тем или иным классам соединений.

Рекомендация относить к горючим жидкие горючие композиции при низшей теплотворной способности $Q_H^p \geq 8,4$ МДж/кг [26] является завышенной для многих производственных композиций, содержащих горючие компоненты с низкими значениями Q_H^c , но с высокой жаропроизводительностью.

Более объективным показателем горючести жидких горючих композиций является их адиабатическая температура горения [25]:

$$T_{ад} = \frac{Q_H^p + c_{отх} \cdot t_{отх} + \alpha \cdot \vartheta_{ок}^0 \cdot c_{ок} \cdot t_{ок}}{v_{уд} \cdot c_p}, \quad (2.4.2)$$

где $c_{отх}$ – средняя массовая теплоемкость жидкой композиции, МДж/(кг·К);

$t_{отх}$ – температура жидкой композиции, К;

α – коэффициент расхода окислителя;

$\vartheta_{ок}^0$ – теоретический расход окислителя;

$c_{ок}$ – средняя теплоемкость окислителя, (кДж/м³·К);

$t_{ок}$ – температура окислителя, К;

$V_{уд}$ – удельный объём продуктов сгорания горючих компонентов композиции, м³/кг;

c_p – удельная равновесная теплоемкость продуктов сгорания горючих компонентов композиции, кДж/(кг·К).

Как показали опыты по сжиганию жидких горючих композиций некоторых органических веществ, достаточное и полное их сгорание в камерах с небольшими потерями тепла в окружающую среду наблюдается при адиабатической температуре горения $T_{ад} \geq 1200$ °С, причем эта температура необходима и достаточна для самостоятельного горения таких композиций [26].

В данной работе исследуется процесс плазменной обработки модельных водно-солеорганических композиций, на основе кристаллогидрата нитрата уранила ($UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$), этилового спирта (C_2H_6O) или ацетона (C_3H_6O), обладающих высокой взаимной растворимостью.

По приведенной выше методике были проведены расчеты Q_H^p (МДж/кг) и адиабатической температуры горения $T_{ад}$ (К) для различных водно-солеорганических композиций на основе водно-солевых растворов кристаллогидрата нитрата уранила, этилового спирта или ацетона. Результаты проведённых расчетов приведены в таблицах Б1 и Б2 (Приложение Б).

В результате проведенных расчётов определены следующие оптимальные по составу водно-солеорганические композиции, имеющие низшую теплотворную способность $Q_H^p \approx 8,4$ МДж/кг:

- ВСОК-1 (13,5 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$: 50,5 % H_2O : 36,0 % C_2H_6O);
- ВСОК-2 (14,5 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$: 54,0 % H_2O : 31,5 % C_3H_6O).

2.4.2 Термодинамический расчёт процесса плазменной обработки ВСОК на основе нитрата уранила

Произведен расчет равновесных составов газообразных и конденсированных продуктов плазменной переработки кристаллогидрата нитрата уранила в виде водно-солеорганической композиции, который может

быть получен в ходе гидролиза ОГФУ и нитрата алюминия ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3$). При этом, для каждой водно-солеорганической композиции подбиралась такая минимальная массовая доля воздуха, которая обеспечивала полное окисление органического растворителя (этиловый спирт, ацетон) и получение диоксида урана в конденсированной фазе.

На рисунке 2.22 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов переработки кристаллогидрата нитрата уранила в виде ВСОК-1 в воздушной плазме при массовой доле воздуха 76 %.

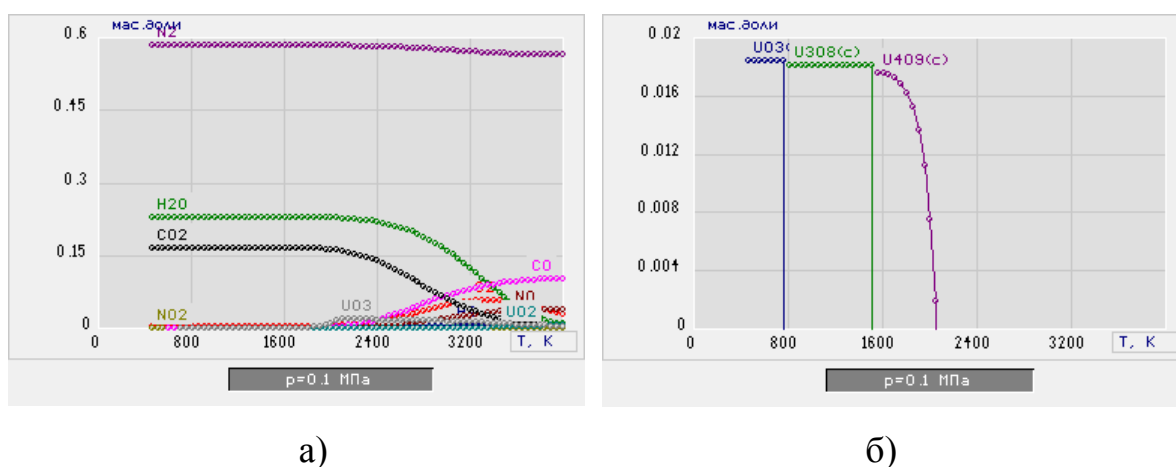
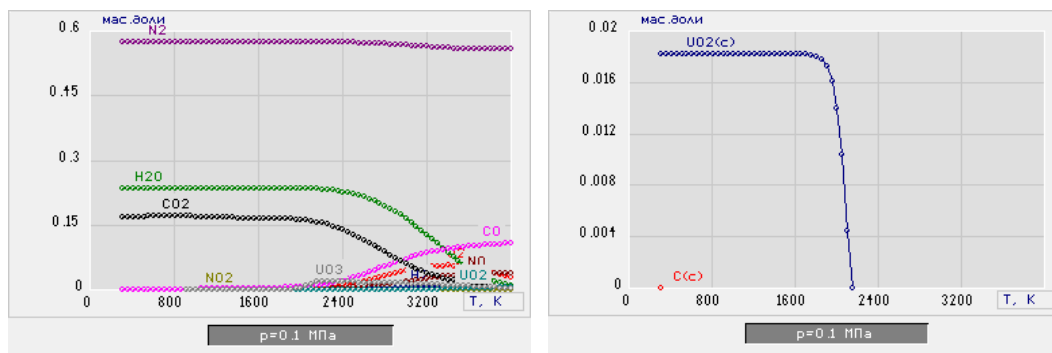


Рисунок 2.22 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов переработки нитрата уранила в воздушной плазме: (24 % ВСОК-1 : 76 % Воздух)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.22) следует, что при массовой доле воздуха 76 % и во всем диапазоне температур основным газообразным продуктом является азот, а в конденсированной фазе при температурах от 300 до 800 К – триоксид урана ($\text{UO}_3(\text{c})$), при температурах от 800 до 1500 К – закись-окись урана, при температуре свыше 1500 К – оксид урана ($\text{U}_4\text{O}_9(\text{c})$).

На рисунке 2.23 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов переработки кристаллогидрата нитрата уранила в виде ВСОК-1 в воздушной плазме при массовой доле воздуха 75 %.



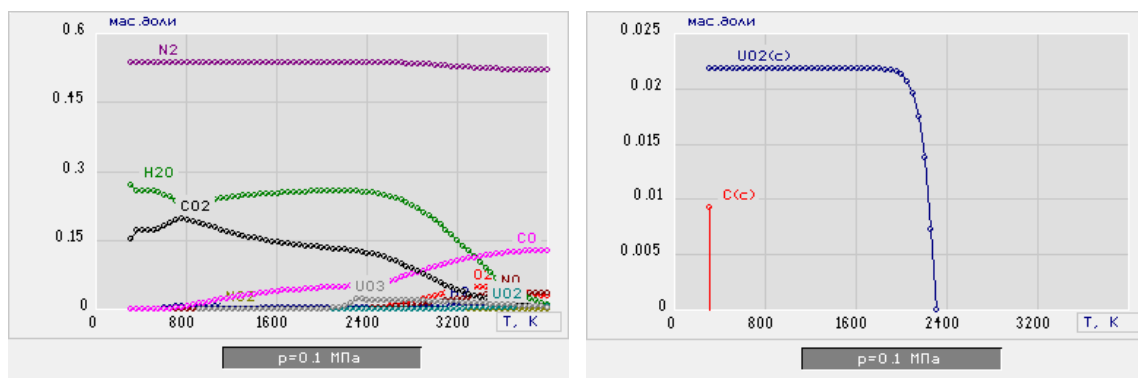
а)

б)

Рисунок 2.23 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов переработки нитрата уранила в воздушной плазме: (25 % ВСОК-1 : 75 % Воздух)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.23) следует, что при массовой доле воздуха 75 % и во всем диапазоне температур основным газообразным продуктом является азот, а в конденсированной фазе при температуре 300 К – углерод (C(c)), при температурах от 300 до 2100 К – диоксид урана (UO₂(c)).

На рисунке 2.24 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов переработки кристаллогидрата нитрата уранила в виде ВСОК-1 в воздушной плазме при массовой доле воздуха 70 %.



а)

б)

Рисунок 2.24 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов переработки нитрата уранила в воздушной плазме: (30 % ВСОК-1 : 70 % Воздух)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.24) следует, что при массовой доле воздуха 70 % и во всем диапазоне температур основным газообразным продуктом является азот, а в конденсированной фазе при температуре 300 К – углерод, при температурах от 300 до 2250 К – диоксид урана.

На рисунке 2.25 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов переработки кристаллогидрата нитрата уранила в виде ВСОК-2 в воздушной плазме при массовой доле воздуха 76 %.

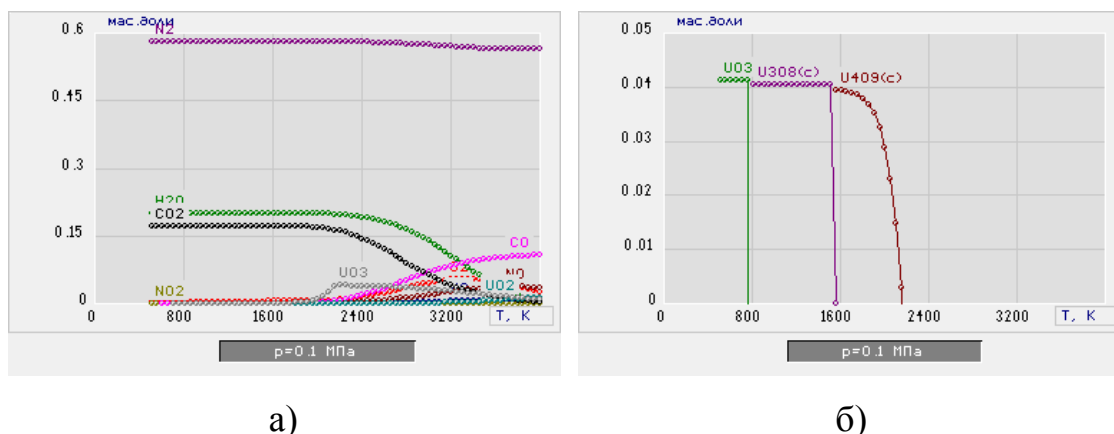
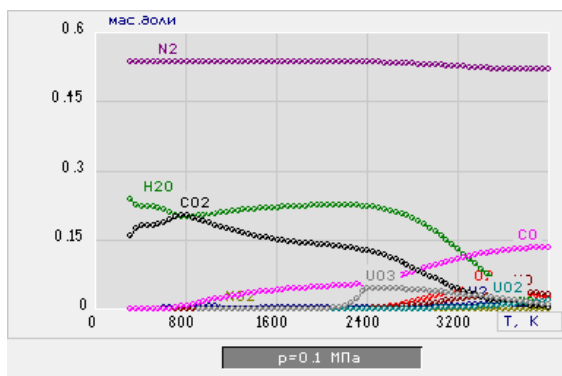


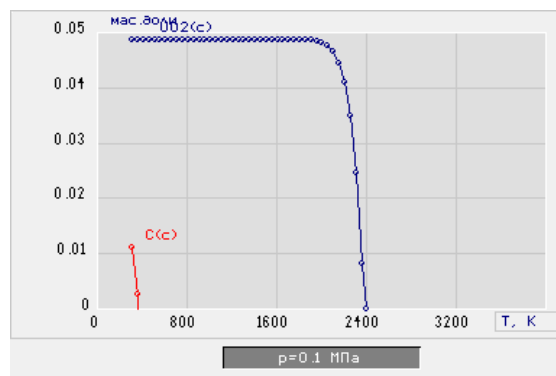
Рисунок 2.25 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов переработки нитрата уранила в воздушной плазме: (24 % ВСОК-1 : 76 % Воздух)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.25) следует, что при массовой доле воздуха 76 % и во всем диапазоне температур основным газообразным продуктом является азот, а в конденсированной фазе при температурах от 300 до 800 К – триоксид урана, при температурах от 800 до 1500 К – закись-окись урана, при температуре свыше 1500 К – оксид урана ($\text{U}_4\text{O}_9(\text{c})$).

На рисунке 2.26 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов переработки кристаллогидрата нитрата уранила в виде ВСОК-2 в воздушной плазме при массовой доле воздуха 75 %.



а)

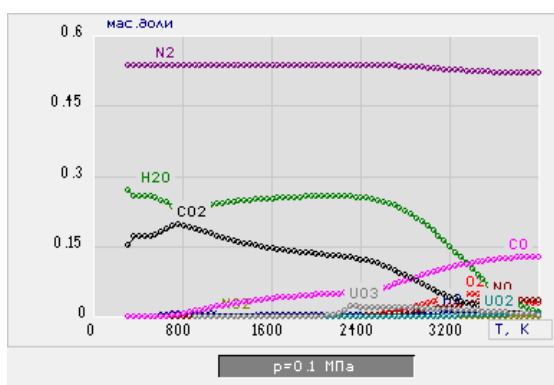


б)

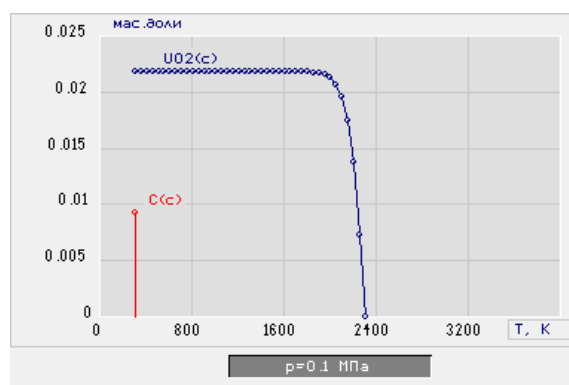
Рисунок 2.26 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов переработки нитрата уранила в воздушной плазме: (25 % ВСОК-1 : 75 % Воздух)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.26) следует, что при массовой доле воздуха 75 % и во всем диапазоне температур основным газообразным продуктом является азот, а в конденсированной фазе при температуре от 300 до 400 К – углерод, при температурах от 300 до 2200 К – диоксид урана.

На рисунке 2.27 показано влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов переработки кристаллогидрата нитрата уранила в виде ВСОК-2 в воздушной плазме при массовой доле воздуха 65 %.



а)



б)

Рисунок 2.27 Влияние температуры на равновесный состав основных газообразных (а) и конденсированных (б) продуктов переработки нитрата уранила в воздушной плазме: (35 % ВСОК-1 : 65 % Воздух)

Из анализа равновесных составов (рис. 2.27) следует, что при массовой доле воздуха 65 % и во всем диапазоне температур основным газообразным продуктом является азот, а в конденсированной фазе при температуре 300 К – углерод, при температурах от 300 до 2400 К – диоксид урана.

Произведена оценка адиабатической температуры горения ВСОК-1 и ВСОК-2 по формуле (2.4.2) (табл. 2.4.2.1 и табл. 2.4.2.2).

Таблица 2.4.2.1 – Оценка адиабатической температуры горения ВСОК-1

ВСОК-1, %	Воздух, %	V _{уд} , м ³ /кг	C _{уд.р.} , МДж/кг	Т _{а.д.} , К	Т _{а.д.} , °С	Продукт U _x O _y (с)	Продукт C(с)
20	80	4,6114	0,0015141	1765,70	1492,70	U ₃ O ₈ (с)	–
24	76	4,6693	0,0015652	1686,88	1413,88	U ₃ O ₈ (с)	–
25	75	4,7059	0,0015748	1663,55	1390,55	UO ₂ (с)	C(с)
30	70	4,9660	0,0016718	1484,96	1211,96	UO₂(с)	C(с)
31	69	5,0177	0,0016899	1453,91	1180,91	UO ₂ (с)	C(с)

Таблица 2.4.2.2 – Оценка адиабатической температуры горения ВСОК-2

ВСОК-1, %	Воздух, %	V _{уд} , м ³ /кг	C _{уд.р.} , МДж/кг	Т _{а.д.} , К	Т _{а.д.} , °С	Продукт U _x O _y (с)	Продукт C(с)
20	80	4,4608	0,0014657	1880,89	1607,89	U ₃ O ₈ (с)	–
24	76	4,4884	0,0015072	1817,85	1544,85	U ₃ O ₈ (с)	–
25	75	4,5151	0,0015135	1799,58	1526,58	UO ₂ (с)	C(с)
30	70	4,7358	0,0015978	1625,20	1352,20	UO ₂ (с)	C(с)
31	69	4,7809	0,0016138	1593,90	1320,90	UO ₂ (с)	C(с)
32	68	4,8250	0,0016291	1564,50	1291,50	UO ₂ (с)	C(с)
33	67	4,8695	0,0016441	1536,06	1263,06	UO ₂ (с)	C(с)
34	66	4,9136	0,0016589	1508,69	1235,69	UO ₂ (с)	C(с)
35	65	4,9580	0,0016734	1482,23	1209,23	UO₂(с)	C(с)
36	64	5,0021	0,0016878	1456,63	1183,63	UO ₂ (с)	C(с)

Из анализа оценок адиабатической температуры горения (табл. 2.4.2.1 и табл. 2.4.2.2) следует, что при соотношении фаз (ВСОК-1 30 % : Воздух 70 %) адиабатическая температура горения равна 1212 °С, а при соотношении фаз (ВСОК-2 35 % : Воздух 65 %) – 1209 °С.

2.4.3 Оценка удельных энергозатрат на процесс плазменной обработки ВСОК на основе нитрата уранила

Оценка удельных энергозатрат на процесс плазменного получения требуемых целевых продуктов проводилась с помощью лицензионной программы TERRA. С помощью этой программы были рассчитаны полные энтальпии J_T образующихся продуктов плазменной обработки ВСОК на основе нитрата уранила при различных температурах и массовая доля Z образующихся целевых продуктов в виде диоксида урана в конденсированной фазе.

Далее определялись общие энергозатраты на процесс плазменной конверсии ВСОК по формуле:

$$\mathcal{E}_{общ} = J_T - J_{300} \text{ [кДж/кг]} \quad (2.3.1)$$

Затем рассчитывались удельные энергозатраты на получение целевого продукта в виде $UO_2(c)$ по формуле:

$$\mathcal{E}_{уд} = \mathcal{E}_{общ} / Z \text{ [кДж/кг]} \quad (2.3.2)$$

Результаты удельных энергозатрат на процесс плазменной обработки ВСОК-1 в диоксид урана в конденсированной фазе в оптимальном технологическом режиме приведены в таблице 2.4.3.1.

