

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

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы

Плазмохимический синтез и исследование оксидных композиций, имитирующих дисперсионное плутоний-ториевое ядерное топливо

УДК 621.039.543:66.011:533.9

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Иванов Кирилл Сергеевич		

Руководитель ВКР

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

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко С.Н.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Изотопные технологии и материалы	Дорофеева Л.И.	к.ф.-м.		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий.
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели.
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия.
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия.
УК(У)-6	Способен определить и реализовать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.
<i>Общепрофессиональные компетенции</i>	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач,
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК(У)-3	Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ
<i>Профессиональные компетенции</i>	
ПК(У)-1	Способен использовать фундаментальные законы в объеме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза новых идей, творческого самовыражения
ПК(У)-2	Способен создавать новые методы расчета современных физических установок и устройств, разрабатывать методы и перспективные технологии
ПК(У)-3	Способен создавать математические и физические модели, описывающие процессы и явления в разделительных каскадах, установках разделения и тонкой очистки веществ, переработки и обезвреживания промышленных отходов
ПК(У)-4	Способен оценить перспективы развития ядерной отрасли, использовать её современные достижения и передовые технологии в научно-исследовательских работах
ПК(У)-5	Способен самостоятельно выполнять экспериментальные и теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современных приборов для научных исследований и математических методов расчета

ПК(У)-6	Способен провести расчет, концептуальную и проектную разработку современных физических установок и приборов
ПК(У)-7	Способен формулировать технические задания, использовать информационные технологии и пакеты прикладных программ при проектировании и расчете физических установок, использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов
ПК(У)-8	Способен к объективному анализу технических и расчетно-теоретических разработок, решений и проектов, учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности, другим нормативным актам на российском и международном уровне, подготовить экспертное заключение
ПК(У)-9	Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования и дополнительного профессионального образования (ДПО)
ПК(У)-10	Способен разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов, управлять программами освоения новой продукции и технологии

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

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

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Дорофеева Л.И.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ91	Иванову Кириллу Сергеевичу

Тема работы:

Плазмохимический синтез и исследование оксидных композиций, имитирующих дисперсионное плутоний-ториевое ядерное топливо	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	22-70/с от 22.01.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:

	12.06.2021
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Исследовать влияние органического компонента на показатели горючести водно-органических растворов на основе нитратов плутония и тория. Определить режимы для плазмохимического синтеза порошков диоксида плутония и тория и исследовать их физико-химические свойства
---------------------------------	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	При разработке магистерской диссертации должны быть рассмотрены следующие вопросы: - Обзор и анализ физических методов получения наноразмерных порошков - Определение оптимальных составов водно-органических нитратных растворов - Термодинамическое моделирование равновесных составов продуктов плазмохимического синтеза - Подготовка экспериментального плазменного стенда - Подготовка модельных прекурсоров и проведение экспериментов с получением опытной партии порошка - Исследование и анализ свойств полученного порошка, синтезированного в плазме ВЧФ-разряда - Экономическое обоснование проведения НИР - Выводы по работе. Заключение
---	--

Перечень графического материала	- Презентация
--	---------------

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	Киселева Е.С.
Социальная ответственность	Тимченко С.Н.

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

1 Обзор литературы
2 Расчетная часть
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение
4 Социальная ответственность
5 Plasma-chemical synthesis and study of oxide compositions simulating dispersed plutonium-thorium nuclear fuel

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	22.01.21
---	----------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Каренгин А.Г.	к.ф.-м.н.		22.01.21

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Иванов К.С.		22.01.21

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM91	Иванову Кириллу Сергеевичу

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

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска; Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>-30% премии; 30% районный коэффициент.</i>
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2%.</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Анализ и оценка конкурентоспособности НИ; SWOT-анализ.</i>
<i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>1. Цели и результат проекта. 2. Организационная структура проекта. 3. Ограничения и допущения проекта.</i>
<i>3. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Формирование плана и графика разработки: - организация работ НИ; - определение структуры работ; - разработка графика Гантта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: - материальные затраты; - заработная плата; - отчисления во внебюджетные фонды.</i>
<i>4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>1. Определение интегрального финансового показателя разработки; 2. Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; 3. Определение интегрального показателя эффективности.</i>
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
<ol style="list-style-type: none"> 1. «Портрет» потребителя результатов НИ 2. Сегментирование рынка 3. Оценка конкурентоспособности технических решений 4. Матрица SWOT 5. Диаграмма Гантта 6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ 	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	22.01.21
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	к.э.н.		22.01.21

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Иванов Кирилл Сергеевич		22.01.21

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM91	Иванову Кириллу Сергеевичу

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

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места на предмет возникновения:</p>	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения); – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы);
<p>2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме</p>	<ul style="list-style-type: none"> – требования охраны труда при работе на ПЭВМ; – требования охраны труда при работе на ВЧФ-плазмотроне; – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность; – радиационная безопасность; – химическая безопасность.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p>	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (причины, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	22.01.2021
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко С.Н.	к.т.н.		22.01.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Иванов К.С.		22.01.2021

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла
 Период выполнения Весенний семестр 2020 /2021 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	12.06.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
22.01.21	<i>Выдача задания</i>	
10.02.21	<i>Выбор конструктивной схемы</i>	
08.03.21	<i>Расчет характеристик реактора, многогрупповой нейтронно-физический расчет</i>	
19.03.21	<i>Расчет длительности кампании ядерного топлива</i>	
09.04.21	<i>Оценка изменения состава ядерного топлива</i>	
15.05.21	<i>Введение метода интерполяции в многогрупповой расчет</i>	
12.06.21	<i>Сдача работы</i>	

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Каренгин А.Г.	к.ф.-м.н.		22.01.21

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Дорофеева Л.И.	к.ф.-м.н.		22.01.21

Реферат

Выпускная квалификационная работа 105 страницы, 8 рисунков, 27 таблиц, 21 источников, 24 формул, 2 приложения.

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

Объектом исследования является плазмохимический синтез оксидных композиций (ОК).

Цель работы – изучение процесса синтеза в воздушной плазме оксидных композиций для ядерного топлива плутоний-ториевого цикла.

В рамках изучения проводились расчет и оптимизация показателей горения ВОНР на основе нитратов солей и ацетона, и режимов их плазменной переработки в воздушной плазме.

В результате исследования определены оптимальные составы ВОНР на основе нитратов солей и ацетона и рекомендованы для практической реализации ресурсоэффективные режимы их плазменной переработки, которые подтверждены экспериментальным путем на модельных композициях.

Область применения: результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании ресурсоэффективной плазменной технологии для утилизации иловых отложений бассейнов-хранилищ жидких радиоактивных отходов и других отходов создаваемого российского замкнутого ядерного топливного цикла.

В будущем планируется продолжить исследования по созданию и совершенствованию плазменных установок для промышленной переработки ВОНР на основе нитратов солей и ацетона для создания оксидных композиций, входящих в состав ЯТ, используемого в плутоний-ториевом цикле.

Обозначения и сокращения

АЗ – активная зона;

АЭС – атомная электростанция;

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;

ВОНР – водно-органический нитратный раствор

ВЧФ – плазмотрон – высокочастотный факельный плазмотрон;

ВЧФ – разряд – высокочастотный факельный разряд;

ДЯТ–дисперсионное ядерное топливо;

ЗЯТЦ – закрытый ядерный топливный цикл;

НТИ – научно-техническое исследование;

ОК – оксидная композиция;

ОЯТ – отработавшее ядерное топливо;

ОЯТЦ – открытый ядерный топливный цикл;

ТВС – тепловыделяющая сборка;

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;

ЯТЦ – ядерный топливный цикл;

BWR – Boiling Water Reactor (корпусный водо-водяной ядерный реактор, в котором пар генерируется непосредственно в активной зоне и направляется в турбину)

MOX – Mixed-Oxide fuel (ядерное топливо, содержащее несколько видов оксидов делящихся материалов)

PWR – Pressurized water reactor (реактор с водой под давлением).

Оглавление

Реферат	9
Обозначения и сокращения.....	10
Оглавление	11
Введение.....	14
1 Обзор литературы	18
1.1 Области применения и свойства высокотемпературного ядерного топлива	18
1.1.1 Термодинамическая устойчивость	19
1.1.2 Влияние реакторного облучения на химический состав и термодинамические свойства топлива.....	20
1.1.3 Температура плавления	21
1.1.4 Теплопроводность.....	22
1.1.4 Распухание топлива	23
1.1.5 Механические свойства	25
1.1.6 Электрические свойства	26
1.1.7 Технология	27
1.2 Дисперсионное ядерное топливо.....	28
1.3 Опыт использования плутония и тория	29
1.4 PWR западного типа	32
1.5 ВВЭР-1000	35
1.6 Продолжительность кампании и выгорание МОХ-ТВС.....	37
1.7 Распределение энерговыделения в течение кампании.....	37
1.8 Коэффициенты реактивности и критическая концентрация бора	38
1.9 Эффективность управляющих стержней	39
1.10 Применение плутония в кипящих реакторах	40
1.11 Потребление плутония.....	41
1.12 Выводы	43
2 Экспериментально-расчетная часть	44
2.1 Описание экспериментальной установки на базе ВЧФ – плазмотрона	44

2.2	Определение расходов воздушного теплоносителя через плазмотрон.....	45
2.3	Определение расходов воздушного теплоносителя через реактор.....	46
2.4	Исследование режимов работы плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона	47
2.5	Плазмохимическая переработка модельных ВОНР	50
3	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	53
3.1	Потенциальные потребители результатов исследования	53
3.2	Анализ конкурентных технических решений	54
3.3	SWOT-анализ.....	55
3.4	Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	57
3.5	Методы коммерциализации результатов НТИ	59
3.6	Инициация проекта	60
3.7	Планирование научно-исследовательского проекта	62
3.8	Бюджет научного исследования	65
3.9	Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	68
4	Социальная ответственность	72
4.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	73
4.2	Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ВЧФ-плазмотроне и ПЭВМ	75
4.2.1	Организационные мероприятия.....	75
4.2.2	Технические мероприятия.....	75
4.2.3	Условия безопасности работы	77
4.3	Химическая безопасность	80
4.4	Электробезопасность	81
4.5	Пожарная и взрывная безопасность	84
	Заключение	87
	Список публикаций.....	88