Таблица 2.4.3.1 – Удельные энергозатраты на получение диоксида урана в конденсированной фазе в оптимальном технологическом режиме

ВСОК-1					
30 % ВСОК-1 : 70 % Воздух					
Т, К	I _т , кДж/кг	Э _{общ} , кДж/кг	Э _{уд} , кДж/кг	Э _{уд} , МДж/кг	Z _{UO₂}
300	-5,13E+03	0	0	0	0,02178
400	-5,00E+03	1,30E+02	5,97E+03	5,97	0,02178
500	-4,86E+03	2,70E+02	1,24E+04	12,40	0,02178
600	-4,70E+03	4,30E+02	1,97E+04	19,74	0,02178
700	-4,49E+03	6,40E+02	2,94E+04	29,38	0,02178
800	-4,30E+03	8,30E+02	3,81E+04	38,11	0,02178
900	-4,15E+03	9,80E+02	4,50E+04	45,00	0,02178
1000	-3,99E+03	1,14E+03	5,23E+04	52,34	0,02178
1100	-3,83E+03	1,30E+03	5,97E+04	59,69	0,02178
1200	-3,67E+03	1,46E+03	6,70E+04	67,03	0,02178
1300	-3,51E+03	1,62E+03	7,44E+04	74,38	0,02178
1400	-3,35E+03	1,78E+03	8,17E+04	81,73	0,02178
1500	-3,18E+03	1,95E+03	8,95E+04	89,53	0,02178
1600	-3,01E+03	2,12E+03	9,73E+04	97,34	0,02178
1700	-2,84E+03	2,29E+03	1,05E+05	105,14	0,02178
1800	-2,67E+03	2,46E+03	1,13E+05	113,05	0,02176
1900	-2,49E+03	2,64E+03	1,22E+05	121,77	0,02168
2000	-2,32E+03	2,81E+03	1,32E+05	132,17	0,02126

Из анализа удельных энергозатрат (табл. 2.4.3.1) можно сделать вывод, что при температуре 1500 К происходит максимальный выход целевого продукта в виде диоксида урана в конденсированной фазе, а удельные энергозатраты равны 89,53 МДж/кг.

Результаты удельных энергозатрат на процесс плазменной обработки ВСОК-1 в диоксид урана в конденсированной фазе в оптимальном технологическом режиме приведены в таблице 2.4.3.2.

Таблица 2.4.3.2 – Удельные энергозатраты на получение диоксида урана
диоксида урана в конденсированной фазе в оптимальном технологическом
режиме

ВСОК-2					
35% ВСОК-2 : 65% Воздух					
Т, К	Іт, кДж/кг	Эобщ, кДж/кг	Эуд, кДж/кг	Эуд, МДж/кг	ZuO2
300	-5,19E+03	0	0	0	0,05671
400	-5,05E+03	1,40E+02	2,47E+03	2,47	0,05671
500	-4,92E+03	2,70E+02	4,76E+03	4,76	0,05671
600	-4,75E+03	4,40E+02	7,76E+03	7,76	0,05671
700	-4,51E+03	6,80E+02	1,20E+04	11,99	0,05671
800	-4,24E+03	9,50E+02	1,68E+04	16,75	0,05671
900	-4,06E+03	1,13E+03	1,99E+04	19,93	0,05671
1000	-3,90E+03	1,29E+03	2,27E+04	22,75	0,05671
1100	-3,73E+03	1,46E+03	2,57E+04	25,75	0,05671
1200	-3,57E+03	1,62E+03	2,86E+04	28,57	0,05671
1300	-3,41E+03	1,78E+03	3,14E+04	31,39	0,05671
1400	-3,24E+03	1,95E+03	3,44E+04	34,39	0,05671
1500	-3,08E+03	2,11E+03	3,72E+04	37,21	0,05671
1600	-2,91E+03	2,28E+03	4,02E+04	40,20	0,05671
1700	-2,74E+03	2,45E+03	4,32E+04	43,20	0,05671
1800	-2,57E+03	2,62E+03	4,62E+04	46,20	0,05671
1900	-2,39E+03	2,80E+03	4,94E+04	49,42	0,05666
2000	-2,22E+03	2,97E+03	5,26E+04	52,60	0,05646

Из анализа удельных энергозатрат (табл. 2.4.3.2) можно сделать вывод, что при температуре 1500 К происходит максимальный выход целевого продукта в виде диоксида урана в конденсированной фазе, а удельные энергозатраты равны 37,21 МДж/кг.

Результаты удельных энергозатрат на процесс плазменной обработки раствора уранила нитрата в закись-окись урана в конденсированной фазе при соотношении фаз (РУН 30 % : Воздух 70 %) приведены в таблице 2.4.3.3.

Таблица 2.4.3.3 – Удельные энергозатраты на получение закиси-оксида урана в конденсированной фазе при соотношении фаз (РУН 30 % : Воздух 70 %)

РУН					
30 % НР : 70 % Воздух					
Т, К	I _т , кДж/кг	Э _{общ} , кДж/кг	Э _{уд} , кДж/кг	Э _{уд} , МДж/кг	Z _{U3O8}
300	-3,71E+03	0	0	0	0
400	-3,59E+03	1,20E+02	0	0	0
500	-3,46E+03	2,50E+02	0	0	0
600	-3,34E+03	3,70E+02	0	0	0
700	-3,21E+03	5,00E+02	0	0	0
800	-3,07E+03	6,40E+02	0	0	0
900	-2,93E+03	7,80E+02	1,65E+04	16,53	0,04719
1000	-2,79E+03	9,20E+02	1,95E+04	19,50	0,04719
1100	-2,65E+03	1,06E+03	2,25E+04	22,46	0,04719
1200	-2,50E+03	1,21E+03	2,56E+04	25,64	0,04719
1300	-2,35E+03	1,36E+03	2,88E+04	28,82	0,04719
1400	-2,20E+03	1,51E+03	3,20E+04	32,00	0,04719
1500	-2,05E+03	1,66E+03	3,52E+04	35,21	0,04714
1600	-1,89E+03	1,82E+03	3,88E+04	38,82	0,04688
1700	-1,72E+03	1,99E+03	4,35E+04	43,54	0,04570
1800	-1,54E+03	2,17E+03	0	0	0
1900	-1,36E+03	2,35E+03	0	0	0
2000	-1,16E+03	2,55E+03	0	0	0

Из анализа удельных энергозатрат (табл. 2.4.3.3) можно сделать вывод, что при температуре 1500 К происходит максимальный выход целевого продукта в виде закиси-оксида урана в конденсированной фазе, а удельные энергозатраты равны 35,21 МДж/кг.

Результаты удельных энергозатрат на процесс плазменной обработки раствора уранила нитрата в закись-окись урана в конденсированной фазе при соотношении фаз (РУН 35 % : Воздух 65 %) приведены в таблице 2.4.3.4.

Таблица 2.4.3.4 – Удельные энергозатраты на получение закиси-оксида урана в конденсированной фазе при соотношении фаз (РУН 35 % : Воздух 65 %)

РУН					
35% РУН : 65% Воздух					
Т, К	И _г , кДж/кг	Э _{общ} , кДж/кг	Э _{уд} , кДж/кг	Э _{уд} , МДж/кг	Z _{узо}
300	-4,30E+03	0	0	0	0
400	-4,18E+03	1,01E+03	0	0	0
500	-4,05E+03	1,14E+03	0	0	0
600	-3,92E+03	1,27E+03	0	0	0
700	-3,79E+03	1,40E+03	0	0	0
800	-3,65E+03	1,54E+03	0	0	0
900	-3,50E+03	1,69E+03	2,87E+04	28,67	0,05895
1000	-3,36E+03	1,83E+03	3,10E+04	31,04	0,05895
1100	-3,21E+03	1,98E+03	3,36E+04	33,59	0,05895
1200	-3,06E+03	2,13E+03	3,61E+04	36,13	0,05895
1300	-2,91E+03	2,28E+03	3,87E+04	38,68	0,05895
1400	-2,75E+03	2,44E+03	4,14E+04	41,39	0,05895
1500	-2,59E+03	2,60E+03	4,41E+04	44,14	0,05890
1600	-2,43E+03	2,76E+03	4,71E+04	47,06	0,05865
1700	-2,26E+03	2,93E+03	5,01E+04	50,11	0,05847
1800	-2,07E+03	3,12E+03	0	0	0
1900	-1,89E+03	3,30E+03	0	0	0
2000	-1,68E+03	3,51E+03	0	0	0

Из анализа удельных энергозатрат (табл. 2.4.3.4) можно сделать вывод, что при температуре 1500 К происходит максимальный выход целевого продукта в виде закиси-оксида урана в конденсированной фазе, а удельные энергозатраты равны 44,14 МДж/кг.

2.4.4 Обсуждение результатов

Несмотря на то, что после плазменной обработки ВСОК-1 был получен целевой продукт в виде диоксида урана в конденсированной фазе и дешёвый метиловый спирт (в среднем, в 3-4 раза дешевле ацетона), её использование нецелесообразно, так как при этом нужны энергозатраты на получение 1 кг этого продукта порядка 90 МДж/кг.

При плазменной обработки ВСОК-2 получен целевой продукт в виде диоксида урана конденсированной фазе и энергозатраты на получение 1 кг этого продукта составили порядка 37,21 МДж/кг($\text{UO}_2(\text{с})$), что меньше, чем при плазменной обработки раствора уранила нитрата: $\text{Э}_{\text{уд}} = 44,14 \text{ МДж/кг}(\text{U}_3\text{O}_8(\text{с}))$.

Дальнейшие исследования показали, что одним из продуктов плазменной обработки ВСОК-1 и ВСОК-2 является сажа, что является нежелательным, так как получаемый оксидный порошок может потребовать дополнительных операций по очистке. Однако сажа используется при изготовлении таблеток для ядерного топлива в виде матрицы для порошков диоксида урана. Полученный порошок диоксида урана с сажой может быть востребован при изготовлении таблеток для ядерного топлива.

Таким образом, с учетом всего вышеизложенного, считаю, что наиболее оптимальным вариантом для получения высокодисперсного порошка диоксида урана является водно-солеорганическая композиция ВСОК-2 на основе раствора уранила нитрата и ацетона.

3 Исследование процесса плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме

3.1 Установка для проведения экспериментальных исследований

При проведении экспериментальных исследований использован лабораторный плазменный стенд на базе ВЧФ-плазмотрона, который предназначен для исследования процессов плазменного горения различных горючих композиций в условиях воздушной плазмы ВЧФ-разряда (рис. 3.1).

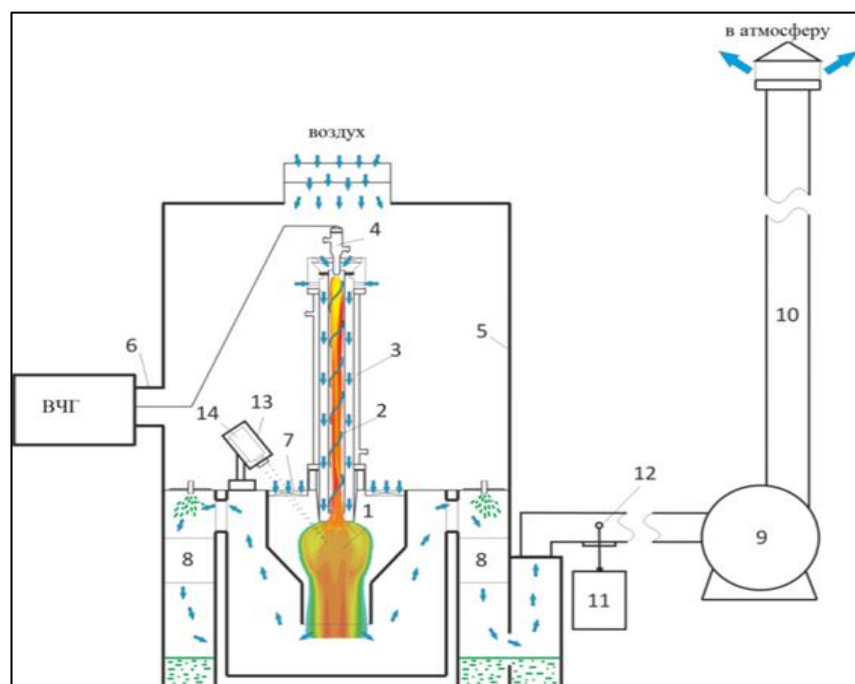


Рисунок 3.1 Схема лабораторного плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона: 1 – диспергатор; 2 – ВЧФ-разряд; 3 – ВЧФ-плазмотрон; 4 – медный электрод; 5 – корпус; 6 – коаксиальный вывод; 7 – импеллер реактора; 8 – узел «мокрой» очистки отходящих газов; 9 – вытяжной вентилятор; 10 – воздуховод; 11 – газоанализатор; 12 – пробоотборник; 13 – защитный кожух пирометра; 14 – пирометр IPE 140/45;

ВЧГ – высокочастотный генератор

Данная экспериментальная установка имеет высокочастотный генератор ВЧГ8-60/13-01 (колебательная мощность до 60 кВт, рабочая частота 13,56 МГц). Высокочастотная энергия подается на водоохлаждаемый медный электрод 4

ВЧФ-плазмотрона 3 с помощью коаксиального вывода 6. ВЧФ-плазмотрон 3 предназначен для генерирования воздушных плазменных струй со среднемассовой температурой до 4000 К. Разрядная камера ВЧФ-плазмотрона изготовлена из кварцевой трубки диаметром 50 мм и длиной 860 мм [27].

Прокачка плазмообразующего газа (воздуха) через ВЧФ-плазмотрон 3 и через реактор обеспечивается высоконапорным вытяжным вентилятором 9 (ВР 12-26, №4).

Узел ввода плазмообразующего газа, установленный на входе в ВЧФ-плазмотрон, снабжен импеллером для закрутки поступающего плазмообразующего газа (воздуха) в разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона и имеет постоянную входную площадь $S_{\text{вх}} = 25 \text{ см}^2$.

Импеллер реактора 7, установленный на входе в реактор, предназначен для закрутки поступающего в реактор воздуха и позволяет шибером регулировать входную площадь импеллера $S_{\text{им}}$ в пределах $0 \div 1650 \text{ см}^2$.

Определение содержания в отходящих после реактора газах загрязняющих веществ (CO , NO , NO_2) производится газоанализатором «Quintox» КМ 9106 11 с пробоотборником 12. Измерение скорости воздушного потока после реактора в газоходе диаметром 250 мм ($S_{\text{гхд}} = 500 \text{ см}^2$) и скорости плазмообразующего газа (воздуха) через ВЧФ-плазмотрон производится также газоанализатором «Quintox» КМ 9106 11 с пробоотборником 12 с помощью трубки Пито.

Для бесконтактного измерения температуры плазменного горения в реакторе горючих композиций по линии поглощения образующегося диоксида углерода CO_2 используется пирометр IPE 140/145 14.

3.2 Исследование режимов работы плазменного реактора на базе ВЧФ-плазмотрона

При проведении исследования режимов работы плазменного реактора на базе ВЧФ-плазмотрона проведена оптимизация режимов работы системы «ВЧГ–ВЧФ-плазмотрон». Оптимизация режимов работы системы «ВЧГ–ВЧФ-плазмотрон» заключалась в определении потери тепловой мощности на водоохлаждаемых теплонапряженных элементах генератора (анод генераторной лампы и сеточная индуктивность) и ВЧФ-плазмотрона (электрод и корпус).

При расчете этих технологических параметров работы плазменного реактора на базе ВЧФ-плазмотрона найдены следующие величины:

- мощность, потребляемая ВЧГ от промышленной сети:

$$P_o = I_a \cdot U_a, \text{ кВт}, \quad (3.2.1)$$

где I_a – ток анода А;

U_a – напряжение на аноде генераторной лампы, кВ.

- мощность, выделяемая на аноде генераторной лампы:

$$P_a = m_a \cdot C_p \cdot \Delta t_a \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (3.2.2)$$

где m_a – массовый расход воды, кг/с;

Δt_a – изменение температуры охлаждающей воды, °С;

C_p – теплоемкость воды, ккал/кг·°С.

- мощность, выделяемая на сеточной индуктивности:

$$P_c = m_c \cdot C_p \cdot \Delta t_c \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (3.2.3)$$

где m_c – массовый расход воды, кг/с;

Δt_c – изменение температуры охлаждающей воды, °С;

C_p – теплоемкость воды, ккал/кг·°С.

- мощность, выделяемая на электроде:

$$P_{эл} = m_{эл} \cdot C_p \cdot \Delta t_{эл} \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (3.2.4)$$

где $m_{эл}$ – массовый расход воды, кг/с;

$\Delta t_{эл}$ – изменение температуры охлаждающей воды, °С;

C_p – теплоемкость воды, ккал/кг·°С.

– мощность, выделяемая на корпусе плазмотрона:

$$P_{\text{кп}} = m_{\text{кп}} \cdot C_p \cdot \Delta t_{\text{кп}} \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (3.2.5)$$

где $m_{\text{кп}}$ – массовый расход воды, кг/с;

$\Delta t_{\text{кп}}$ – изменение температуры охлаждающей воды, °С;

C_p – теплоемкость воды, ккал/кг·°С.

– мощность ВЧФ-разряда:

$$P_{\text{разр}} = P_0 - (P_a + P_c + P_{\text{э}}), \text{ кВт} \quad (3.2.6)$$

– мощность плазменной струи (разность между мощностью ВЧФ-разряда и мощностью, выделяющейся на корпусе плазмотрона):

$$P_{\text{стр}} = P_{\text{разр}} - P_{\text{кп}}, \text{ кВт} \quad (3.2.7)$$

– энтальпия плазменной струи:

$$H_T = H_0 + \frac{P_{\text{разр}}}{Q_{\text{пг}}}, \text{ кДж/кг}, \quad (3.2.8)$$

где H_0 – энтальпия газовой смеси при температуре 300 К;

$Q_{\text{пг}}$ – массовый расход плазмообразующего газа, кг/с.

– коэффициент полезного действия ВЧФ-плазмотрона:

$$\eta = \left(\frac{P_{\text{стр}}}{P_{\text{разр}}} \right) \cdot 100, \% \quad (3.2.9)$$

– установочный коэффициент полезного действия плазменного стенда:

$$\eta = \left(\frac{P_{\text{стр}}}{P_0} \right) \cdot 100, \% \quad (3.2.10)$$

Также определена среднемассовая температура плазменной струи с помощью графика влияния температуры воздуха на его энтальпию (рис. 3.2).

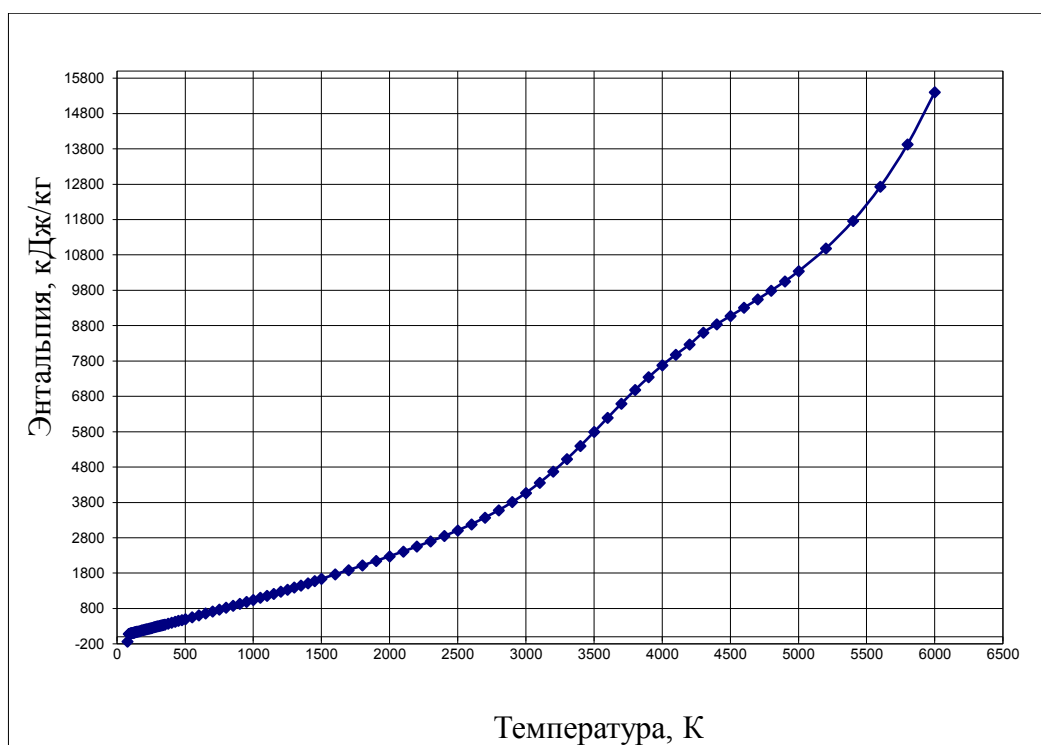


Рисунок 3.2 Влияние температуры воздуха на его энтальпию

На рисунке 3.3 показано влияние входной площади импеллера реактора на среднемассовую температуру воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном (при анодных токах генератора $I_a = 3,0 \text{ A}$; $I_a = 3,5 \text{ A}$; $I_a = 4,0 \text{ A}$; $I_a = 4,5 \text{ A}$).

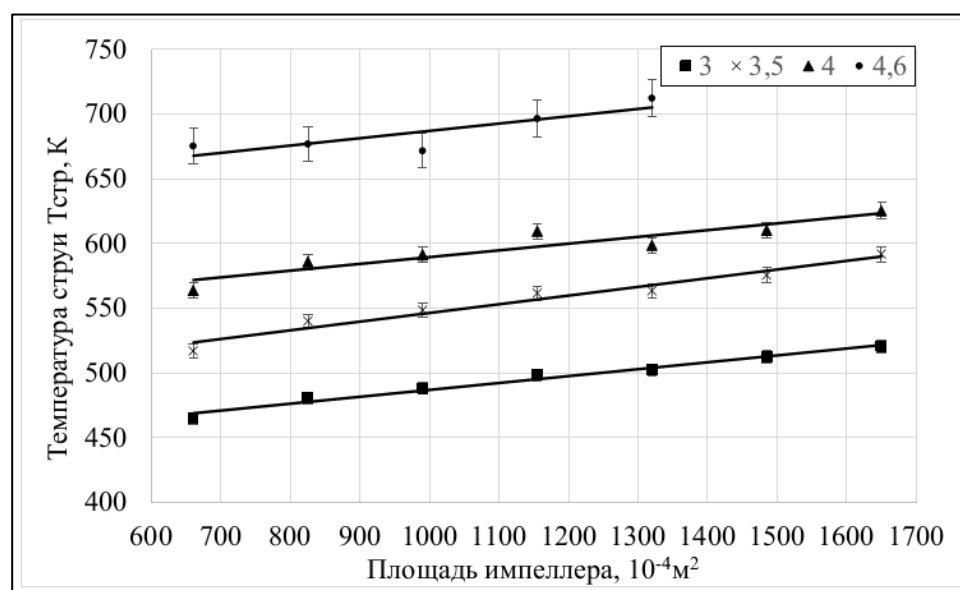


Рисунок 3.3 Влияние входной площади импеллера реактора на среднемассовую температуру воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном

Оптимальный режим работы плазменного реактора на базе ВЧФ-плазмотрона выбирается с таким расчетом, чтобы температура пламенной струи была не меньше температуры воспламенения горючего компонента перерабатываемой ВСОК.

3.2.1 Определение расхода плазмообразующего газа через разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона и газоход после реактора

Измерение расхода воздуха (как массового, так и объёмного) через разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона и газоход после узла «мокрой» очистки отходящих из реактора газов проводилось с помощью трубки Пито (рис. 3.3).

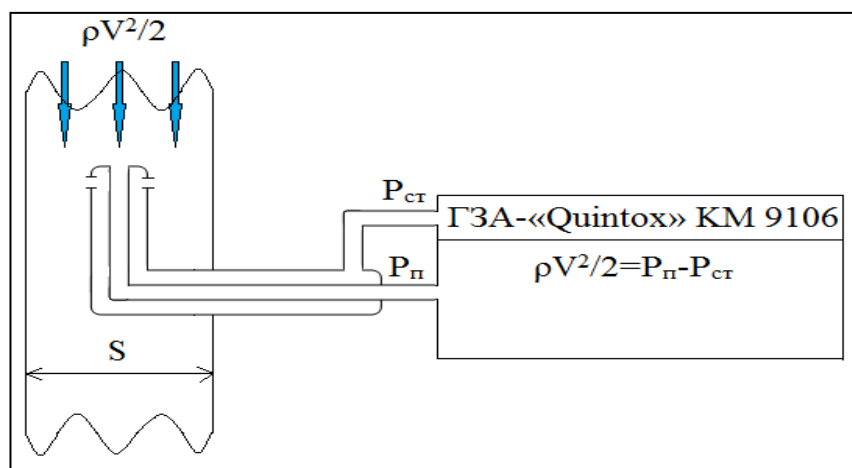


Рисунок 3.3 Схема определения расхода воздуха через разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона и газоход с помощью трубки Пито

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

$$f = (\rho V^2)/2 = P_{\text{п}} - P_{\text{ст}}, \quad (3.2.1.1)$$

где $P_{\text{п}}$ – полное давление;

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

ρ – плотность воздуха при температуре T ;

$f = (\rho V^2)/2$ – напор, создаваемый набегающим потоком воздуха.

Скорость набегающего потока определяется по формуле:

$$V = [2 \cdot (P_{\text{п}} - P_{\text{ст}}) / \rho]^{0,5}. \quad (3.2.1.2)$$

Расход воздуха (как массовый, так и объёмный) через воздуховод определяется по формуле:

$$Q = S \cdot V, \quad (3.2.1.3)$$

где S – площадь поперечного сечения воздуховода.

Проведены измерения расхода воздуха (как массового, так и объёмного) через ВЧФ-плазмотрон без узла ввода ПГ (Приложение Б, табл. Б.1).

В ходе исследования установлено влияние входной площади импеллера реактора на объёмный расход воздуха (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 Влияние входной площади импеллера реактора на объёмный расход воздуха через ВЧФ-плазмотрон

Из анализа полученных зависимостей следует, что увеличение входной площади импеллера реактора приводит к заметному снижению объёмного расхода воздуха через ВЧФ-плазмотрон. Провели математическую обработку полученных данных: относительная погрешность составила не более 17 %.

Проведены измерения расхода воздуха (как массового, так и объёмного) через газоход с узлом и без узла ввода ПГ (Приложение В, табл. В.1 и В.2 соответственно).

В ходе исследования установлено влияние входной площади импеллера реактора на объёмный расход воздуха (рис. 3.5).

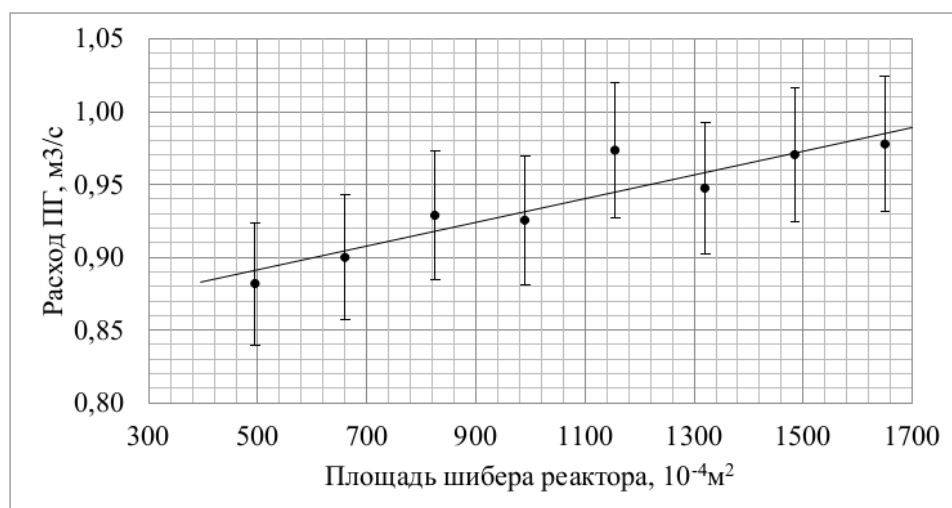


Рисунок 3.5 Влияние входной площади импеллера реактора на объёмный расход воздуха через газоход после реактора

Из анализа полученных зависимостей следует, что увеличение входной площади импеллера реактора приводит к заметному повышению объёмного расхода воздуха через газоход после реактора. Провели математическую обработку полученных данных: относительная погрешность составила не более 17 %.

Проведены вычисления температуры воздушной плазменной струи и установочного КПД установки (Приложение Г, табл. Г1).

На рисунке 3.6 показано влияние мощности ВЧФ-разряда и массового расхода воздуха на температуру воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном.

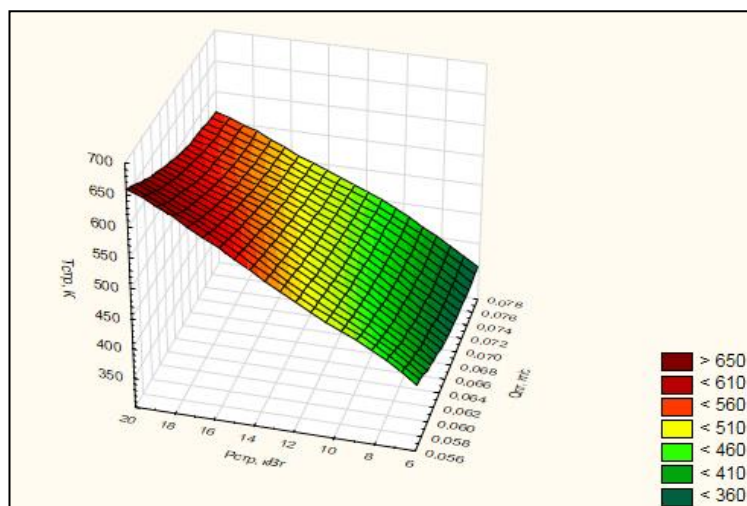


Рисунок 3.6 Влияние мощности плазменной струи и массового расхода воздуха на температуру воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном

Из анализа полученной зависимости следует, что мощность плазменной струи и массового расхода воздуха оказывают существенное влияние на среднемассовую температуру воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном.

На рисунке 3.7 показано влияние мощности ВЧФ-разряда и массового расхода воздуха на установочный КПД плазменного стенда.

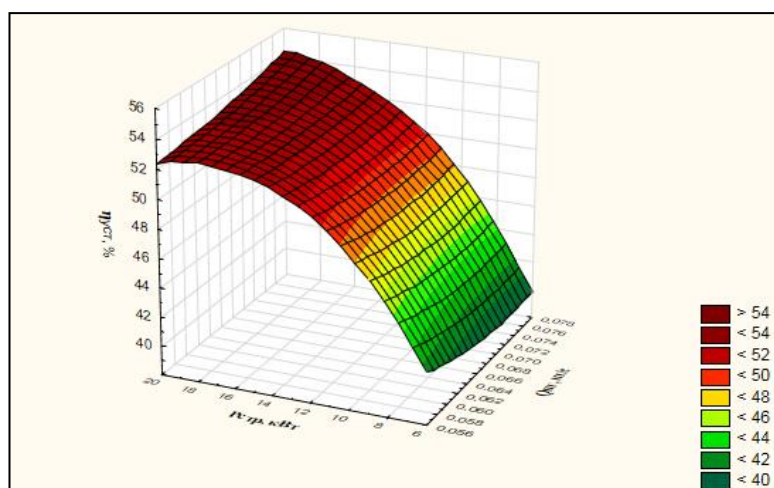


Рисунок 3.7 Влияние мощности плазменной струи и массового расхода воздуха на установочный КПД плазменного стенда

Из анализа полученной зависимости следует, что увеличение массового расхода воздуха и мощности плазменной струи приводит к плавному росту установочного КПД.

Исходя из полученных результатов исследования режимов работы плазменного стенда можно сделать вывод о том, что для практического применения следует работать при анодном токе генератора ВЧГ, равном 4,5 А, и массовом расходе воздуха от 0,076 кг/с. При этом, установочный КПД достигает 54,64 %, а температура плазменной струи 550 К.

3.2.2 Определение расхода воздуха через реактор

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

$$Q_p = Q_{ГХД} - Q_{ПТР}, \quad (3.2.2.1)$$

где Q_p – расход воздушного теплоносителя через реактор, м³/с;

$Q_{ГХД}$ – расход воздушного теплоносителя через газоход, м³/с;

$Q_{ПТР}$ – расход плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон, м³/с.

Установлено влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздушного теплоносителя через реактор и влияние входной площади импеллера реактора на объёмный расход воздушного теплоносителя через реактор (рис. 3.8 и 3.9 соответственно).

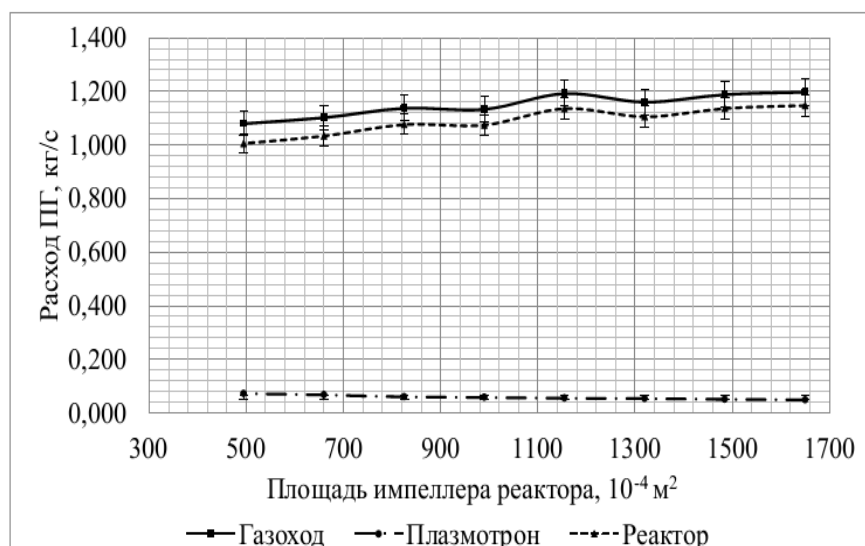


Рисунок 3.8 Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздушного теплоносителя через реактор

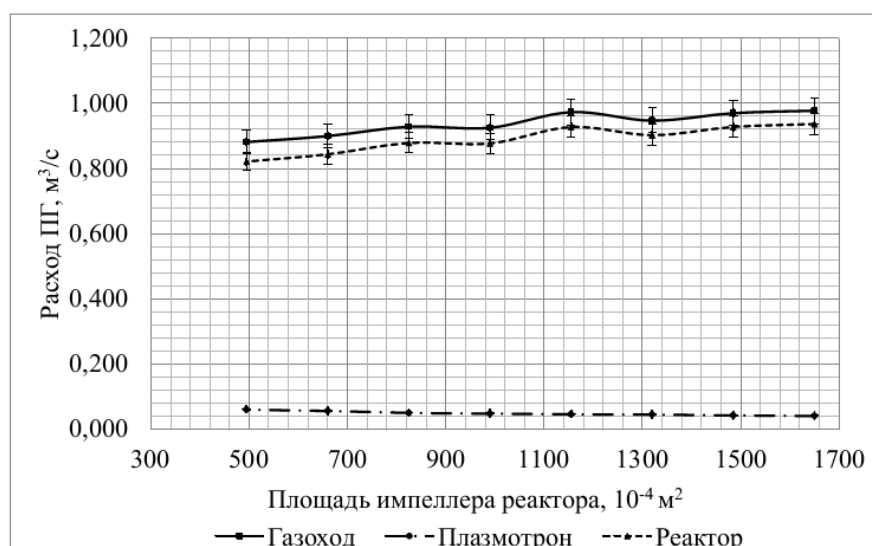


Рисунок 3.9 Влияние входной площади импеллера реактора на объёмный расход воздушного теплоносителя через реактор

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

3.3 Плазменная обработка ВСОК на основе нитрата уранила

Для подтверждения возможности плазменной обработки раствора кристаллогидрата уранила нитрата в виде ВСОК в воздушно-плазменном потоке были проведены экспериментальные исследования на модельном нитратном растворе. Для подготовки модельного нитратного раствора была использована соль кристаллогидрата цирконила нитрата ($\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (аналог кристаллогидрата уранила нитрата). Это обусловлено тем, что данное соединение в растворе формирует сложные ионы, сходные по свойствам с кристаллогидратом уранила нитрата. В качестве органического компонента использован ацетон. В таблице 3.2.5.1 представлен состав модельной ВСОК.

Таблица 3.3.1 – Соотношение компонентов перерабатываемой ВСОК

РЦН/ ВСОК	$\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	H_2O	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$
0,640	0,135	0,505	0,360

Приготовление раствора цирконила нитрата. Растворимость цирконила нитрата в воде при температуре 25 °С составляет 56,67 г ($\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2$) на 100 г (H_2O). Последовательность действий при приготовлении раствора цирконила нитрата:

- производится нагрев температуры воды до 25 °С;
- производится доведение цирконила нитрата до порошкообразного состояния с помощью фарфоровой ступки;
- производится взвешивание полученного порошка цирконила нитрата на весах для достижения его массы 56,67 г;
- после полного растворения порошка цирконила нитрата в воде производится смешивание полученного раствора цирконила нитрата с ацетоном.

Экспериментальное исследование модельного нитратного раствора.