Список использованных источников	90
Приложение А	93
Приложение Б	94
Б 5.1 Dispersive nuclear fuel	99
Б 5.2 Dispersive nuclear fuel	100
Б 5.3 Western type PWR.....	102
Б 5.4 VVER-1000	105

Введение

Атомные электростанции, принцип работы которых основан на применении металлокерамического ядерного топлива на основе диоксида урана, с обогащением по изотопу U^{235} , останутся одной из ключевых составляющих современной ядерной энергетики. Топливу, используемое ими, присущи такие отрицательные особенности эксплуатации, как:

- малый показатель теплопроводности, из-за которого накладываются ограничения на предельно допустимую удельную мощность реактора;
- хрупкость и склонность к растрескиванию;
- непродолжительное время эксплуатации (менее 5 лет);
- отсутствие возможности применения в установках сверхмалых и малой мощностей;
- дорогостоящий процесс утилизации отработавшего топлива;
- зависимость от доступности изотопа U^{235} .

В то же время, если прибегнуть к использованию в ядерном топливе изотопов U^{238} , Th^{232} и Pu^{239} , можно добиться снижения расходов на обогащение по изотопу U^{235} . Также большим преимуществом топлива с таким элементным составом будет являться увеличенное время эксплуатации, которое может достигать 15 лет. В дополнение к этим фактам применение металлокерамического ядерного топлива, в основе которого лежит Th, даёт возможность разработки ядерных установок для производства энергии в диапазоне мощности от 10 до 100 МВт, что расширит их ареал применения за счет возможности эксплуатации в районах трудной доступности, местах добычи разнообразных полезных ископаемых, а также местах с малым населением, где функционирование обычной ядерной установки было бы излишним. Еще одним преимуществом использования вышеназванных изотопов является то, что запасы природного Th превышают запасы природного U в 5 раз по самым оптимистичным оценкам. Тем не менее такому типу топлива будут присущи

недостатки топлива, уже применяемого на АЭС, среди которых основным является малый коэффициент теплопроводности.

Дисперсионное ядерное топливо, разработка которого является многообещающим вектором развития атомной энергетики позволяет нивелировать данный недостаток включением в состав ядерного топлива элемента, который обладает высоким коэффициентом теплопроводности и малым сечением захвата нейтронов, играющего роль матрицы. В ней содержатся вкрапления делящегося материала (изотопы U, Pu и Th) микросферической формы.

Однако применение матрицы из порошков металлов (алюминия, молибдена, вольфрама, нержавеющей стали и др.) увеличивает коэффициент теплопроводности, но приводит к ухудшению нейтронного баланса из-за высокого резонансного поглощения нейтронов. К тому же применение внешнего гелеобразования (золь-гель процесса) для получения микросфер из смесевых водных нитратных растворов сопряжено со следующими недостатками: многостадийность; продолжительность; низкая производительность; необходимость использования химических реагентов; дополнительное водородное восстановление; высокая себестоимость. Кроме того, отдельное получение и механическое смешение микросфер и матрицы не обеспечивают однородное распределение фаз в таком ЯТ.

К несомненным преимуществам применения плазмы для плазмохимического синтеза оксидных композиций из диспергированных смесевых водных нитратных растворов по сравнению с золь-гель процессом и технологией, основанной на отдельном получении и механическом смешении оксидов металлов, следует отнести: одностадийность; высокую скорость; возможность активно влиять на размер и морфологию частиц; компактность технологического оборудования. Однако плазменная обработка только смесевых водных нитратных растворов требует значительных энергозатрат (до 4 МВт·ч/т)

и не позволяет получать в одну стадию оксидные композиции требуемого стехиометрического состава без дополнительного водородного восстановления.

Впервые предлагается прямой плазмохимический синтез в воздушно-плазменном потоке сложных оксидных композиций (включающих оксиды делящихся материалов и матрицу из тугоплавких оксидов металлов, имеющих высокий коэффициент теплопроводности и низкое резонансное поглощение нейтронов) из диспергированных горючих водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны и др.) и имеющих низшую теплотворную способность не менее 8,4 МДж/кг и адиабатическую температуру горения не менее 1200 °С. Плазменная обработка таких растворов ВОНР приведет к существенному снижению удельных энергозатрат на их переработку (до 0,1 МВт·ч/т), позволит значительно увеличить производительность плазменных установок, а также обеспечит условия в плазмохимическом реакторе установки для прямого синтеза в воздушной плазме наноразмерных сложных оксидных композиций, имеющих гомогенное распределение фаз, высокую теплопроводность, а также требуемый стехиометрический состав без дополнительного водородного восстановления. Впервые предлагается применить после плазмохимического реактора охлаждение (закалку) в центробежно-барботажных аппаратах продуктов плазмохимического синтеза для управления физико-химическими свойствами получаемых порошков сложных оксидных композиций (размер и морфология частиц, удельная поверхность, гранулометрический и фазовый состав).