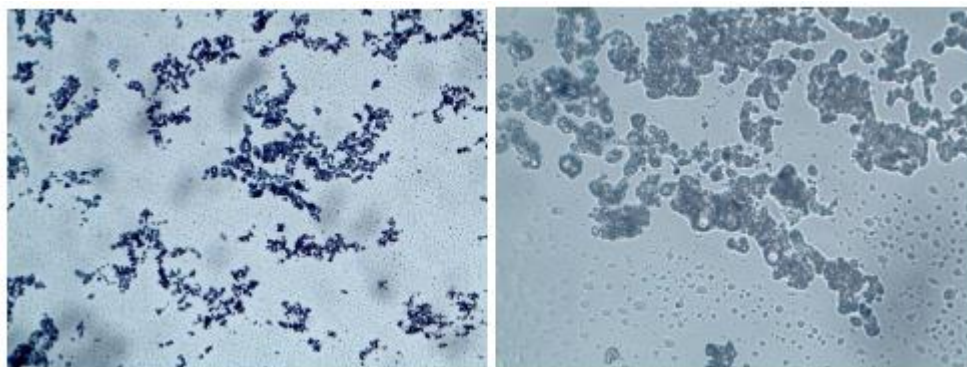
Первым этапом экспериментального исследования является доведение

ВЧФ-плазмотрона на оптимальный технологический режим работы. «Розжиг» реактора осуществляется при температуре плазменной струи 550 К, при анодном токе генератора ВЧГ равном 4,5 А и массовом расходе воздуха от 0,076 кг/с.

Вторым этапом экспериментального исследования является доведение температуры в реакторе до 1200 °С и подача модельной ВСОК (объем 5 л) в диспергатор ВЧФ-плазмотрона. В ходе переработки модельной ВСОК в воздушно-плазменном потоке образуется пылегазовая смесь, которая поступает в узел мокрой очистки экспериментальной установки. В узле мокрой очистки происходит закалка пылегазовой смеси под действием оборотной технологической воды (объем 155 л), образование водной суспензии с целевым продуктом диоксида циркония в конденсированной фазе ($ZrO_2(c)$) и его очистка от отходящих газов. При этом отходящие газы с помощью вытяжного вентилятора отправлялись в атмосферу.

Третьим этапом экспериментального исследования является получение диоксида циркония в конденсированной фазе из полученной на втором этапе водной суспензии. Водная суспензия с целевым продуктом диоксида циркония в конденсированной фазе перекачивалась в контейнер-отстойник из нержавеющей стали (объем 250 л). В этом контейнере-отстойнике происходит осаждение диоксида циркония в конденсированной фазе. Через некоторое время производится откачка воды из контейнера-отстойника до уровня осажденного целевого продукта диоксида циркония в конденсированной фазе. Оставшаяся вода с осажденным с диоксидом циркония в конденсированной фазе выпаривалась с помощью печи сопротивления до достижения постоянства веса.

Анализ полученного порошка диоксида циркония. С помощью микроскопа Motiс ВА 310 произведен структурный анализ полученного порошка диоксида циркония. На рисунках 3.3.1 и 3.3.2 представлены микрофотографии полученного порошка диоксида циркония.



а)

б)

Рисунок 3.3.1 Микрофотографии порошка диоксида циркония:

а) увеличение x10; б) увеличение x40

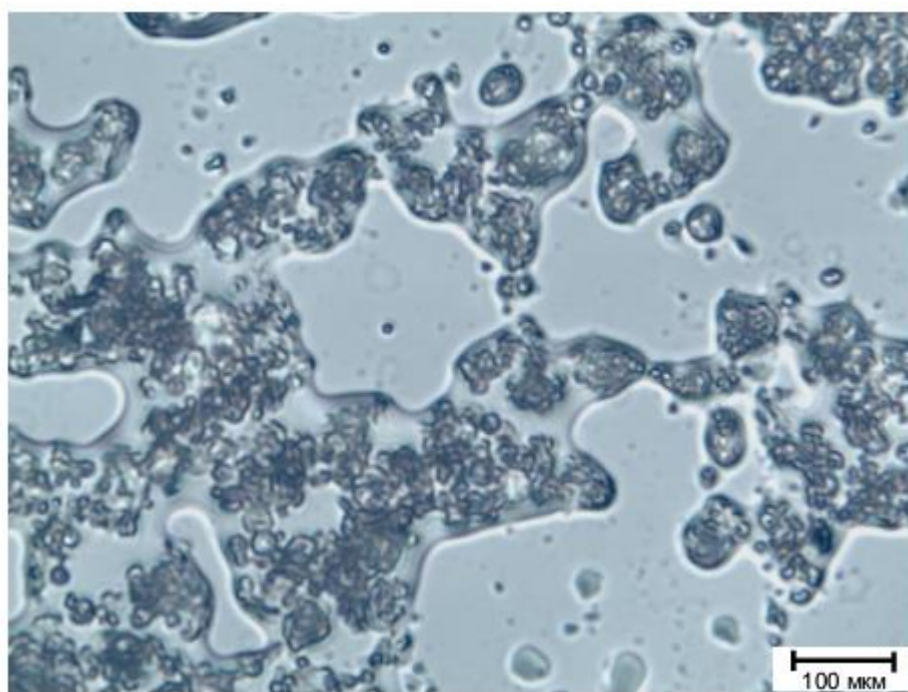


Рисунок 3.3.2 Микрофотографии порошка диоксида циркония
(увеличение x100)

Из анализа микрофотографий порошка диоксида циркония (рис. 3.3.1 и рис. 3.3.2) можно сделать вывод, что полученный порошок диоксида циркония обладает гомогенной структурой. Форма частиц одинакова, наблюдается образование рыхлых по структуре, объемных агломератов.

С помощью прибора DeslaMax PRO произведен гранулометрический анализ порошка диоксида циркония. На рисунке 3.3.3 представлено

распределение частиц по размерам в полученном порошке диоксида циркония.

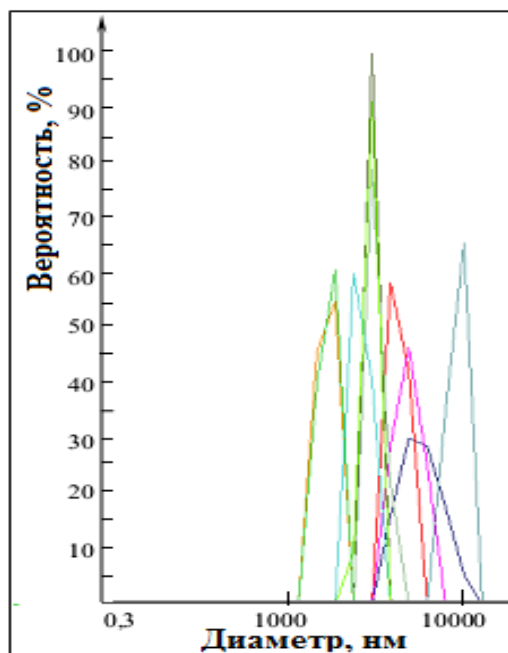


Рисунок 3.3.3 Распределение частиц по размерам в порошке диоксида циркония

Из анализа распределения частиц по размерам в порошке диоксида циркония (рис. 3.3.3) можно сделать вывод, что размер частиц в исследуемом порошке диоксида циркония находится в интервале от 1 до 10 мкм. Размеры основной доли частиц в полученном порошке диоксида циркония составляют (5 ± 3) мкм.

С помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра QUANT'X EDXRF ANALYZER произведен элементный анализ полученного порошка диоксида циркония. На рисунке 3.3.4 представлена спектрограмма РФЛА полученного порошка диоксида циркония.

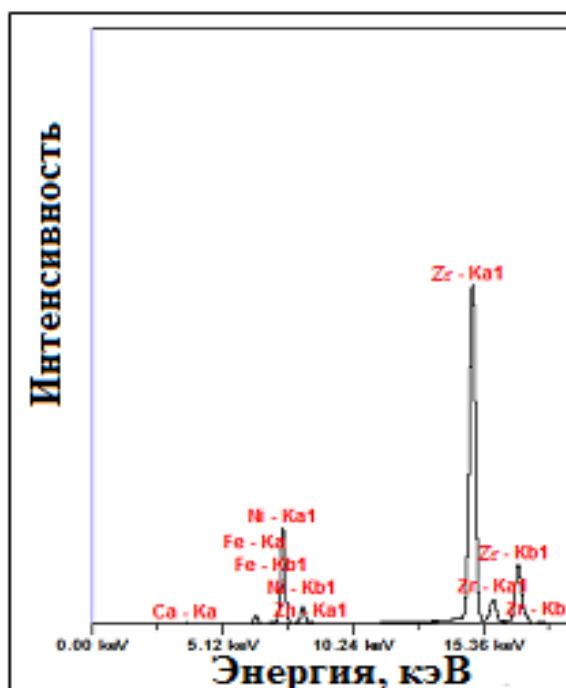


Рисунок 3.3.4 Спектрограмма РФЛА порошка диоксида циркония

Из анализа спектрограммы РФЛА порошка диоксида циркония можно (рис. 3.3.4) сделать вывод, что в порошке содержатся кальций, железо, никель, цирконий. Наличие кальция и железа объясняется тем, что в качестве ОТВ, в которой проходило осаждение порошков, использовали обычную водопроводную воду. Соответственно, содержащиеся в воде растворимые соединения кальция и железа после выпарки водной суспензии перешли в порошок.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Для эффективного использования научного потенциала НИР необходимо прилагать усилия не только к непосредственно её разработке, но и к проведению её анализа с точки зрения экономических требований в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Для проведения анализа НИР в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения были рассмотрены следующие вопросы:

- оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование процесса управления НИИ;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей) и финансовой эффективности исследования.

4.1 Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования настоящей работы был рассмотрен целевой рынок и проведено его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

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

В зависимости от категории потребителей (коммерческие организации,

физические лица) необходимо использовать соответствующие критерии сегментирования. Из выявленных критериев целесообразно выбрать два наиболее значимых для рынка. На основании этих критериев строится карта сегментирования рынка [28].

В данной магистерской диссертации проводится моделирование и исследование процесса плазменной конверсии ОГФУ.

Целевым рынком для результатов проводимых исследований будет являться Госкорпорация «Росатом» и принадлежащие ей промышленные предприятия по получению ядерного топлива, предприятия по переработке радиоактивных отходов, проектные институты. Карта сегментирования рынка услуг по использованию результатов исследования представлена на рис. 4.1.1.

		Моделирование и исследование процесса плазменной конверсии отвального гексафторида урана		
		Предприятия по переработке радиоактивных отходов	Предприятия по получению ядерного топлива	Проектные институты
Потребность	Сильная			
	Слабая			

Рисунок 4.1.1 Карта сегментирования рынка услуг по использованию результатов исследований

Из анализа карты сегментирования рынка (рис. 4.1.1) можно сделать вывод, что потенциальными потребителями результатов исследования могут быть предприятия по переработке радиоактивных отходов и проектные институты.

4.1.2 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 [28].

SWOT – анализ состоит из трех этапов. В первом этапе мы анализируем сильные и слабые стороны исследовательской работы (внутренняя среда), а также возможности и угрозы (внешняя среда). Описание выполняется с помощью факторов, не имеющих количественной оценки (Приложение Д, табл. Д1).

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа построили интерактивную матрицу проекта (таблица 4.1.2.1). Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 4.1.2.1 – интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта							
Возможности проекта		C1.	C2.	C3.	C4.	C5.	C6.
	B1.	+	–	+	–	–	+
	B2.	+	+	+	0	+	+
	B3.	+	+	+	–	0	0
Угрозы проекта	У1.	–	+	–	+	–	+
	У2.	–	–	–	–	–	–
	У3.	–	+	–	+	–	+
Слабые стороны проекта							
		Сл1.	Сл2.	Сл3.	Сл4.		
Возможности проекта	B1.	–	–	+	–		
	B2.	–	+	–	+		
	B3.	–	+	–	–		
Угрозы проекта	У1.	+	–	–	–		
	У2.	+	–	–	+		
	У3.	+	–	–	0		

Третий этап заключается в составлении итоговой матрицы SWOT – анализа (Приложение Д, табл. Д2). Она заполняется, исходя из анализа таблицы 4.1.2.1.

Таким образом, из таблицы SWOT – анализа видно, что наиболее перспективным путем развития проекта является поиск заинтересованных предприятий разделительного производства как первоначального потребителя.

Из анализа можно сделать вывод, что создаваемая технология является перспективной при современном уровне развития технологий в данном секторе промышленности.

4.2 Планирование научно-исследовательской работы

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

Для выполнения научных исследований сформирована рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и дипломник.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления. Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок составления этапов и работ приведен в таблице Д3 (Приложение Д).

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения НИР

Трудоемкость выполнения НИР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества

трудно учитываемых факторов. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости работ $t_{ож}$ используется следующая формула:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (4.2.2.1)$$

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

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

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

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{ч_i}, \quad (4.2.2.2)$$

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

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

$ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел [28].

4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Показатель технической готовности темы характеризует отношение продолжительности работ, выполненных на момент исчисления этого показателя, к общей запланированной продолжительности работ, при этом следует учесть, что дипломник выступает в качестве основного исполнителя.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ

из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.2.3.1)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;
 T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;
 $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4.2.3.2)$$

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

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

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} \approx 1.22.$$

Все рассчитанные значения сведены в таблицу 4.2.3.1.

Календарный план-график в виде диаграммы Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится на основе данных из таблицы 4.2.3.1 разбивкой по дням (декадам, месяцам) за период времени дипломирования. Работы на графике выделены различным цветом (штриховкой) в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу. Календарный план – график в виде диаграммы Ганта приведен в таблице Д5 (приложение Д).

Таблица 4.2.3.1 – Временные показатели проведения научного исследования

Этап	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях p_i	Длительность работ в календарных днях k_i
	$t_{\min}$, чел-дни	$t_{\max}$, чел-дни	$t_{\text{ож}i}$, чел-дни			
1	0,83	1	0,90	руководитель	0,90	1
2	1,80	2	1,88	инженер	1,88	2
3	3,83	5	4,30	инженер	4,30	5
4	0,83	1	0,90	инженер	0,90	1
5	2,33	4	3,00	инженер	3,00	4
6	2,50	4	3,10	инженер	3,10	4
7	2,67	4	3,20	инженер	3,20	4
8	3,53	7	4,92	руководитель, инженер	2,46	3
9	3,53	7	4,92	руководитель, инженер	2,46	3
10	4,20	6	4,92	инженер	4,92	6
11	5,60	8	6,56	руководитель, инженер	3,28	4
12	7,03	12	9,02	инженер	9,02	11
13	12,62	20	15,57	инженер	15,57	19
Итого:			63,19		54,99	67

4.3 Бюджет НТИ

Целью планирования бюджета для проведения НТИ является экономически обоснованное определение величины затрат на ее выполнение.

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения [28].

В бюджет НТИ включаются все затраты, связанные с ее выполнением. В настоящей работе в бюджет входят следующие затраты на её выполнение:

- материальные затраты;
- амортизация основного оборудования;

- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- накладные расходы.

Произведен расчет этих затрат, которые далее будут представлены.

4.3.1 Расчет материальных затрат

К числу материальных затрат при проведении НТИ относятся:

- 1) затраты на сырьё, основные и вспомогательные материалы;
- 2) затраты на покупные изделия и полуфабрикаты;
- 3) затраты на электроэнергию и воду, расходуемые для экспериментов.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (от 3 до 5 % от цены) [28].

Так как эксперименты и расчеты при проведении НТИ были осуществлены на базе кафедры Технической физики ФТИ НИ ТПУ с имеющимся сырьем и материалами, то затраты на сырьё, основные и вспомогательные материалы и транспортно-заготовительные расходы отсутствуют.

При проведении НТИ комплектующие изделия и полуфабрикаты не закупались, следовательно, затраты на покупные изделия и полуфабрикаты отсутствуют.

В итоге в настоящей работе материальные затраты соотносятся с затратами на электроэнергию и воду, которые использовались в ходе выполнения НТИ.

Произведен расчет затрат на электроэнергию и воду, которые использовались в ходе выполнения НТИ. Эксперименты на ВЧФ-плазмотроне проводились 14 дней по 4 часа (56 часов), мощность установки 100 КВт/час и расход охлаждающей воды (не менее) 1,8 м³/час.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} , \quad (4.3.1.1)$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (5,80 руб за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

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

$$C_{эл} = 5,80 \cdot 100 \cdot 56 = 32480 \text{ руб.}$$

Затраты на водоснабжение рассчитываются по формуле:

$$C_{вд} = C_{вд} \cdot Q \cdot F_{об} , \quad (4.3.1.2)$$

где $C_{вд}$ – тариф на промышленное водоснабжение (28,19 руб за 1 м³);

Q – расход воды, м³;

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

$$C_{вд} = 28,19 \cdot 1,8 \cdot 56 = 2841,55 \text{ руб.}$$

Материальные затраты находятся по формуле:

$$C_{м} = C_{эл} + C_{вд} , \quad (4.3.1.3)$$

$$C_{м} = 32480 + 2841,55 = 35321,55 \text{ руб.}$$

4.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Данная статья включает все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимых для проведения исследовательских работ.

При проведении научно-технических исследований в рамках данного проекта использовался портативный газоанализатор Kane Quintox KM9106, проведем расчет затрат на амортизацию используя линейный метод.

При этом методе амортизация начисляется равными долями в течении всего срока эксплуатации. Для расчета берется первоначальная стоимость оборудования, складывающаяся из всех затрат, понесенных в связи с приобретением объекта.

Расчет амортизационных отчислений производится по формуле:

$$A = \frac{C \cdot H_a}{100}, \quad (4.3.2.1)$$

где C – стоимость оборудования;

H_a – норма амортизации.

Норма амортизации – это показатель, определяющий какая часть стоимости оборудования должна быть в течение года учтена в себестоимости продукции для компенсации износа оборудования.

Стоимость портативного газоанализатор Kane Quintox KM9106 составляет 542800 рублей. Заявленный срок службы составляет 6 лет.

Годовая норма амортизации составит:

$$H_a = \frac{1}{6} \cdot 100 = 16,67 \%. \quad (4.3.2.2)$$

Тогда годовые амортизационные отчисления равны:

$$A = \frac{542800 \cdot 16,67}{100} = 90484,76 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления за период использования оборудования исчисляются по формуле:

$$A = \frac{C \cdot H_a}{100} \cdot \frac{T_{\text{раб}}}{\Phi_{\text{раб}}}, \quad (4.3.2.3)$$

где $\Phi_{\text{раб}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени;

$T_{\text{раб}}$ – период использования оборудования.

Тогда амортизационные отчисления за период использования оборудования равны:

$$A = 90484,76 \cdot \frac{14}{251} = 5056,96 \text{ руб.}$$

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из

трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере от 20 до 30 % от тарифа или оклада.

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

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}, \quad (4.3.3.1)$$

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

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($З_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p, \quad (4.3.3.2)$$

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot k_p \cdot M}{F_d}, \quad (4.3.3.3)$$

где $З_m$ – месячный должностной оклад работника, руб. (в качестве месячного оклада дипломника выступает оклад инженера, которая составляет 9893 руб. и 26300 руб. для доцента, кандидата наук);

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 48 раб. дней $M=10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

при отпуске в 24 раб. дня $M=11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл. 4.3.3.1);

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 для Томска.

Баланс рабочего времени представлен в таблице 4.3.3.1.

Таблица 4.3.3.1 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
-выходные дни	52	104
-праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
-отпуск	56	24
-невыходы по болезни	—	—
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	223

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.3.3.2.

Таблица 4.3.3.2 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	k_p	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	1,3	26300	1125,60	6	8779,68
Инженер	1,3	9893	496,87	61	39401,79
Итого $Z_{осн}$					48181,47

4.3.4 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из 10-15 % от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{доп} = k_{доп} \times Z_{осн}, \quad (4.3.4.1)$$

где $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплаты ($k_{доп} = 0,12$ – среднее);

$Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб.

В таблице 4.3.4.1 приведен расчёт основной и дополнительной

заработной платы.

Таблица 4.3.4.1 – Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата, руб	8779,68	39401,79
Дополнительная зарплата, руб	1053,56	4728,21
Зарплата исполнителя, руб	9833,24	44130,00
Итого по статье $C_{зн}$, руб	53963,24	

4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Дипломная работа выполнялась с 10.04.2017 по 16.06.2017. С 01.01.2010 страховые взносы осуществляются в государственные внебюджетные фонды. На 2017 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30 %.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (4.3.5.1)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Таким образом, выплаты в страховые фонды составят:

$$З_{внеб} = 0,3 \cdot (53963,24) = 16188,97 \text{ руб.}$$

4.3.6 Накладные расходы

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

Накладные расходы в ТПУ составляют от 12 до 16 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}} + З_{\text{внеб}}) \quad (4.3.6.1)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

$$З_{\text{накл}} = 0,14 \cdot (53963,24 + 16188,97) = 9821,31 \text{ руб.}$$

4.3.7 Формирование бюджета затрат НТИ

На основании полученных значений затрат разрабатывается бюджет на научно-техническое исследование, приведенный в таблице 4.3.7.1.

Таблица 4.3.7.1 – Бюджет НТИ

Наименование статьи затрат	Сумма, руб.
1. Материальные затраты	35321,55
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	5056,96
3. Затраты на оплату труда исполнителей НИР	53963,24
4. Страховые отчисления	16188,97
5. Накладные расходы	9821,31
Итого	120352,03

4.4 Организационная структура НТИ

Организационная структура НТИ представляет собой временное структурное образование, создаваемое для достижения поставленных целей и задач НТИ и включающее в себя всех участников процесса выполнения работ на каждом этапе.

Данной ВКР соответствует функциональная структура организации. То есть организация рабочего процесса выстроена иерархически: у каждого участника НТИ есть непосредственный руководитель, сотрудники разделены по областям специализации, каждой группой руководит компетентный специалист (функциональный руководитель).

Иерархическая структура НТИ представлена на рисунке 4.4.1.



Рисунок 4.4.1 Иерархическая структура НТИ

4.5 Матрица ответственности НТИ

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

- а) ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа НТИ и контролирующее его ход;
- б) исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта. Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа НТИ (если этап предусматривает утверждение);
- в) согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов НТИ и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

Матрица ответственности НТИ представлена в таблице Д4 (Приложение Д).

4.6 Оценка научно-технического эффекта

Социально-научный эффект проявляется в росте числа открытий, изобретений, увеличении суммарного объема научно-технической информации,

полученной в результате выполнения НИР, создания научного «задела», являющегося необходимой предпосылкой для проведения в будущем прикладных НИР и выполнения работ по модернизации конструкций выпускаемых изделий. За последние годы появились предложения не только по качественной характеристике социального эффекта, но и по системе количественных показателей его оценки.

Элементом количественной оценки социально-научного эффекта следует считать определение научно-технического эффекта НИР. Коэффициент научно-технического эффекта НИР определяется на основе оценок признаков работы:

$$H_T = \sum_{i=1}^3 r_i \cdot k_i, \quad (4.6.1)$$

где r_i – весовой коэффициент i -того признака (определяется по таблице 4.6.1);

k_i – количественная оценка i -того признака.

Таблица 4.6.1 – Значения i -того признака

Признак научно-технического эффекта НИР (i)	Примерные значения весового коэффициента (r)
Уровень новизны	0,6
Теоретический уровень	0,4
Возможности реализации	0,2

Количественная оценка уровня новизны НИР определяется на основе значения баллов по таблице 4.6.2.

Таблица 4.6.2 – Значения баллов по уровню новизны НИР

Уровень новизны разработки	Характеристика уровня новизны	Баллы
Принципиально новая	Результаты исследований открывают новое направление в данной области науки и техники	8-10
Новая	По-новому или впервые объяснены известные факты, закономерности	5-7
Относительно новая	Результаты исследований систематизируют и обобщают имеющиеся сведения, определяют пути дальнейших исследований	2-4
Традиционная	Работа, выполненная по традиционной методике, результаты исследований носят информативный характер	1
Не обладающая новизной	Получен результат, который был ранее известен	0

Теоретический уровень полученных результатов НИР определяется на основе значения баллов, приведенных в таблице 4.6.3.

Таблица 4.6.3 – Значения баллов по теоретическому уровню НИР

Теоретический уровень полученных результатов	Баллы
Установление закона; разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблемы: многоаспектный анализ связей, взаимозависимости между фактами с наличием объяснений	8
Разработка способа (алгоритм, программа мероприятий и т.п.)	6
Элементарный анализ связей между фактами с наличием гипотезы, симплексного прогноза, классификации, объясняющей версии или практических рекомендаций частного характера	2
Описание отдельных элементарных фактов (вещей, свойств и отношений); изложение опыта, наблюдений, результатов измерений	0,5

Возможность реализации научных результатов определяется на основе значений баллов по таблице 4.6.4.

Таблица 4.6.4 – Значения баллов по возможности реализации научных результатов

Время реализации	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Более 10 лет	2
Масштабы реализации	Баллы
Одно или несколько предприятий	2
Отрасль (министерство)	4
Народное хозяйство	10
Примечание: Баллы по времени и масштабам реализации складываются	

Определены баллы на результаты исследований ВКР. Результаты исследований ВКР могут быть использованы при создании энергоэффективной технологии плазменной конверсии ОГФУ с получением целевых продуктов вследствие чего определен уровень новизны разработки как относительно новый, т. е. $k_1 = 6$ (табл. 4.6.2).

В результате исследований был разработан метод плазменной конверсии ОГФУ с получением диоксида урана в конденсированной фазе в воздушной плазме с инъекцией водорода. Теоретический уровень ВКР $k_2 = 6$ (табл. 4.6.3).

Возможность реализации результатов разработки: по времени – в течение первых трех лет, по масштабам реализации – в атомной промышленности. В соответствии с таблицей 4.6.4 $k_3 = 10 + 4 = 14$.

Коэффициент научно-технического эффекта равен:

$$H_T = 0,6 \cdot 6 + 0,4 \cdot 6 + 0,2 \cdot 14 = 8,8.$$

Таблица 4.6.5 – Оценка уровня научно-технического эффекта

Уровень научно-технического эффекта	Коэффициент научно-технического эффекта
Низкий	1-4
Средний	5-7
Сравнительно высокий	8-10
Высокий	11-14

По коэффициенту научно-техническому эффекту определен уровень научно-технического эффекта, как сравнительно высокий (табл. 4.6.5).

5 Социальная ответственность

Работы по дипломному проекту проводились лаборатории кафедры ТФ, работа велась с использованием химических реактивов, источников питания (в т.ч. высокочастотных), электронно-вычислительной и измерительной аппаратуры. Поэтому организация безопасной и безаварийной работы требует соблюдения производственной дисциплины, уверенности знаний правил эксплуатации и техники безопасности, а также ясного представления об опасностях, которые могут появиться при выполнении работ.

Данный раздел включает в себя: законодательные основы охраны труда, общие требования безопасности труда, требования безопасности работы для работников лаборатории, допуск к работе и требования безопасности при работе с вредными химическими веществами, поведение работников в случае возникновения аварийных ситуаций, меры оказания первой помощи при несчастных случаях.

При составлении раздела, использовались нормативно-правовые документы по охране труда и окружающей среды Российской Федерации, устанавливающие правила, процедуры, критерии и нормативы, направленные на сохранение жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности.

5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов при работе в лаборатории

Опасным производственным фактором, согласно [29], называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего, в определенных условиях, приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

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

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

Специфика проводимых работ сопряжена с воздействием опасных и вредных факторов, представленных в таблице 5.1.

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

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Расчёт данных на ПЭВМ. Работа на плазменной установке.	–	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.)	–	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы» СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (эми рч)»
Работа с химическими реактивами	Химическое воздействие	–	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества

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

Физические:

- температура и влажность воздуха;
- температура оборудования;

- шум;
- статическое электричество;
- электромагнитное поле низкой частоты;
- освещённость;
- наличие излучения.

Химические: вредные вещества (оксиды азота и углерода).

Психофизиологические:

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

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

5.2.1 Организационные мероприятия

Организация и охрана труда при работе на ПЭВМ, регулируется документами: СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».

Общие требования. Продолжительность и организация рабочего дня для сотрудников, работающих с ПЭВМ определяются Правилами внутреннего распорядка университета. В особых случаях продолжительность рабочего дня может быть изменена решением администрации в установленном порядке, при этом ежедневная работа высокой интенсивности и с нервно–эмоциональным напряжением по 12 и более часов не допускается.

5.2.2 Технические мероприятия

Организация рабочего места. 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.

Графическое представление зон легкой досягаемости рук изображено на рисунке 5.1.

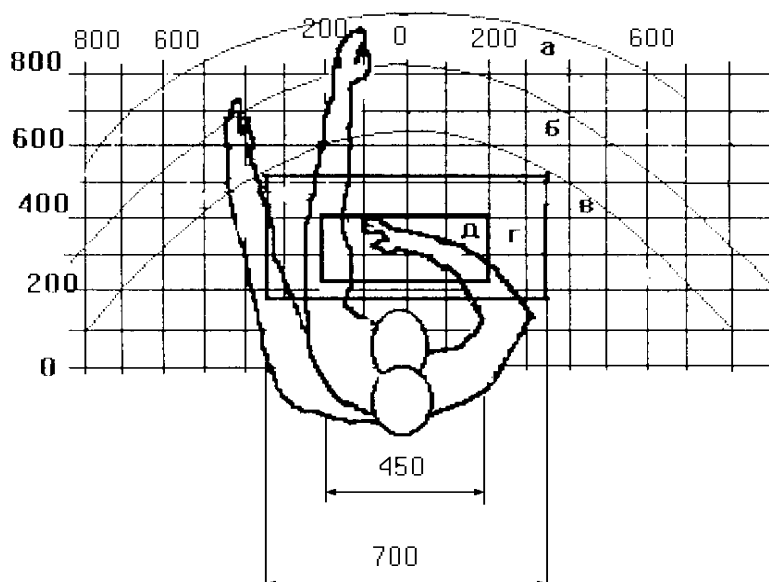


Рисунок 5.1. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

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); документация – в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования. Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах от 680 до 800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее

700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

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

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

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

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

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

Рабочие места с персональными компьютерами по отношению к световым проемам должны располагаться так, чтобы естественный свет падал сбоку, преимущественно слева.

Оконные проемы в помещениях, где используются персональные компьютеры, должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа:

жалюзи, занавесей, внешних козырьков и др.

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

5.2.3 Условия безопасности работы

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии со [30] и приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата.

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

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

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и

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

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

При работе на ВЧФ-плазматроне на человека воздействует электромагнитное поле (ЭМП). Энергетическая экспозиция за рабочий день (рабочую смену) не должна превышать значений, указанных в таблице 5.3. Во всех случаях при указании диапазонов частот каждый диапазон исключает нижний и включает верхний предел частоты.

Таблица 5.3 – Предельно допустимые значения энергетической экспозиции

Диапазоны частот	Предельно допустимая энергетическая экспозиция		
	По электрической составляющей, $(В/м)^2 \cdot ч$	По магнитной составляющей, $(А/м)^2 \cdot ч$	По плотности потока энергии, $(мкВт/см^2) \cdot ч$
От 30 кГц до 3 МГц	20000,0	200,0	—
От 3 до 30 МГц	7000,0	Не разработаны	—
От 30 до 50 МГц	800,0	0,72	—
От 50 до 300 МГц	800,0	Не разработаны	—
От 300 МГц до 300 ГГц	—	—	200,0

Защита персонала от воздействия ЭМП осуществляется путем проведения организационных и инженерно-технических мероприятий, а также использования средств индивидуальной защиты.

К организационным мероприятиям относятся: выбор рациональных режимов работы оборудования; ограничение места и времени нахождения персонала в зоне воздействия ЭМП (защита расстоянием и временем).

Инженерно-технические мероприятия включают: рациональное размещение оборудования; использование средств, ограничивающих поступление электромагнитной энергии на рабочие места персонала (поглотители мощности, экранирование, использование минимальной необходимой мощности генератора); обозначение и ограждение зон с повышенным уровнем ЭМП.

Экранирование источников ЭМП или рабочих мест осуществляется с помощью отражающих или поглощающих экранов (стационарных или переносных). Отражающие экраны выполняются из металлических листов, сетки, ткани с микропроводом. В поглощающих экранах используются специальные материалы, обеспечивающие поглощение излучения соответствующей длины волны. В зависимости от излучаемой мощности и взаимного расположения источника, и рабочих мест конструктивное решение экрана может быть различным

К средствам индивидуальной защиты относятся защитные очки, щитки, шлемы, защитная одежда (комбинезоны, халаты).

Экран и системные блоки ПЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно [30] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот от 5Гц до 2кГц – 25В/м;
- в диапазоне частот от 2кГц до 400кГц – 2,5В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот от 5Гц до 2кГц – 250нТл;

- в диапазоне частот от 2кГц до 400кГц – 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

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

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По нормам [30] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

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

5.3 Требования безопасности при выполнении работ в химических лабораториях

5.3.1 Общие требования

Под "использованием химических веществ" в соответствии с [31] следует понимать любую трудовую деятельность, при которой работник может подвергнуться воздействию химического вещества, включая:

- производство химических веществ;
- обращение с химическими веществами;
- хранение химических веществ;
- транспортировку химических веществ;
- удаление и обработку отходов химических веществ;

- выброс химических веществ в результате производственной деятельности;
- эксплуатацию, ремонт и очистку химического оборудования и контейнеров.

При использовании химических веществ следует учитывать их потенциальную опасность, возможность воздействия физических, химических и психофизиологических опасных и вредных производственных факторов по [32], их суммирующего и потенцирующего эффекта.

Приготовление рабочих химических растворов должно осуществляться на специальных установках при работе вентиляции с использованием средств индивидуальной защиты.

Очистка воздуха, загрязненного аэрозолями, газами и парами химических веществ и условия выброса его в атмосферу из систем местных отсосов и общеобменной вентиляции должны соответствовать требованиям [33].

Отходы химических веществ, переработка которых невозможна или нецелесообразна, подлежат обезвреживанию и утилизации с учетом класса их опасности.

5.3.2 Характеристика вредных веществ

Вредным веществом называется вещество, которое при контакте с организмом человека, в случае нарушения требований безопасности, может вызвать производственные травмы, профессиональные заболевания или отклонения в состоянии здоровья, обнаруживаемые современными методами, как в процессе работы, так и в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколений.

По степени воздействия на организм человека вредные вещества делятся на четыре класса опасности:

- вещества чрезвычайно опасные;
- вещества высоко опасные;

- вещества умеренно опасные;
- вещества мало опасные.

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

В таблице 5.4 приведены нормы ПДК вредных веществ и их класс опасности.

Таблица 5.4 Нормы ПДК

№	Вещество	ПДК, мг/м ³	Класс опасности
1	Оксид азота	5,0	2
2	Диоксид азота	2,0	2
3	Оксид углерода	20,0	4
4	Диоксид серы	10,0	3
5	Сумма углеводородов	300,0	4

Действие данных вредных веществ на организм человека весьма разнообразно. При контакте диоксида азота с влажной поверхностью (слизистые оболочки глаз, носа, бронхов) образуются азотная и азотистая кислоты, раздражающие слизистые оболочки и поражающие альвеолярную ткань легких. При высоких концентрациях оксидов азота возникают астматические проявления и отек легких. Вдыхая воздух, содержащий оксиды азота в высоких концентрациях, человек не имеет неприятных ощущений и не предполагает отрицательных последствий. При длительном воздействии оксидов азота в концентрациях, превышающих норму, люди заболевают хроническим бронхитом, воспалением слизистой желудочно-кишечного тракта, страдают сердечной слабостью, а также нервными расстройствами.

Оксид углерода опасен тем, что не имеет запаха; поэтому отравление им может произойти незаметно. Ядовитое действие оксида углерода, известное под названием угара, объясняется тем, что СО легко соединяется с гемоглобином крови и делает его неспособным переносить кислород от легких к тканям. При

вдыхании свежего воздуха образовавшееся соединение (карбоксигемоглобин) постепенно разрушается, и гемоглобин восстанавливает способность поглощать кислород.

Симптомы при отравлении сернистым газом – насморк, кашель, охриплость, першение в горле. При вдыхании сернистого газа более высокой концентрации – удушье, расстройство речи, затруднение глотания, рвота, возможен острый отёк лёгких. Может вызывать фатальные аллергические реакции у астматиков, разрушает витамин В1, повреждение органов пищеварения.

В процессе эксплуатации плазмотрона, превышения ПДК вредных веществ не происходит.

5.4 Электробезопасность

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества [34].

Анализ опасности электрических сетей практически сводится к определению значения тока, протекающего через тело человека в различных условиях, в которых может оказаться человек при эксплуатации электрических сетей.

При прохождении электрического тока через тело человека могут возникнуть повреждения организма. Действие тока на организм человека может быть местным и общим. Общее (рефлекторное) поражение — электрический удар, представляет для человека наибольшую опасность: нарушается работа центральной нервной и сердечно-сосудистой систем, что приводит к фибрилляции и параличу сердца, а также к остановке дыхания.

Характер и последствия поражения зависят от величины, частоты и пути прохождения тока; продолжительности воздействия.

Безопасной для человека является величина переменного тока – 10 мА, постоянного – 50 мА, безопасное напряжение 12 В.

Во избежание травматизма следует, соблюдать следующие правила:

- должна быть изучена инструкция по эксплуатации аппаратуры, а перед каждым включением производился осмотр рабочего места;
- обращать особое внимание на последовательность включений и выключения питания отдельных узлов;
- все узлы комплекса должны быть заземлены через контур заземления;
- контур заземления периодически проверяется на электрическое сопротивление.

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

Работы на лабораторном оборудовании, в процессе проведения экспериментальных исследований, выполнялись в строгом соответствии требованиям по электробезопасности, все операции выполнялись руководителем, имеющим допуск до работ с напряжениями свыше 1000 В.

5.5 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [35], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение лаборатории по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;

- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей.

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

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

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

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

- 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:

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

Заключение

На основе анализа методов конверсии ГФУ и ОГФУ и по результатам термодинамических расчетов процесса плазменной конверсии ОГФУ можно сделать вывод, что более предпочтительным является процесс плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме с инжекцией водорода, в ходе которого может быть получен диоксид урана в конденсированной фазе. Однако, несмотря на то, что может быть получен целевой продукт в виде диоксида урана в конденсированной фазе, с практически точки зрения процесс плазменной конверсии ОГФУ в воздушной плазме с инжекцией водорода не представляется возможным, так как этот процесс в условиях высоких плазменных температур и появления плавиковой кислоты в виде побочного продукта потребует использования конструкционных материалов, коррозионностойких к фтору и его соединениям.