В настоящей выпускной квалификационной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований синтеза оксидных композиций.

Целью данной работы является исследование возможности и эффективности совместной плазменной утилизации радиоактивных иловых отложений в воздушной плазме высокочастотного факельного разряда.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

1. Определение и анализ способов получения оксидных композиций для ДЯТ;

2. Определение составов ВОНР, включающих плутоний, торий и металлы матрицы;

3. Термодинамический расчет процесса получения в плазме композиций пригодных для применения в плутоний-ториевом цикле и определение режимов, обеспечивающих плазмохимический синтез в воздушной плазме композиций требуемого состава;

4. Подготовка плазменного стенда для проведения экспериментальных исследований, получение опытных партий образцов;

5. Исследование основных физико-химических свойств полученных порошков.

1 Обзор литературы

1.1 Области применения и свойства высокотемпературного ядерного топлива

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

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

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

Во многих случаях высокотемпературное топливо используется в форме частиц, распределенных в металлической или иной матрице. Получаемые таким образом дисперсионные материалы обладают рядом дополнительных преимуществ [1-65].

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

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

1.1.1 Термодинамическая устойчивость

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

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

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

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

1.1.2 Влияние реакторного облучения на химический состав и термодинамические свойства топлива

Интенсивное облучение топлива во время работы реактора нейтронами, α и β -частицами, а также γ -квантами вызывает изменение всех его характеристик, в том числе химического состава топлива, т.к. в нем образуются новые химические элементы и перераспределяются металлоидные атомы исходного соединения с образованием новых соединений. Эти процессы являются следствием протекания в облучаемом топливе следующих процессов и реакций:

1) деления изотопов U^{235} , U^{233} и Pu после захвата нейтронов с образованием осколков и затем продуктов деления (в основном с массовыми числами от 80 до ПО и от 125 до 155);

2) деления нестабильных продуктов деления с образованием новых элементов (эти реакции приводят к изменению состава и в отсутствие реакторного облучения);

3) ядерных реакций U^{238} и Th с образованием изотопов Pu и U, которые в свою очередь делятся с образованием продуктов деления;

4) ядерных реакций некоторых изотопов металлоидов, входящих в исходные соединения, с компонентами реакторного излучения с образованием новых химических элементов.

Количество образовавшихся в топливе новых химических элементов определяется интенсивностью облучения (например, интегральным потоком нейтронов) и сечением деления изотопа в данной ядерной реакции. Скорость превращения нестабильных изотопов определяется временем их полураспада.

В результате указанных ядерных реакций в топливе образуется большое число новых химических элементов. Эти элементы значительно и, как правило, в худшую сторону изменяют химические и термодинамические свойства исходного топлива. Вступая во взаимодействие с компонентами исходного топлива и друг с другом, эти продукты облучения образуют значительное число новых химических соединений, которые могут присутствовать в топливе в виде

самостоятельных фаз, входить в состав твердых растворов, испаряться из зон с повышенной температурой и т. д.

Большое количество, сложная взаимосвязь и различная скорость, зависящая также от спектра излучения реактора, протекания реакций образования новых химических элементов при облучении топлива затрудняют точное определение химического состава облученного топлива. Такие расчеты делаются с применением ЭВМ для конкретных условий работы топлива.

Количество продуктов деления определяется степенью выгорания ядерного топлива и может изменяться от долей процента для специальных реакторов (исследовательских, импульсных, ракетных) до 10—15 ат. % для энергетических реакторов, в которых достижение максимально возможного использования ядерного топлива является важнейшей задачей. Еще большая степень выгорания (до 30-40 % и более) может быть достигнута при использовании топлива дисперсионного типа и топлива на основе микротвэлов.

При анализе химического состава топлива после выгорания необходимо учитывать химические реакции взаимодействия элементов, входящих в состав исходного топлива (включая примеси), продуктов деления, а также элементов, входящих в состав оболочки, контактных слоев и других компонентов твэла.

Интенсивность взаимодействия топлива с оболочкой твэлов возрастает при наличии загрязнений. Загрязнение адсорбированными на поверхности примесями влаги особенно существенно для топлива с развитой поверхностью, например виброуплотненного. Отмечались случаи разрушения циркониевых оболочек твэлов вследствие загрязнения таблеток окисного топлива влагой, углеводородами и галогенами. Влага и углеводороды служат источниками водорода, который взаимодействует с цирконием оболочек. Галогены, особенно фториды, усиливают коррозию оболочки под напряжением.