В связи с этим в данной работе предложена возможность применения гидролиза ОГФУ водно-солевым раствором нитрата алюминия с получением раствора нитрата уранила и целевого продукта трифторида алюминия в виде осадка. По результатам термодинамических расчетов процесса плазменной обработки раствора нитрата уранила в виде водно-солеорганической композиции было проведено экспериментальное подтверждение этих расчетов на имеющемся плазменном стенде на базе ВЧФ-плазмотрона в оптимальном технологическом режиме на модельной ВСОК-2 на основе нитрата циркониила и ацетона в воздушно-плазменном потоке.

Получены опытные образцы диоксида циркония в виде порошка и проведены исследования их физико-химических свойств (структура, элементный и гранулометрический составы). На основе результатов исследования физико-химических свойств порошков диоксида циркония сделаны выводы, что они обладают гомогенной структурой, высокодисперсные и имеют в качестве примесей небольшое количество кальция и железа.

Список публикаций студента

1. Шаманин И.В., Каренгин А.Г., Новоселов И.Ю., Зубов В.В. Плазмохимический синтез оксидных композиций урана и тория из смесевых нитратных растворов // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 20 (184). – С. 36-41.
2. Зубов В.В., Новоселов И.Ю., Шаманин И. В., Каренгин А.Г. Плазменное получение смесевых оксидных композиций для уран-ториевого топлива // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции, Томск, 3-6 июня 2015. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015 – С. 167.
3. Кадочников С.С., Зубов В.В., Каренгин А.Г. Моделирование процесса синтеза оксидных композиций урана и тория из нитратных растворов в воздушной плазме // VI Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, Томск, 14-16 октября 2015, г. Томск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 43.
4. Зубов В.В., Кадочников С.С., Каренгин А.Г. Моделирование и исследование процесса получения в воздушной плазме оксидных композиций урана и тория из водно-солеорганических композиций // Изотопы: технологии, материалы и применение: Сборник тезисов докладов II Международной научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 19-23 октября 2015. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015 – С. 46.
5. Перминов С.В., Зубов В.В., Кадочников С.С., Каренгин А.Г. Плазмохимический синтез и исследование гомогенных оксидных композиций для ториевого ядерного топлива // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий: материалы конференции в рамках научной сессии НИЯУ МИФИ, Северск, 21-25 марта 2016. – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 43.
6. Зубов В.В., Тундешев Н.В. Моделирование и исследование процесса получения в воздушной плазме гомогенных оксидных композиций урана и

плутония для МОКС-топлива // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов III Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 19-23 сентября 2016. – Томск: Графика, 2016. – С. 43 (763910-2016)

7. Zubov V. V., Perminov S. V. Плазмохимический синтез и исследование гомогенных оксидных композиций для ториевого ядерного топлива // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов III Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 19-23 сентября 2016. – Томск: Графика, 2016. – С. 46.

8. Тундешев Н.В., Zubov B.V., Каренгин А.Г. Моделирование и исследование процесса получения в воздушной плазме гомогенных оксидных композиций урана и плутония для МОКС-топлива // VII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, 19-21 октября 2016. – г. Северск: Изд-во. СТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 117.

9. Zubov B.V., Тундешев Н.В., Каренгин А.Г. Плазмохимический синтез и исследование гомогенных оксидных композиций для ториевого ядерного топлива // VII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, 19-21 октября 2016. – г. Северск: Изд-во. СТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 118.

11. Zubov B.V., Тундешев Н.В., Кулиев Р.У. Моделирование и исследование процесса плазменной конверсии отвалного гексафторида урана // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25-28 апреля 2017. – г. Томск: Изд-во НИ ТПУ, 2017. – С. 464.

12. Zubov B.V., Тундешев Н.В., Кулиев Р.У. Плазменной конверсия «отвалного» гексафторида урана // VIII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, 17-19 мая 2017. – г. Томск: Изд-во ТУСУРа, 2017. – С. 116.

Список использованных источников

1. Попп М. Воздействие ядерной технологии на другие области техники // Атомная техника за рубежом, 1998. № 3. С. 13-17.
2. Туманов Ю.Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. – М.: Физматлит, 2003. – 759 с.
3. Пат. FR. 2162058 C01G43/025. Способ и установка для непосредственного превращения гексафторида урана в оксид урана/ Фэгер Андре.
4. Фторидные технологии в производстве ядерного топлива: монография / Г.Г. Андреев, А.Н. Дьяченко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 152 с.
5. Щербаков В.И., Серёгин М.Б., Евдокимов А.Н. и др., Экспериментальные исследования конверсии ОГФУ в ТФУ на установке «Минимодуль», отчёт ВНИИХТ, № ТИ-2498, 2002.
6. Щербаков В.И., Евдокимов А.Н., Вдовиченко В.Д., Громов О.Б. и др. Оптимизация технологического процесса конверсии ОГФУ в UF_4 и HF на установке «Минимодуль», отчёт ВНИИХТ, № ТИ-2548, 2002.
7. Г.Ф.Кнорре. Топочные процессы. – М.: ГЭИ, 1959.
8. Туманов Ю.Н., Галкин Н.П., Поройков Е.П. Механизм и термодинамика восстановительного гидролиза гексафторида урана. Первый Всесоюзный симпозиум по химии урана. – М.: АН СССР, 1974.
9. Аставин В.С., Туманов Ю.Н., Шевелев Ю.Д. Термодинамика химических и фазовых превращений в системе UF_6 -НОН // Плазмохимия-79. Третий Всесоюзный симпозиум по плазмохимии. – М.: Наука, 1979. – С. 156-159.
10. Аставин В.С., Туманов Ю.Н., Шевелев Ю.Д. Расчет равновесного состава паров гексафторида урана и воды // Тезисы докладов Четвертого Всесоюзный симпозиум по плазмохимии. – Днепропетровск: Изд-во ДХТИ, 1984. – том 1. – С. 126-127.

11. Toumanov I. N., Ivanov A.V., Galkin A.V. Production d'Oxydes en Poudre Finement Dispersee a Partir de Fluorures Volatils ou en Solutions // Commerce et Cooperations. Forum des Hautes Technologies Sovjetiques. – Paris, 1991. – April 12-19. – P. 58-60.
12. Toumanov I. N., Stepanov I.A., Ivanov A.V. Chemical and Phase Transformations in (U-F-H-O)-Plasma // Proceedings 10th Int. Symp. Plasma Chemistry. – Bochum, Germany, 1991. – Vol. 2. – August 4-9. – P. 1,5-10.
13. Туманов Ю.Н., Цирельников К.В. Свойство и применение уран-фторной плазмы: механизм и кинетика конверсии гексафторида урана в (U-F-O-H)-плазме. Физика и химия обработки материалов, 1992. – № 5. – С. 58-66.
14. Toumanov I. N., Hohlov V.A., Sigailo V.D., Kuzminykh S.A., Shamrin S.D. Plasma Arc Process for Producing Disperse Oxide Materials from Volatile Fluoride // Proceedings 12th Int. Symp. on Plasma Chemistry. – Minneapolis, Univ. Minnesota, 1995. – Vol. 3. – P. 1267-1272.
15. Toumanov I. N., Hohlov V.A., Sigailo V.D., Galkin A.V. Plasma Hydrolysis Technology for Conversion of Depleted Uranium Hexafluoride: Scientific Basis and Application // Proceedings 14th Int. Symp. on Plasma Chemistry. – Prague, Czech Republic, 1999. – Vol. 5. – August 2-6. – P. 2399-2406.
16. Туманов Ю.Н. Некоторые проблемы получения и закалки уран-фторной плазмы // Атомная энергия, 1975. – т. 39. – вып. 6. – С. 424-426.
17. Туманов Ю.Н., Галкин Н.П. Физико-химические превращения в плазме фторидов актиноидных элементов // Радиохимия, 1976. – т. 18. – № 5. – С. 714-721.
18. Пат. РФ 2203225 C01G43/025. Способ конверсии гексафторида урана / Мазин В.И.
19. Куликов И.С. Термодинамика карбидов и нитридов // Справ. изд. – Челябинск: Металлургия. Челябинское отделение, 1988. – 320 с.
20. Пат. РФ 2211185 C01G43/025. Способ для конверсии гексафторида урана в оксиды урана и устройство для его осуществления / Седельников О.Л., Потоскаев Г.Г., Курсков В.С. и др.

21. Пат. РФ 2311346 C01G43/06. Способ переработки гексафторида урана / Олышанский В.А., Кобзарь Ю.Ф., Лазарчук В.В., Ледовских А.К.
22. Пат. РФ 2594012 C01G43/06. Способ конверсии гексафторида урана до тетрафторида урана и безводного фторида водорода / Атаханова Е.Л., Орехов В.Т., Хорозова О.Д., Ширяева В.В.
23. Крапивина С.А. Плазмохимические технологические процессы. – Л.: Химия, 1981. – 248 с.
24. Пархоменко В.Д., Цыбулев П.Н., Краснокутский Ю.И. Технология плазмохимических производств. – Киев: Выща школа, 1991. – 256 с.
25. Бернадинер М. Н., Шурыгин А. П. Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов. – М.: Химия, 1999. – 448 с.
26. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. – М.: Химия, 1979. – 416 с.
27. Пархоменко В.Д., Сорока П.И., Краснокутский Ю.И. и др. Плазмохимическая технология. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1991. – 196 с.
28. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Криницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
29. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.
30. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
31. Конвенция Международной Организации Труда №170 о безопасности при использовании химических веществ на производстве.
32. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы.
33. СНиП 2.04.05. Отопление, вентиляция и кондиционирование.
34. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.
35. Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р 12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность.

Приложение А
(обязательное)

Раздел А
Nukleare Brennstoffkreislauf

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5A	Зубов Виктор Вячеславович		

Консультант кафедры ТФ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Новоселов И.Ю.			

Консультант – лингвист кафедры ИЯ ИСГТ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Александров О.А.	к. фил. н.		

Einführung

Als Kernbrennstoffkreislauf werden die Arbeitsschritte und Prozesse bezeichnet, die der Fertigung des Kernbrennstoffs und seiner Behandlung, bzw. Entsorgung nach dem Einsatz im Reaktor, dienen. Dementsprechend gibt es eine Versorgungs- und eine Entsorgungsseite des Brennstoffkreislaufs. Die Energieerzeugung im Reaktor selbst wird hier nicht als Teil des Zyklus betrachtet.

Es gibt zwei Grundtypen des Brennstoffkreislaufs – den offenen und den geschlossenen –, wobei der Unterschied in der Behandlung der abgebrannten Brennelemente besteht. Die wichtigsten Prozesse im Zyklus sind in Abbildung A.1 zusammengefasst. Im offenen Kernbrennstoffkreislauf wird der dem Reaktor entnommene Kernbrennstoff nach seiner Zwischenlagerung endgelagert. Im geschlossenen Kernbrennstoffkreislauf, der auch als «Brennstoffkreislauf mit Wiederaufarbeitung» bezeichnet wird, kann das nicht verwertete spaltbare Material zurückgewonnen und zur Herstellung von neuem Brennstoff verwendet werden [1].



Abbildung A.1 Der nukleare Brennstoffkreislauf

A.1 Vom Urangestein zum Urankonzentrat

Uran gewinnt man aus Uranerz in Bergwerken oder als Nebenprodukt beim Abbau anderer Stoffe.

Nach dem Abbau wird das uranhaltige Material vom übrigen Gestein getrennt, gebrochen und zermahlen. Danach wird das Uran auf chemischem Weg aus dem Restgestein herausgelöst und gereinigt. Das Produkt ist ein gelbes Pulver. Es besteht zu 90 Prozent aus einer Verbindung von Uran und Sauerstoff (Uranoxid) und wird wegen seines Aussehens «yellow cake» (gelber Kuchen) genannt (Abbildung A.2) [2].



Abbildung A.2 Das auch «yellow cake» genannte Urankonzentrat (U_3O_8)

A.2 Vom Urankonzentrat zum angereicherten Uran

Von den in der Natur vorkommenden Uransorten (sogenannten Isotopen) ist nur das Uran-235 leicht spaltbar. Doch Natururan und «yellow cake» bestehen hauptsächlich aus schwer spaltbarem Uran-238 und nur zu 0,7 Prozent aus Uran-235. Das ist zu wenig für das Aufrechterhalten einer Kettenreaktion in Leichtwasserreaktoren. Das Natururan muss daher «angereichert», d.h. der Anteil von Uran-235 erhöht werden: Einem Teil des Urans wird U-235 entzogen (es wird abgereichert) und dem andern zugefügt, bis er 4–5 Prozent Uran-235 enthält. Dieser Teil wird weiterverwendet [2].

Der Anreicherungsprozess ist technisch sehr aufwändig, denn die einzelnen Isotope müssen dazu voneinander getrennt werden. Uran-235 und Uran-238 unterscheiden sich zwar nicht chemisch, sind aber unterschiedlich schwer. Der Atomkern von Uran-238 enthält drei Teilchen (Neutronen) mehr und ist geringfügig schwerer als Uran-235. Diesen Unterschied macht man sich bei der heute üblichen Trennung in schnell rotierenden Zentrifugen zunutze. Weil diese Methode sehr energiesparend ist, hat sie mittlerweile andere Verfahren wie die Anreicherung durch Diffusion ersetzt.

Vor der Anreicherung muss der «yellow cake» jedoch in eine für die weitere Verarbeitung geeignete Form gebracht werden. Dieser Schritt heisst «Konversion». Das Uranoxid wird in Uranhexafluorid, eine weisse, salzähnliche Verbindung, umgewandelt. Dieses Material lässt sich in der Anreicherungsanlage leicht zu Gas verdampfen und wird nach dem Trennprozess wieder in einen Feststoff zurückverwandelt.

In Europa gibt es kommerzielle Anreicherungsanlagen in Deutschland, Frankreich, Grossbritannien und den Niederlanden – energieeffiziente Zentrifugensysteme (Abbildung A.3), welche die älteren Diffusionsanlagen ersetzt haben. In den USA wurde 2012 mit dem Bau einer Laseranreicherungsanlage begonnen, einer ganz neuen Technologie. Diese Anlagen stehen unter Kontrolle der Atomaufsichtsbehörde des jeweiligen Landes und der IAEO.



Abbildung A.3 Urananreicherung mit Zentrifugen (Urenco)

Nach dem Anreicherungsprozess bleibt in den Anreicherungsanlagen abgereichertes Uran übrig (in der Fachsprache auch Tails oder Depleted Uranium genannt). Es enthält nur noch wenig Uran-235 und wird eingelagert. Sollte der Uranpreis steigen, kann es sich lohnen, diesen Tails das restliche Uran-235 zu entziehen und für die Anreicherung zu nutzen. Möglich wäre auch, das abgereicherte Material – grösstenteils Uran-238 – in Zukunft als Brennstoff in sogenannten Schnellen Brütern einzusetzen. Abgereichertes Uran ist also kein Abfall, sondern potenzieller Kernbrennstoff. Die IAEO stellt umfangreiches Informationsmaterial zu diesem Thema zur Verfügung [2].

A.3 Abgereichertem Uranhexafluorid

Als Abfallprodukt fallen in Gronau große Mengen abgereichertes Uranhexafluorid als Uranmüll an. Dieses wird zunächst in einem Freilager unter offenem Himmel direkt an der Urananreicherungsanlage gelagert. In den letzten Jahren wurde eine sogenannte Dekonversion des UF_6 in Uranoxid (U_3O_8) angestrebt, nachdem der Export des Gronauer Uranmülls nach Russland, aufgrund starker Proteste russischer, deutscher und niederländischer Umweltschützerinnen und Umweltschützer, im Jahr 2009 eingestellt wurde [3].

Die «Dekonversion» findet derzeit im südfranzösischen Pierrelatte statt, URENCO baut jedoch eine eigene Dekonversionsanlage im britischen Capenhurst, die nach Angaben von URENCO und der Bundesregierung Ende des Jahres 2015 in Betrieb gehen soll.

Ausfuhren aus Deutschland von abgereichertem Uran in Form von UF_6 in den Jahren 2007 bis 2013 (Tabelle A.1).

Tabelle A.1 – Ausfuhren aus Deutschland von abgereichertem Uran in Form von UF₆ in den Jahren 2007 bis 2013

Jahr	Land	Anlage	Menge (kg U)	% Gehalt U-235 von bis	Exporteur
2007	Russland	Ural Electrochemical Plant, Novouralsk	3 132 014	0,30-0,34	1)
2008	Frankreich	Eurodif, Pierrelatte	234 675	0,23-0,26	1)
	Frankreich	AREVA NC, Pierrelatte	184 101	0,21-0,23	1)
	Russland	Ural Electrochemical Plant, Novouralsk	2 506 704	0,28-0,34	1)
	Russland	Ural Electrochemical Plant, Novouralsk			
2009	Frankreich	Eurodif, Pierrelatte	569 600	0,21-0,25	1)
	Frankreich	AREVA NC, Pierrelatte	1 167 948	0,25-0,26	1)
	Russland	Ural Electrochemical Plant, Novouralsk	1 570 912	0,30-0,34	1)
	Russland	Ural Electrochemical Plant, Novouralsk			
2010	Frankreich	Eurodif, Pierrelatte	469 060	0,21-0,22	1)
	Frankreich	AREVA NC, Pierrelatte	2 828 384	0,23-0,25	1)
	Frankreich	Eurodif, Pierrelatte	19	0,29-0,30	2)
	Frankreich	AREVA NC, Pierrelatte	16	0,24	2)
	USA	AREVA NP, Richland	1	0,22	2)
	USA	AREVA NP, Richland			
2011	Frankreich	Eurodif, Pierrelatte	200 543	0,23	1)
	Frankreich	AREVA NC, Pierrelatte	2 410 176	0,20-0,25	1)
	Frankreich	Eurodif, Pierrelatte	73	0,23-0,24	2)
	Frankreich	AREVA NC, Pierrelatte	9 103	0,25	2)
	Schweden	Westinghouse Electric Sweden AB, Västerås	4 532	0,20	1)
	Schweden	Westinghouse Electric Sweden AB, Västerås			
2012	Frankreich	Eurodif, Pierrelatte	903 163	0,18-0,25	1)
	Frankreich	AREVA NC, Pierrelatte	2 375 370	0,21-0,26	1)
	Frankreich	Eurodif, Pierrelatte	49	0,22-0,23	2)
	USA	AREVA NP, Richland	23	0,23-0,30	2)
2013	Frankreich	AREVA NC, Pierrelatte	634 854	0,20-0,25	1)
	Frankreich	AREVA NC, Pierrelatte	1	0,22	2)
	Frankreich	Eurodif, Pierrelatte	50	0,22-0,29	2)
	Großbritannien	URENCO UK, Capenhurst	112	0,21-0,64	1)
	USA	AREVA NP, Richland	25	0,23	2)

Exporteure:

- 1) URENCO Deutschland GmbH, Gronau,
- 2) ANF GmbH, Lingen.

Abgereichertes UF₆ wurde in die Länder Frankreich, Großbritannien, Schweden, USA und Russland geliefert.

In ihrer Antwort vom 8. März 2017 auf eine Kleine Anfrage der Piratenfraktion teilte die Landesregierung mit, dass der Betreiber der Urananreicherungsanlage Gronau, die Firma Urenco, weiterhin beabsichtige, noch im ersten Halbjahr 2017 – also

in wenigen Wochen – die Inbetriebnahme ihrer neuen Lagerhalle für 60 000 Tonnen angereichertes Uranoxid zu beantragen. Dieses Uranoxid erfährt nach Umwandlung aus dem angereichertem Uranhexafluorid – dem radioaktiven und chemotoxischen Abfallstoff aus der Urananreicherung – keinerlei Weiterverwertung und ist deshalb als Atommüll anzusehen [4].

Zudem dürfen 50 000 Tonnen Uranhexafluorid noch immer in Gronau unter freiem Himmel lagern. Hier hat sich an den Sicherheitsbestimmungen trotz ständiger Terrorwarnungen absolut nichts geändert. Auch das angereicherte Uranhexafluorid ist als Atommüll anzusehen, weil Urenco es nicht weiterverwendet, sondern nur die Lagermenge vor Ort ständig erhöht. Eine sichere Entsorgung ist weder in Gronau noch sonstwo in Sicht.

Der Lagerbestand an angereichertem Uranhexafluorid betrug am 31. März 2017 im Freilager 20.870,3 t [4].

A.4 Brennelementherstellung

In den meisten Reaktoren kommt das Uran in der Form von Urandioxid als Brennstoff zum Einsatz. Bei der Herstellung der Brennelemente wird UF_6 zu Urandioxid-Pulver (UO_2) umgewandelt, das dann bei hohen Temperaturen (von bis zu $1400\text{ }^\circ\text{C}$) zu würfelgroßen UO_2 -Tabletten (pellets) gesintert wird. Diese werden in Metallrohre gefüllt (Brennstäbe), die dann zu einem Bündel zusammengefasst ein Brennelement bilden. Das verwendete Metall ist hoch korrosionsresistent; es handelt sich generell um Edelstahl oder eine Zirkonium-legierung. Ein typischer SWR-Reaktor enthält über 730 Brennelemente mit rd. 46 000 Brennstäben [1].

Weniger als 10 % der weltweit in Betrieb befindlichen Reaktoren verfügen über eine Genehmigung zum Einsatz von Mischoxid-Brennstoff (MOX) – einer Mischung aus Urandioxid und Plutoniumdioxid. Das Plutoniumdioxid stammt größtenteils aus der kommerziellen Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen, obwohl Russland und die Vereinigten Staaten derzeit planen, auch Plutonium aus abgerüsteten nuklearen Gefechtsköpfen zu verwenden. Der MOX-Herstellungsprozess ähnelt dem

bereits für die Herstellung von Urandioxid-Brennstoff beschriebenen Verfahren; allerdings sind hier besondere Maßnahmen zum Schutz der Arbeitskräfte vor der höheren Radioaktivität dieses bestrahlten Materials und vor der Inhalation von Plutonium notwendig.

Obwohl es weltweit eine Vielzahl von Brennstoffherstellern gibt, hat sich kein echter kommerzieller Wettbewerb unter ihnen entwickelt, was weitgehend durch die sehr spezifischen Auflagen, die unterschiedlichen nationalen Genehmigungsverfahren und -erfordernisse und die Vielzahl der Reaktortypen bedingt ist. Außerdem verändern sich die in den einzelnen Ländern verfolgten Strategien zum Brennstoffmanagement je nach Marktbedingungen und Kernenergiepolitik [1].

A.5 Entsorgung radioaktiver Abfälle

Die Entsorgungsphase im Brennstoffkreislauf beginnt, wenn die bestrahlten oder «abgebrannten» Brennelemente dem Reaktor entnommen und für einen Anfangszeitraum von gewöhnlich fünf bis zehn Jahren im Kernkraftwerk oder auf dem Kraftwerksgelände gelagert werden. Bei dieser Zwischenlagerung werden die abgebrannten Brennelemente in wassergefüllte so genannte «Abklingbecken» untergebracht. Das Wasser dient sowohl der Strahlungsabschirmung als auch der Kühlung der Brennelemente. Nach dieser ersten Abkühlungsphase, in der die Brennelemente einen großen Teil ihrer Wärme abgeben, ist die Temperatur des Kernbrennstoffs sehr viel niedriger, so dass dieser dann für die langfristige Lagerung oder – sofern eine entsprechende Strategie verfolgt wird – für die Wiederaufarbeitung geeignet ist.

Die langfristige Lagerung von abgebrannten Brennelementen kann unter nassen oder trockenen Bedingungen erfolgen. Bei einer Nasslagerung werden die abgebrannten Brennelemente in ein anderes Wasserbecken überführt, das in seiner Beschaffenheit dem ersten zur Kühlung verwendeten Becken gleicht. Als Alternative, die heutzutage zunehmend eingesetzt wird, können die Brennelemente auch trocken in große, abschirmende Behälter verbracht werden, bei denen der Kernbrennstoff durch

natürliche Luftzirkulation gekühlt wird (Trockenlagerung). Diese Behälter können gegebenenfalls auf der Straße oder Schiene zu anderen Standorten transportiert werden. Abgebrannte Brennelemente können unter nassen oder trockenen Bedingungen mehr als 30 bis 50 Jahre gelagert werden, bevor entweder ein Verpacken oder Umpacken notwendig werden oder das Material in einem Endlager entsorgt wird.

A.6 Wiederaufarbeitung radioaktiver Abfälle

Die Wiederaufarbeitung ist ein Verfahren, bei dem das in abgebrannten Brennelementen noch weiterhin vorhandene spaltbare Material zum Zweck eines erneuten Einsatzes als Kernbrennstoff oder zur Konditionierung für die Endlagerung zurückgewonnen wird. Außerdem werden Volumen und langfristige Radiotoxizität des für die Endlagerung bestimmten Abfalls reduziert. Diese Form der Entsorgung von abgebrannten Brennelementen wird oder wurde von einigen europäischen Ländern (Belgien, Deutschland, Frankreich und Schweiz) sowie China, Indien, Japan und Russland verfolgt; die Mehrzahl der Länder, in denen Kernreaktoren betrieben werden, nutzen die Wiederaufarbeitung jedoch nicht.

Die Wiederaufarbeitung kann den Bedarf an Natururan um etwa 10-15 % reduzieren, indem sie Plutonium, das während des Spaltungsprozesses erzeugt wurde, aus den abgebrannten Brennelementen herausgelöst, in Form von MOX-Brennmaterial wiederverarbeitet und in Kernkraftwerken erneut zum Einsatz bringt. Die Trennung des Urans und des Plutoniums von anderen Isotopen wird kommerziell in einem chemischen Verfahren, dem so genannten PUREX-Verfahren (Plutonium-Uran-Extraktionsverfahren), durchgeführt. Die verbleibenden Spaltprodukte und Aktiniden sind hochradioaktive Abfälle. Ein weiteres Abfallprodukt sind die nicht löslichen metallischen Strukturteile der Brennelemente (Hüllrohre und Endkappen). Die derzeit betriebenen Wiederaufarbeitungsanlagen sind große, komplexe und kostspielige Einrichtungen, die aus diesem Grund auch nur in wenigen Ländern gebaut wurden (Tabelle A.2).

Tabelle A.2 – Kommerzielle Anlagen für die Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente weltweit

Land	Anlage/Standort	Jahr der Inbetriebnahme	Brennstoffart
China	Diwopu (Ganzu)	2002	LWR
Frankreich	La Hague	1976	LWR
Indien	Kalpakkam	1998	HWR
	Tarapur	1974	HWR
Japan	Rokkasho-mura	2006	LWR
	Tokai-mura	1977	LWR, ATR
Russische Föderation	Tscheljabinsk-65 Majak	1984	WWR
Vereinigtes Königreich	B205/Sellafield	1964	Magnox GCR
	Thorp/Sellafield	1994	LWR, AGR

Die Zahl der mit den derzeitigen Wiederaufarbeitungs- und Reaktortechnologien möglichen Rezyklierungszyklen wird einerseits durch die Zunahme an solchen Plutoniumisotopen begrenzt, die sich nicht durch thermische Neutronen in Leichtwasserreaktorenspalten lassen, und andererseits durch die Entstehung unerwünschter Elemente wie vor allem Curium. Nach zwei bis drei Zyklen müsste der rezyklierte Kernbrennstoff genauso entsorgt werden wie im offenen Brennstoffzyklus. Diese Einschränkung in Bezug auf die Anzahl der Recyclingzyklen gilt allerdings nicht, wenn das wiederaufgearbeitete Material in Brutreaktoreneingesetzt wird.

Das während der Wiederaufarbeitung zurückgewonnene Uran ist in der Vergangenheit wieder zu Kernbrennstoff verarbeitet worden, während es heute für eine künftige Wiederverwendung gelagert wird. Das erklärt sich aus der Tatsache, dass das zurückgewonnene Uran (weil es im Reaktor Neutronen ausgesetzt war) stärker radioaktiv ist als das natürliche Uran und seine Wiederaufarbeitung die Anreicherungsanlagen und Brennelement-fabriken kontaminieren und mithin deren Betrieb erschweren würde. Der Einsatz von zurückgewonnenem Uran erfordert speziell dafür vorgesehene Einrichtungen, die derzeit nicht wirtschaftlich sind.

Zusammenfassung

Kernenergie ist eine in technischer Hinsicht komplexe Energiequelle, die aus mehreren Gründen eine Sonderstellung einnimmt. Zum gegenwärtigen Stand und Wissen wurde in dieser Veröffentlichung gezeigt:

- Kernenergie ist eine weltweit wichtige Energiequelle, auf die 16% der Weltstromerzeugung entfallen;
- die große Mehrheit der Reaktoren arbeitet mit normalem Wasser als Kühlmittel und Moderator, verwendet Uran als Kernbrennstoff und ist durch einen offenen Brennstoffkreislauf (ohne Wiederaufarbeitung) gekennzeichnet;
- die Entsorgung von schwach- und mittelaktiven Abfällen hat inzwischen die notwendige technische Reife erlangt, aber die Entsorgung hochaktiver Abfälle ist noch nicht verwirklicht. Hauptgrund hierfür sind Bedenken der Öffentlichkeit; jedoch sind derzeit Fortschritte auf dem Weg zur Umsetzung von Lösungsansätzen zu verzeichnen.

In Anbetracht dieser Merkmale befindet sich die Kernenergie heute, zu Beginn des zweiten nuklearen Jahrhunderts, gewissermaßen an einem Scheideweg; sie wird einer gründlichen Überprüfung und Neubeurteilung durch Regierungen, Öffentlichkeit und Wirtschaft unterzogen. Die politischen Entscheidungsträger sehen sich mit der schwierigen Frage konfrontiert, wie der stetig steigende Weltenergiebedarf gedeckt werden kann und dabei zugleich die Umwelteffekte der Stromerzeugung so gering wie möglich gehalten werden können. Darüber hinaus müssen sie der öffentlichen Meinung Rechnung tragen und Kosten und Wettbewerbsfähigkeit der verschiedenen Energieträger sowie andere Zielen der staatlichen Politik, wie z.B. Versorgungssicherheit und Nichtverbreitung, berücksichtigen.

Verzeichnis der benutzten Quellen

1. NEA NUCLEAR ENERGY AGENCY [Elektronische Ressource]: Kernenergie heute: elektronische Zeitschrift. 2006. № 6214. URL: <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2006/6214-Kernenergie-heute.pdf>. Datum des Zugriffs: 20.05.2017 J.
2. Kernenergie [Elektronische Ressource]: elektronische Daten. URL: <https://www.kernenergie.ch/de/uran-und-radioaktivitaet/vom-uranerz-zum-kernbrennstoff-und-wiederaufarbeitung.html>. Datum des Zugriffs: 20.05.2017 J.
3. Deutscher Bundestag [Elektronische Ressource]: Transporte und Lagerung von Uranhexafluorid und Uranoxid im Zusammenhang mit der Urananreicherung in Gronau: elektronische Daten. URL: <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/18/017/1801726.pdf>. Datum des Zugriffs: 20.05.2017 J.
4. LANDTAG NRW [Elektronische Ressource]: Uranmülllagerung und neue Uranmüll-Lagerhalle an der Urananreicherungsanlage Gronau: elektronische Daten. URL: <https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMD16-15046.pdf>. Datum des Zugriffs: 20.05.2017 J.

Приложение Б (справочное)

Таблица Б1 – Расчет показателей горения жидких горючих ВСОК-1

$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, %	H_2O , %	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, %	Q^p_n , МДж/кг
18,99	71,01	10	0,903
18,78	70,22	11	1,190
18,57	69,43	12	1,478
18,35	68,65	13	1,765
18,14	67,86	14	2,053
17,93	67,07	15	2,340
17,72	66,28	16	2,628
17,51	65,49	17	2,915
17,30	64,70	18	3,203
17,09	63,91	19	3,490
16,88	63,12	20	3,778
16,67	62,33	21	4,065
16,46	61,54	22	4,353
16,24	60,76	23	4,641
16,03	59,97	24	4,928
15,82	59,18	25	5,216
15,61	58,39	26	5,503
15,40	57,60	27	5,791
15,19	56,81	28	6,078
14,98	56,02	29	6,366
14,77	55,23	30	6,653
14,56	54,44	31	6,941
14,35	53,65	32	7,228
14,14	52,86	33	7,516
13,92	52,08	34	7,803
13,71	51,29	35	8,091
13,50	50,50	36	8,378
13,29	49,71	37	8,666
13,08	48,92	38	8,953
12,87	48,13	39	9,241
12,66	47,34	40	9,528

Таблица Б2 – Расчет показателей горения жидких горючих ВСОК-2

$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, %	H_2O , %	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$, %	$Q_{\text{Pн}}$, МДж/кг
18,99	71,01	10	1,304
18,78	70,22	11	1,631
18,57	69,43	12	1,959
18,35	68,65	13	2,287
18,14	67,86	14	2,614
17,93	67,07	15	2,942
17,72	66,28	16	3,269
17,51	65,49	17	3,597
17,30	64,70	18	3,925
17,09	63,91	19	4,252
16,88	63,12	20	4,580
16,67	62,33	21	4,908
16,46	61,54	22	5,235
16,24	60,76	23	5,563
16,03	59,97	24	5,890
15,82	59,18	25	6,218
15,61	58,39	26	6,546
15,40	57,60	27	6,873
15,19	56,81	28	7,201
14,98	56,02	29	7,529
14,77	55,23	30	7,856
14,56	54,44	31	8,184
14,45	54,05	31,5	8,348
14,35	53,65	32	8,511
14,14	52,86	33	8,839
13,92	52,08	34	9,167
13,71	51,29	35	9,494

Приложение В (справочное)

Таблица В.1 – Измерение расхода воздуха через ВЧФ-плазмотрон без узла ввода ПГ (трубка 50/300 мм)

№ п/п	S _{имп}		Р _{ПГ} , мБар							Р _{ср}	К _г	Р _{ПГ}	Т _{ПГ}	ρ _{возд}	V _{ПГ}	Q _{ПГ} ±ΔQ _{ПГ}		
	Зхп	см ²	1	2	3	4	5	6	7	мБар		Па	°С	кг/м ³	м/с	м ³ /с	кг/с	м ³ /ч
1	3х10	1650	2,23	2,06	2,02	2,43	2,01	2,21	2,11	2,15	0,997	218,14	23,6	1,2	19,07	0,046±0,014	166±51	0,055±0,017
2	3х8	1320	2,54	2,61	2,56	2,65	2,61	2,62	2,71	2,61	0,997	264,89	23,6	1,2	21,01	0,051±0,005	183±17	0,061±0,006
3	3х6	990	2,78	2,85	2,99	3,03	3,12	2,88	2,97	2,95	0,997	298,47	23,7	1,2	22,30	0,054±0,009	194±34	0,065±0,011
4	3х4	660	3,99	4,00	4,02	4,11	3,99	4,15	4,08	4,05	0,997	410,22	23,7	1,2	26,15	0,063±0,004	228±16	0,076±0,005
5	3х2	330	6,76	6,63	6,28	6,26	6,74	6,73	6,65	6,58	0,997	666,57	23,8	1,2	33,33	0,081±0,012	290±42	0,097±0,014
1	3х10	1650	2,16	2,37	2,33	2,34	2,29	2,29	2,15	2,28	0,997	230,59	23,8	1,2	19,60	0,047±0,008	171±29	0,057±0,010
2	3х8	1320	2,46	2,58	2,56	2,74	2,47	2,58	2,62	2,57	0,997	260,69	23,8	1,2	20,84	0,050±0,008	182±29	0,061±0,010
3	3х6	990	3,03	2,99	3,03	3,21	3,02	3,01	3,02	3,04	0,997	308,46	23,8	1,2	22,67	0,055±0,009	198±21	0,066±0,007
4	3х4	660	3,79	4,15	3,68	3,74	4,15	3,98	4,06	3,94	0,997	398,79	23,8	1,2	25,78	0,062±0,014	225±50	0,075±0,017
5	3х2	330	6,10	6,56	6,10	6,33	6,67	6,26	6,55	6,37	0,997	645,15	23,8	1,2	32,79	0,079±0,013	286±45	0,095±0,015

Таблица В.2 – Измерение расхода воздуха через газоход с узлом ввода ПГ (трубка 50/300 мм)

№ п/п	S _{имп}		Р _{пг} , мБар							Р _{ср} мБар	К _г	Р _{пг}	Т _{пг}	ρ _{возд}	V _{пг}	Q _{гхд} ±ΔQ _{гхд}		
	Зхп	см²	1	2	3	4	5	6	7			Па	°C	кг/м³	м/с	м³/с	кг/с	м³/ч
1	3x10	1650	2,60	2,54	2,46	2,52	2,74	2,73	2,61	2,60	0,997	260,00	23,1	1,19	20,90	1,045±0,186	3762±669	1,24±0,22
2	3x8	1320	2,57	2,71	2,73	2,58	2,58	2,64	2,65	2,64	0,997	263,71	23,1	1,19	21,05	1,053±0,114	3790±409	1,25±0,14
3	3x6	990	2,58	2,6	2,47	2,56	2,34	2,50	2,39	2,49	0,997	249,14	23,2	1,19	20,46	1,023±0,178	3683±640	1,22±0,21
4	3x4	660	2,3	2,37	2,27	2,23	2,20	2,34	2,10	2,26	0,997	225,86	23,2	1,19	19,48	0,974±0,174	3507±626	1,16±0,21
5	3x2	330	1,62	1,8	1,86	1,77	1,78	1,75	1,62	1,74	0,997	174,29	23,3	1,19	17,11	0,858±0,196	3087±707	1,02±0,24
1	3x10	1650	2,47	2,62	2,67	2,65	2,80	2,74	2,60	2,65	0,997	265,00	23,3	1,19	21,10	1,055±0,185	3799±666	1,26±0,22
2	3x8	1320	2,71	2,66	2,62	2,51	2,53	2,64	2,56	2,60	0,997	260,43	23,4	1,19	20,92	1,046±0,129	3766±466	1,25±0,15
3	3x6	990	2,52	2,61	2,34	2,37	2,47	2,41	2,47	2,46	0,997	245,57	23,4	1,19	20,32	1,016±0,168	3657±605	1,21±0,20
4	3x4	660	2,25	2,34	2,30	2,26	2,42	2,28	2,26	2,30	0,997	230,14	23,5	1,19	19,67	0,983±0,114	3540±411	1,17±0,14
5	3x2	330	1,86	1,84	1,86	1,80	1,68	1,73	1,75	1,79	0,997	178,86	23,5	1,19	17,34	0,867±0,150	3121±540	1,03±0,18