1.1.3 Температура плавления

Наибольшие температуры плавления имеют соединения урана и тория. Температура плавления соединений плутония ниже. В зависимости от

металлоида, входящего в состав соединения, температура плавления понижается в такой последовательности:

- окислы;
- нитриды;
- фосфиды;
- карбиды;
- сульфиды;
- бориды;
- силициды.

Понижение температуры плавления материала, как правило, наблюдается при выгорании делящихся атомов и накоплении продуктов деления в процессе работы твэла в реакторе. Особенно важны эти явления при значительном выгорании, например в реакторах на быстрых нейтронах. Вместе с тем установлено, что при повышенном давлении металлоида температура плавления ряда соединений повышается, что объясняется стабилизацией химического состава и достижением условий, соответствующих равновесным.

1.1.4 Теплопроводность

Процессы теплопередачи в топливных материалах имеют важное значение, поскольку они определяют при заданной плотности делений температурные характеристики сердечника и твэла в целом [2-38].

Передаваемая тепловая энергия имеет следующие компоненты:

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

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

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

4. Теплопроводность газа. Теплопроводность газов значительно ниже теплопроводности твердых тел, поэтому относительный вклад этого механизма в теплоперенос в компактных материалах обычно очень мал. В тех случаях, когда материал с низкой теплопроводностью имеет значительную пористость и поры заполнены газом с высокой теплопроводностью (водород, гелий) с повышенным давлением, этот механизм может иметь существенное значение. Для некоторых порошкообразных материалов с низкой теплопроводностью при наличии только точечных контактов между частицами теплопроводность газа может иметь преобладающее значение. Теплопроводность газа имеет также определяющее значение, если газовые прослойки имеют большую площадь и расположены перпендикулярно к направлению теплового потока (зазоры между сердечником и оболочкой, трещины в топливе). Теплопередача в подобных условиях должна определяться с учетом контактной теплопроводности и теплопроводности газа.

1.1.4 Распухание топлива

Облучение топливных материалов вызывает появление в кристаллической решетке атомов новых элементов, вакансий, дислокационных петель, пиков смещения и т. д. Накопление этих нарушений приводит к изменению геометрии и объема топлива[3-78Б]. Для сердечников твэлов из высокотемпературного топлива изменение геометрии определяется процессами, связанными с изменением объема; явление радиационного роста (изменение

геометрии без существенного изменения объема) практического значения не имеет.

В зависимости от условий, в которых находится топливо, изменение объема при выгорании может приводить к изменению геометрии: равномерному увеличению размеров при свободном распухании, не сдерживаемому оболочкой, уменьшению размера внутренних полостей в сердечниках втулочного типа при наличии прочной оболочки и т. д.

Такие процессы обусловлены наличием изменений в топливе, среди которых:

- увеличение количества атомов продуктов деления, с большим объемом, в сравнении с объемом атомов элементов, в начале деления;

- уменьшение количества атомов, находящихся в узлах кристаллической решетки, которое приводит к росту одиночных зерен и появлению на этих местах атомов продуктов деления;

- слияние вакансий в процессе миграции, ведущее к возникновению пор;

- рост объема пор, возникающий накоплением в них продуктов деления в газовой фазе;

- объединение в процессе миграции двух или более пор, с последующим увеличением их суммарного объёма.

Отсутствие единой расчетно-теоретической модели, которая могла бы описывать все вышеназванные процессы одновременно обусловлено их высоким числом и сложностью. Были разработаны модели распухания квазистатических газовых пор и вакансионная модель.

Модель квазистатических газовых пор описывает распухание топлива увеличением размеров пор под действием накапливающихся в порах газовых продуктов деления. Разработанные теории в ряде случаев достаточно хорошо описывают развитую стадию распухания при условии малой подвижности пор (малый температурный градиент). Для расчетного определения распухания по этому механизму необходима информация лишь о характеристиках ползучести,

топливного материала, которая может быть получена экспериментально. В моделях газовых пор учитывается диффузионный выход газовых осколков через открытую пористость и накопление их в закрытых порах. Этот подход дает удовлетворительные практические результаты расчетного распухания при средних рабочих температурах, высоком выгорании и незначительном температурном градиенте, что делает его применимым для дисперсионных материалов и в некоторых случаях для топлива карбидного типа.

Другая группа исследователей описывает закономерности распухания, основываясь на вакансионном механизме роста газовых пузырей. В этом случае давление газообразных продуктов в пузыре считается полностью уравновешенным силами поверхностного натяжения. Данная модель дает возможность принимать во внимание то, в каких начальных условиях пузыри начинали образование, процесс миграции пузырей в условиях при высоком значении колебания температуры среды расположения пузырей и то, как пузыри сталкиваются с дислокациями и границами зерен [4-240].

Выбранный метод позволил дать пояснения по поводу нескольких фактов, возникших в ходе проведения эксперимента, тем не менее для получения выводов, которые были бы применимы в условиях практического применения, следует получить информацию о нескольких физических параметрах материала топливных элементов, с трудностью поддающихся определению по ряду трудноопределимых физических параметров и решение ряда трудностей математической стороны модели.

1.1.5 Механические свойства

Из механических свойств для оценки топливных материалов наибольшее значение имеет скорость ползучести, которая может определять деформацию топлива и оболочки [5-163].

Для керамических материалов, как и для металлов, имеются три стадии пластической деформации: на первой стадии скорость деформации уменьшается (при неизменных напряжении и температуре); на второй, наиболее

продолжительной, скорость деформации остается постоянной; на третьей (перед началом разрушения) она увеличивается. Для изучения характеристик материалов, в том числе поведения топлива под облучением, наиболее важна вторая стадия — стадия установившейся ползучести.

Под действием облучения скорость ползучести существенно повышается, что связано с увеличением коэффициента диффузии в результате появления в материале сильно перегретых областей, в зонах воздействия осколков деления.

Механизм ползучести высокотемпературного топлива под облучением в настоящее время изучен недостаточно, и необходимы дополнительные исследования влияния степени выгорания, структуры и продуктов деления. Следует также отметить, что деформация топлива обычно протекает в условиях, существенно отличающихся от линейных схем нагружения, реализуемых при сжатии, изгибе или растяжении, и главные составляющие напряжений в топливе могут вызываться давлением пузырьков газообразных продуктов деления.

1.1.6 Электрические свойства

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

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

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

1.1.7 Технология

Технология топлива является составной частью топливного цикла, который должен быть замкнутым, т. е. предусматривать переработку ТВЭЛОВ после их работы в реакторе с целью извлечения и повторного использования всех ценных компонентов (изотопов урана, плутония и других трансурановых элементов, ценных конструкционных материалов, подобных цирконию и т. д.).

Основными направлениями, по которым оценивается та или иная конкретная технология, являются: экономичность (особенно для производства больших масштабов), возможность получения продукции необходимого качества (включая состав, чистоту и геометрию изделий), наличие аналогичного производственного опыта и оборудования, трудности, связанные с применением материалов с повышенной радиотоксичностью (обогащение изотопами урана, плутонием), возможность применения для высокоактивного облученного материала (рефабрикация).

Использование PuO_2 в качестве исходного сырья имеет следующие преимущества: эта окись является промежуточным продуктом большинства технологических схем, и многие циклы переработки разработаны для получения в качестве конечного продукта именно двуокиси, поскольку это наиболее широко используемое высокотемпературное ядерное топливо. Учитывая ряд важных положительных характеристик окисного топлива, можно предположить, что это положение сохранится и в будущем. Технология получения карбидов и нитридов плутония из соответствующих двуокисей хорошо освоена и

обеспечивает получение продуктов необходимого качества; технология получения сульфидов и фосфидов из двуокисей пока не разработана.

Использование в качестве исходного сырья металлических урана и плутония обычно приводит к увеличению технологического цикла, поэтому целесообразность использования этого сырья связывается с разработкой новых и более экономичных способов получения металлических урана и плутония или необходимостью обеспечения высоких требований к чистоте продукции.

1.2 Дисперсионное ядерное топливо

Атомные электростанции, принцип работы которых основан на применении металлокерамического ядерного топлива на основе диоксида урана, с обогащением по изотопу U^{235} , останутся одной из ключевых составляющих современной ядерной энергетики. Топливу, используемое ими, присущи такие отрицательные особенности эксплуатации, как:

- малый показатель теплопроводности, из-за которого накладываются ограничения на предельно допустимую удельную мощность реактора;
- хрупкость и склонность к растрескиванию;
- непродолжительное время эксплуатации (менее 5 лет);
- отсутствие возможности применения в установках сверхмалых и малой мощностей;
- дорогостоящий процесс утилизации отработавшего топлива;
- зависимость от доступности изотопа U^{235} [6].

В то же время, если прибегнуть к использованию в ядерном топливе изотопов U^{238} , Th^{232} и Pu^{239} , можно добиться снижения расходов на обогащение по изотопу U^{235} . Также большим преимуществом топлива с таким элементным составом будет являться увеличенное время эксплуатации, которое может достигать 15 лет. В дополнение к этим фактам применение металлокерамического ядерного топлива, в основе которого лежит Th, даёт возможность разработки ядерных установок для производства энергии в

диапазоне мощности от 10 до 100 МВт, что расширит их ареал применения за счет возможности эксплуатации в районах трудной доступности, местах добычи разнообразных полезных ископаемых, а также местах с малым населением, где функционирование обычной ядерной установки было бы излишним. Еще одним преимуществом использования вышеназванных изотопов является то, что запасы природного Th превышают запасы природного U в 5 раз по самым оптимистичным оценкам. Тем не менее такому типу топлива будут присущи недостатки топлива, уже применяемого на АЭС, среди которых основным является малый коэффициент теплопроводности.