Таблица В.3 – Измерение расхода воздуха через газоход без узла ввода ПГ (трубка 50/300 мм)

№ п/п	S _{имп}		Р _{пг} , мБар							Р _{ср} мБар	К _г	Р _{пг}	Т _{пг}	ρ _{возд}	V _{пг}	Q _{гхд} ±ΔQ _{гхд}		
	Зхп	см ²	1	2	3	4	5	6	7			Па	°C	кг/м ³	м/с	м ³ /с	кг/с	м ³ /ч
1	3x10	1650	2,44	2,52	2,56	2,28	2,50	2,75	2,52	2,51	0,997	251,00	23,1	1,19	20,54	1,027±0,253	3697±910	1,22±0,30
2	3x8	1320	2,35	2,37	2,56	2,64	2,62	2,32	2,47	2,48	0,997	247,57	23,1	1,19	20,40	1,020±0,241	3672±868	1,21±0,29
3	3x6	990	2,33	2,5	2,33	2,47	2,38	2,34	2,32	2,38	0,997	238,14	23,2	1,19	20,01	1,000±0,136	3601±491	1,19±0,16
4	3x4	660	2,14	2,15	2,35	2,19	2,26	2,30	2,10	2,21	0,997	221,29	23,2	1,19	19,28	0,964±0,177	3471±637	1,15±0,21
5	3x2	330	1,79	1,7	1,79	1,64	1,71	1,78	1,69	1,73	0,997	172,86	23,3	1,19	17,04	0,854±0,128	3074±460	1,02±0,15
1	3x10	1650	2,83	2,64	2,67	2,64	2,55	2,65	2,56	2,65	0,997	264,86	23,3	1,19	21,10	1,055±0,1617	3798±582	1,26±0,19
2	3x8	1320	2,53	2,50	2,69	2,61	2,62	2,55	2,53	2,58	0,997	257,57	23,4	1,19	20,81	1,040±0,1187	3745±427	1,24±0,14
3	3x6	990	2,37	2,35	2,25	2,46	2,50	2,34	2,47	2,39	0,997	239,14	23,4	1,19	20,05	1,002±0,1641	3609±591	1,19±0,20
4	3x4	660	2,25	2,28	2,11	2,25	2,24	2,19	2,34	2,24	0,997	223,71	23,5	1,19	19,39	0,970±0,1374	3490±500	1,15±0,16
5	3x2	330	1,86	1,83	1,88	1,82	1,84	1,77	1,96	1,85	0,997	185,14	23,5	1,19	17,64	0,882±0,1237	3175±445	1,05±0,15

Приложение Г (справочное)

Таблица Г.1 – Определение температуры воздушной плазменной струи и установочного КПД установки

№ опыта	Ia,	Ua,	P ₀ ,	T _{дг} ,	S _{шр} ,	Анод			Сетка			Электрод			КП			ВЧФП							
	A	кВт	кВт	°C	см²																				
	ma,	Δta,	Pa,	mc,	Δtc,	Pc,	mэл,	Δtэл	Pэл,	mкп,	Δtкп,	Pкп,	Pстр,	Qпг,	Hт,	Tстр,	Pp	ηпл	ηуст						
кг/с	°C	кВт	кг/с	°C	кВт	кг/с	°C	кВт	кг/с	°C	кВт	кг/с	°C	кВт	кВт	кг/с	кДж/кг	°C	кВт	%	%				
1	3,0	5,75	17,25	18,0	3x10	0,223	8,2	7,66	0,059	-0,4	-0,10	0,126	3,3	1,74	0,034	0,4	0,06	7,89	0,057	438,8	450	7,95	99,28	45,7	
2	3,0	5,75	17,25	21,4	3x8	0,223	8,3	7,75	0,059	-0,4	-0,10	0,126	3,4	1,80	0,034	0,5	0,07	7,73	0,061	426,9	425	7,80	99,08	44,8	
3	3,0	5,75	17,25	21,8	3x6	0,223	8,3	7,75	0,059	-0,2	-0,05	0,126	3,9	2,06	0,034	0,5	0,07	7,41	0,066	412,9	400	7,49	99,04	43,0	
1	3,0	5,70	17,1	22,6	3x10	0,223	8,3	7,75	0,059	0,4	0,10	0,126	3	1,59	0,034	0,5	0,07	7,59	0,057	433,6	450	7,66	99,06	44,4	
2	3,0	5,70	17,1	23,0	3x8	0,223	8,6	8,04	0,059	0,3	0,07	0,126	3,3	1,74	0,034	0,5	0,07	7,18	0,061	417,9	400	7,25	99,01	42,0	
3	3,0	5,70	17,1	21,6	3x6	0,223	8,2	7,66	0,059	0,5	0,12	0,126	3,3	1,74	0,034	0,5	0,07	7,50	0,066	414,2	400	7,57	99,05	44,0	
1	3,5	6,50	22,75	24,4	3x10	0,223	9,4	8,78	0,059	0,7	0,173	0,126	4,1	2,17	0,034	0,6	0,09	11,54	0,057	503,1	500	11,63	99,26	50,7	
2	3,5	6,40	22,4	25,2	3x8	0,223	9,4	8,78	0,059	0,8	0,20	0,126	4,1	2,17	0,034	0,6	0,09	11,17	0,061	483,3	475	11,26	99,23	49,9	
3	3,5	6,40	22,4	25,7	3x6	0,223	9,6	8,97	0,059	0,9	0,22	0,126	4,3	2,27	0,034	0,5	0,07	10,87	0,066	465,3	475	10,94	99,34	48,5	
4	3,5	6,40	22,4	26,8	3x4	0,223	9,5	8,88	0,059	1,0	0,25	0,126	4,3	2,27	0,034	0,7	0,10	10,91	0,076	443,9	450	11,01	99,08	48,7	
1	3,5	6,40	22,4	27,7	3x10	0,223	9,5	8,88	0,059	1,2	0,30	0,126	4,2	2,22	0,034	0,8	0,12	10,90	0,057	491,7	500	11,01	98,95	48,6	
2	3,5	6,40	22,4	27,5	3x8	0,223	9,5	8,88	0,059	1,1	0,27	0,126	4,2	2,22	0,034	0,8	0,12	10,92	0,061	479,3	475	11,04	98,96	48,8	
3	3,5	6,40	22,4	27,2	3x6	0,223	9,6	8,97	0,059	1,1	0,27	0,126	4,3	2,27	0,034	0,8	0,12	10,77	0,066	463,9	475	10,89	98,94	48,1	
4	3,5	6,40	22,4	26,8	3x4	0,223	9,5	8,88	0,059	1,0	0,25	0,126	4,3	2,27	0,034	0,5	0,07	10,93	0,076	444,3	450	11,01	99,35	48,8	

Продолжение таблицы Г1

№ опыта	Ia,	Ua,	P ₀ ,	T _{дг} ,	S _{шр} ,	Анод			Сетка			Электрод			КП			ВЧФП						
	A	кВт	кВт	°C	см²																			
						m _a ,	Δt _a ,	P _a ,	m _c ,	Δt _c ,	P _c ,	M _{эл} ,	Δt _{эл} ,	P _{эл} ,	m _{кп} ,	Δt _{кп} ,	P _{кп} ,	P _{стр} ,	Q _{пг} ,	H _т ,	T _{стр} ,	P _p	η _{пл}	η _{уст}
						кг/с	°C	кВт	кг/с	°C	кВт	кг/с	°C	кВт	кг/с	°C	кВт	кВт	кг/с	кДж/кг	°C	кВт	%	%
1	4,0	6,75	27,00	31,4	3x10	0,223	10,50	9,81	0,059	1,30	0,32	0,126	5,00	2,64	0,034	0,90	0,13	14,10	0,057	548,0	550	14,23	99,09	52,2
2	4,0	6,90	27,60	31,4	3x8	0,223	10,70	10,00	0,059	1,40	0,35	0,126	5,00	2,64	0,034	0,90	0,13	14,49	0,061	537,7	550	14,62	99,11	52,5
3	4,0	6,90	27,60	30,8	3x6	0,223	10,80	10,09	0,059	1,50	0,37	0,126	5,20	2,75	0,034	1,00	0,14	14,25	0,066	516,7	500	14,39	99,00	51,6
4	4,0	7,10	28,40	30,5	3x4	0,223	11,00	10,28	0,059	1,60	0,40	0,126	5,20	2,75	0,034	1,00	0,14	14,84	0,076	495,7	500	14,98	99,04	52,3
1	4,0	6,80	27,20	31,4	3x10	0,223	10,70	10,00	0,059	1,90	0,47	0,126	4,90	2,59	0,034	1,00	0,14	14,00	0,057	546,3	550	14,15	98,98	51,5
2	4,0	6,90	27,60	31,4	3x8	0,223	10,90	10,18	0,059	1,90	0,47	0,126	5,00	2,64	0,034	1,00	0,14	14,16	0,061	532,4	550	14,31	98,99	51,3
3	4,0	7,00	28,00	30,8	3x6	0,223	11,00	10,28	0,059	1,60	0,40	0,126	5,00	2,64	0,034	1,00	0,14	14,54	0,066	521,2	550	14,69	99,02	51,9
4	4,0	7,10	28,40	30,5	3x4	0,223	11,10	10,37	0,059	1,70	0,42	0,126	5,20	2,75	0,034	1,00	0,14	14,72	0,076	494,2	500	14,86	99,03	51,8
1	4,5	7,10	31,95	33,5	3x10	0,223	12,20	11,40	0,059	2,30	0,57	0,126	5,70	3,01	0,034	1,00	0,14	16,83	0,057	595,9	600	16,97	99,15	52,7
2	4,5	7,20	32,40	33,4	3x8	0,223	12,30	11,49	0,059	2,30	0,57	0,126	5,70	3,01	0,034	1,10	0,16	17,17	0,061	581,7	600	17,33	99,09	53,0
3	4,5	7,30	32,85	32,9	3x6	0,223	12,40	11,59	0,059	2,20	0,54	0,126	5,70	3,01	0,034	1,00	0,14	17,57	0,066	567,1	550	17,71	99,19	53,8
4	4,5	7,50	33,75	31,5	3x4	0,223	12,40	11,59	0,059	2,10	0,52	0,126	5,80	3,06	0,034	1,00	0,14	18,44	0,076	543,1	550	18,58	99,23	54,6
1	4,5	7,10	31,95	33,5	3x10	0,223	12,20	11,40	0,059	2,30	0,57	0,126	5,70	3,01	0,034	1,00	0,14	16,83	0,057	595,9	600	16,97	99,15	52,7
2	4,5	7,20	32,40	33,4	3x8	0,223	12,40	11,59	0,059	2,40	0,59	0,126	5,80	3,06	0,034	1,10	0,16	17,00	0,061	578,9	600	17,16	99,08	52,5
3	4,5	7,30	32,85	33,9	3x6	0,223	12,60	11,77	0,059	2,50	0,62	0,126	5,90	3,12	0,034	1,10	0,16	17,19	0,066	561,3	550	17,35	99,09	52,3
4	4,5	7,50	33,75	34,1	3x4	0,223	12,80	11,96	0,059	2,60	0,64	0,126	5,90	3,12	0,034	1,10	0,16	17,88	0,076	535,7	550	18,03	99,12	53,0

Приложение Д (обязательное)

Таблица Д1 – Матрица SWOT – анализа НИП

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Экономичность и энергоэффективность технологии. Установка, на которой проводится исследование не только потребляет энергию, но и выделяет её, которая может быть использована.	Сл1. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство промышленных установок под ключ.
С2. Экологичность технологии. При работе на установке все выделяемые вещества находятся, в пределах ПДК, не происходит загрязнения окружающей среды.	Сл2. Плазменная обработка твердофазного сырья протекает менее интенсивно, чем жидкого или газообразного. Необходим предварительный размол.
С3. Достигается одностадийность процесса и высокая скорость получения конечного продукта.	Сл3. При смене сырья или горючего агента необходимо пересчитывать оптимальные режимы работы технологического стенда.
С4. Не имеющая аналогов технология.	Сл4. Не полностью проработан вопрос по сепарации металлических порошков из узла «мокрой» очистки.
С5. Обеспечение химической чистоты получаемых порошков.	
С6. Наличие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца.	
Возможности	Угрозы
В1. Возможность полной автоматизации и автономности (кроме электропитания) работы технологического стенда.	У1. Недоверие к новой технологии производства обусловленное ее уникальностью.
В2. Заинтересованность в разработке со стороны предприятий атомной промышленности.	У2. Ограниченность средств на проведение НИОКР на предприятиях.
В3. Повышение налогов за производственные выбросы в окружающую среду и стоимости электроснабжения значительно повышают привлекательность данного проекта по отношению к применяемым технологиям.	У3. Отсутствие опыта промышленной эксплуатации разрабатываемой технологии.

Таблица Д2 – Итоговая матрица SWOT – анализа НИП

	Сильные стороны: С1. Экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Достигается одностадийность процесса и высокая скорость получения конечного продукта. С4. Не имеющая аналогов технология. С5. Обеспечение химической чистоты получаемых порошков. С6. Наличие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца.	Слабые стороны: Сл1. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство промышленных установок под ключ. Сл2. Плазменная обработка твердофазного сырья протекает менее интенсивно, чем жидкого или газообразного. Необходим предварительный размол. Сл3. При смене сырья или горючего агента необходимо пересчитывать оптимальные режимы работы технологического стенда. Сл4. Не полностью проработан вопрос по сепарации металлических порошков из узла «мокрой» очистки.
Возможности: В1. Возможность полной автоматизации и автономности (кроме электропитания) работы технологического стенда. В2. Заинтересованность в разработке со стороны предприятий атомной промышленности. В3. Повышение налогов за производственные выбросы в окружающую среду и стоимости электроснабжения значительно повышают привлекательность данного проекта по отношению к применяемым технологиям.	В1С1С3С6; В2С1С2С3С5С6; В3С1С2С3. Из данной комбинации видим, что вышеперечисленные сильные стороны благотворно влияют на возможность создания полной автоматизации и автономности работы установки по получению целевых продуктов из составов на основе ОГФУ и на заинтересованность со стороны предприятий атомной промышленности.	В1Сл3; В2Сл2Сл4; В3Сл2. Анализ показывает, что возможность заинтересованности со стороны предприятий положительно влияет на слабые стороны проекта, так как они могут улучшить разрабатываемую установку и повысить скорость переработки твердофазного сырья.
Угрозы: У1. Недоверие к новой технологии производства обусловленное ее уникальностью. У2. Ограниченность средств на проведение НИОКР на предприятиях. У3. Отсутствие опыта промышленной эксплуатации разрабатываемой технологии.	У1С2С4; У3С2С4С6. Анализ показывает, что сильные стороны проекта могут существенно понизить процент угроз исследования	У1Сл1; У2Сл1Сл4; У3Сл1. Анализ показывает, что слабые стороны проекта могут повысить срок внедрения результатов исследования на долгий период

Таблица ДЗ – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Категория	Этап	Содержание работ		Должность исполнителя
Разработка ТЗ на ВКР	1	Составление и утверждение технического задания		руководитель
Выбор направления исследования	2	Изучение проблемы и подбор литературы		инженер
	3	Изучение литературы и выбор методов решения проблемы		инженер
	4	Календарное планирование работ по теме		инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Моделирование технологического процесса на компьютере	ТД расчет процесса плазменной конверсии горючих оптимальных составов с применением программы «TERRA». Определение оптимальных режимов процесса конверсии ОГФУ. Оценка удельных энергозатрат на процесс плазменной конверсии ОГФУ.	инженер
	6		Расчет показателей горения составов на основе ВСОК. Выбор оптимальных горючих ВСОК.	
	7		ТД расчет процесса плазменной переработки горючих оптимальных составов с применением программы «TERRA». Определение оптимальных режимов процесса обработки ВСОК. Оценка удельных энергозатрат на процесс плазменной обработки ВСОК.	
	8	Планирование и проведение экспериментальных исследований	Исследования режимов работы плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона. Определение оптимальных режимов плазменного стенда.	руководитель, инженер
	9		Экспериментальные исследования процесса плазменной переработки ВСОК на основе уранила нитрата. Определение оптимальных составов ВСОК и режимов их переработки в воздушной плазме ВЧФ-разряда.	
	10	Анализ и обработка полученных результатов		инженер
	11	Оценка эффективности полученных результатов		руководитель, инженер
	12	Оформление пояснительной записки и графических работ		инженер
Обобщение и оценка результатов	13	Подготовка к защите темы		инженер

Таблица Д4 – Матрица ответственности

Этапы НТИ	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Социальная ответственность»	Консультант по иностранной части	Студент
Составление и утверждение технического задания	О				
Изучение проблемы и подбор литературы					И
Изучение литературы и выбор методов решения проблемы	С				И
Календарное планирование работ по теме	О				И
Моделирование технологического процесса на компьютере					И
Планирование и проведение экспериментальных исследований	С				И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			И
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на немецкий язык				С	И
Анализ и обработка полученных результатов					И
Оценка эффективности полученных результатов	С				И
Оформление пояснительной записки и графических работ	С				И
Подготовка к защите	О				И

Таблица Д5 – Календарный план-график проведения НИР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	Тк, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ						
				Апрель						
				10	11 – 12	13 – 17	18	19 – 22	23 – 26	27 – 30
1	Составление и утверждение технического задания	руководитель	1							
2	Изучение проблемы и подбор литературы	инженер	2							
3	Изучение литературы и выбор методов решения проблемы	инженер	5							
4	Календарное планирование работ по теме	инженер	1							
5	ТД расчет процесса плазменной конверсии горючих оптимальных составов с применением программы «TERRA». Определение оптимальных режимов процесса конверсии ОГФУ. Оценка удельных энергозатрат на процесс плазменной конверсии ОГФУ.	инженер	4							
6	Расчет показателей горения составов на основе ВСОК. Выбор оптимальных горючих ВСОК.	инженер	4							
7	ТД расчет процесса плазменной переработки горючих оптимальных составов с применением программы «TERRA». Определение оптимальных режимов процесса обработки ВСОК. Оценка удельных энергозатрат на процесс плазменной обработки ВСОК.	инженер	4							

Продолжение таблицы Д5

№ работ	Вид работ	Исполнители	Тк, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ					
				Май					Май – Июнь
				01 – 03	04 – 06	07 – 12	13 – 16	17 – 27	28.05 – 16.06
8	Исследования режимов работы плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона. Определение оптимальных режимов плазменного стенда.	руководитель, инженер	3						
9	Экспериментальные исследования процесса плазменной переработки ВСОК на основе уранила нитрата. Определение оптимальных составов ВСОК и режимов их переработки в воздушной плазме ВЧФ-разряда.	руководитель, инженер	3						
10	Анализ и обработка полученных результатов	инженер	6						
11	Оценка эффективности полученных результатов	руководитель, инженер	4						
12	Оформление пояснительной записки и графических работ	инженер	11						
13	Подготовка к защите темы	инженер	19						



– руководитель



– инженер



– совместная работа