Дисперсионное ядерное топливо, разработка которого является многообещающим вектором развития атомной энергетики позволяет нивелировать данный недостаток включением в состав ядерного топлива элемента, который обладает высоким коэффициентом теплопроводности и малым сечением захвата нейтронов, играющего роль матрицы. В ней содержатся вкрапления делящегося материала (изотопы U, Pu и Th) микросферической формы.

1.3 Опыт использования плутония и тория

При сокращении ядерного вооружения большой объем оружейного плутония может быть направлен в сторону производства. По приблизительным расчетам эта цифра может составлять около 220 тонн [7-10]. Для того, чтобы не допустить распространения материалов, подверженных делению, этот объем оружейного плутония преобразуется в энергетический. При использовании смешанного оксидного топлива, также известного, как МОХ топливо, от 100 тонн плутония может быть достигнуто энерговыделение порядка 1 ПВт (в случае выгорания на уровне 45 МВт·сут/кг).

Имеющиеся на данный момент технологии конструирования, производства и эксплуатации топлива, позволят в кратчайшие сроки

использовать плутоний, экстрагированный из боеголовок в реакторах на лёгкой воде, повсеместно использующиеся по России [11].

Рассмотрим аналогичные действия в Германии. Для эксперимента было применено порядка 400 МОХ-ТВС, которые эксплуатировались на 8 реакторах типа ВВЭР, и 300 МОХ-ТВС, применяемых в 6 кипящих реакторах с тяжелой водой под давлением. Спектр испытанных в водо-водяных реакторах оказался достаточно широк и включал в себя кроме MAGNOX-плутония с содержанием плутония-239 менее 76 %, плутоний, полученный в результате переработки ОЯТ реакторов на легкой воде со следующим процентным содержанием:

$\text{Pu}^{238} - 2 \%$

$\text{Pu}^{239} - 58 \%$

$\text{Pu}^{240} - 25 \%$

$\text{Pu}^{241} - 9 \%$

$\text{Pu}^{242} - 6 \%$

В 1977 было решено провести первые испытания МОХ-топлива. Первой подверглась испытаниям композиция МОХ-топлива с максимально малым количеством изотопа, подвергающегося делению. Плутониевый состав этой композиции от состава всей композиции в целом был равен $44 \% \text{Pu}^{239} + 14 \% \text{Pu}^{241}$.

В результате проведенных экспериментов были получены данные касательно времени проведения кампании, энерговыделения, коэффициенты реактивности и том, как влияют управляющие стержни, спроектированные для активных зон реактора с меняющимся количеством тепловыделяющих сборок из МОХ-топлива в различных зонах. Иными словами, была получена информация по профилированию МОХ-топлива в активной зоне реактора [12]. Информация по тепловыделяющим элементам, состоящим из облученного выгоревшего МОХ-топлива, находящемся в интервале от 6 до 47 МВт·сут/кг, получена при помощи осмотра соответствующих бассейнов выдержки тепловыделяющих сборок и инспекции отдельных элементов [13]. Наиболее важные параметры

равновесного цикла выгорания, содержащего в себе МОХ-топливо доказывают то, что реактор действующий по такой схеме – безопасен. Если же рассматривать реальные циклы применимые к реакторам на лёгкой воде, то можно прийти к выводу, что все существующие для расчётов программы - адекватны.

Общеизвестно, что плутоний, обогащённый для использования в ядерном оружии, содержит 95 % и более Pu^{239} , деление которого происходит с использованием тепловых нейтронов, энергия которых приближается к той энергии, что наблюдается при тепловом движении молекул газа при нормальной температуре. Этого эффекта добиваются путём уменьшения периодов облучения в промышленных реакторах, имеющих специально разработанную конструкцию. Максимальная выгода от применения плутония в энергетической сфере достигается при как можно большем значении выгорания. Из этого следует то, что после процесса переработки плутониевая композиция насчитывает большее количество изотопов, процесс деления которых не может быть инициирован тепловыми нейтронами. Типовой состав рассматриваемых соединений приведен в таблице 1.

Количество изотопов может различаться на один или два процента из-за того, что периоды и схемы облучения отличаются друг от друга. Также оно сопряжено с временем, прошедшим от цикла прошлого облучения и процесса переработки, что объясняется распадом Pu^{241} , период полураспада которого равен 14,9 лет. Так как энергетический плутоний содержит больше Pu^{240} в сравнении с плутонием, обогащенным до оружейного, то производство Pu^{241} , подвергающегося делению, снижается. Это объясняется меньшим поглощением в области резонанса Pu^{240} .

Таблица 1 – Типовые изотопные композиции плутония

Материал	Pu^{238}	Pu^{239}	Pu^{240}	Pu^{241}	Pu^{242}
Оружейный Pu	0	94	5	1	0
Энергетический					
MAGNOX	0,3	76,1	18,4	4,4	0,8

PWR стандартный	1,8	59,0	23	12,2	4,0
PWR с низким выгоранием	1,5	60,1	24,5	8,8	5,0
PWR с высоким выгоранием	2,6	51,5	27,6	10,5	7,8
переработанное MOX-топливо (второе поколение)	1,4	43,5	34,3	14,3	6,5

Сопоставление выгорания для тепловыделяющих сборок, в состав которых входил как уран, так и плутоний для системы 16x16 в PWR реакторе «Сименс» с 0,05 % бора и коэффициента размножения дало информацию о том, что количество плутония, подвергающегося делению в двух типах MOX-топлива должно достигать значения, гарантирующего выгорание одинаковое с выгоранием, достигаемым в тепловыделяющих сборках, базирующихся на уране. Первоначально тепловыделяющая сборка на уране более реактивна, чем MOX-тепловыделяющая сборка со стандартным неоружейным плутонием (процентное соотношение, в котором равно 2,6/54,0/24,2/11,8/7,4), что объясняется меньшим содержанием в первой изотопов, поглощающих нейтроны. Однако из-за того, что коэффициент воспроизводства изотопов подверженных делению достаточно высок, то уменьшение реактивности в течение эксплуатации менее заметно в сравнении с тепловыделяющими сборками на уране. Этот эффект объясняется тем, что поглощение нейтронов уменьшается вместе с меньшим начальным количеством Pu^{240} . Таким образом в процессе эксплуатации нарабатывается меньшее количество Pu^{241} , что в свою очередь создаёт спад реактивности.

1.4 PWR западного типа

Проведённый анализ реакторов распространялся на реакторы:

- Унтервезер ККУ;
- Графенрайнфельд ККГ;
- Филипсбург ККР-2;

- Гронде KWG;
- Брокдорф KBR.

Обозначенные реакторы использовали при работе 228 МОХ-тепловыделяющих сборок, которые в большинстве своём состояли из неоружейного плутония из реакторов на лёгкой воде. Во время проведения лицензирования использование 50 % МОХ-тепловыделяющих сборок в активной зоне (АЗ) было полностью оправдано и утверждено, как безопасное. В этих реакторах были задействованы тепловыделяющие сборки обычной конструкции [14], где четыре водяных стержня располагались по центру сборки и тремя МОХ-стержнями. Выбор такого расположения был обусловлен тем, что оно гарантирует равномерное распределение энерговыделения.

В 1987 году был спроектирован и создан первый вариант сборки, имеющей в себе увеличенное количество плутония. Эта сборка предназначалась для использования реактором Обрихайд КВО (с решёткой размером 14x14 стержней), для увеличения содержания U^{235} в перегружаемом топливе до 4 %. Тепловыделяющие сборки данной конструкции в количестве восьми штук были установлены для работы в реакторе в 1988 году. В качестве материала носителя был выбран уран с природным содержанием U^{235} . В получившейся системе находились три зоны, различающиеся по количеству плутония, подверженного делению. Среднее значение плутония было равно 3,8 %. После облучения в течение трёх циклов тепловыделяющие сборки давали значение выгорания порядка 35 МВт·сут/кг.

После этого для Графенрайнфельда ККГ была осуществлена замена природного урана на уран из отвала. По активной лицензии, действовавшей на предприятии, было возможно понижение количества U^{235} за счёт увеличения Pu^{239} , однако концентрация обогащённого в материале носителя урана в тепловыделяющей сборке оставалось постоянным на уровне 0,25 %. Среднее значение Pu в сборке, сконструированной по этим параметрам, и установилось на значении 3,48 %. Аналогично с предыдущим типом сборки, в её центре были

установлены четыре водяных стержня и стержни с наибольшим количеством плутония. Как и в предыдущем случае это давало наиболее равномерное распределение энерговыделения. Отличие заключалось в том, что стандартный размер для таких сборок был 16x16. МОХ-тепловыделяющие сборки в количестве 16 штук на 12 цикле выгорания были установлены в Графенрайнфельде в 1993 г.

МОХ-тепловыделяющие сборки, отличающиеся от вышеназванных предназначались для того, чтобы на их примере рассмотреть топливную кампанию с тепловыделяющей сборкой, в основе которой лежит уран и уровнем обогащения по изотопу U^{235} достигающим 4 %. Также они могли найти применение для тепловыделяющихборок другого типа, граничные условия которых отличаются от обычных, либо при работе с атомными электростанциями.

К окончанию 1997 года восемь штук МОХ-тепловыделяющихборок, в которых в качестве материала-носителя использовался отвалый уран и плутоний в процентном соотношении 4,8 % от общего количества в сборке благополучно завершили первый цикл выгорания на одной из станций в Швеции. В связи с таким результатом в этот реактор были установлены еще 20 штук такихборок в 1998 году, а 16 аналогичных МОХ-ТВС были отправлены на установку в Германии.

Изучению подверглись нейтронно-физические параметры тепловыделяющихборок, содержащих обогащенный плутоний, ранее использовавшийся в ядерном оружии, и схему сборки, насчитывающую три зоны. В данного топлива входит всего лишь 3 % тепловыделяющихборок такого типа, а это говорит про утилизацию достаточно небольшого объема плутония: порядка 0,28 т на 10 ТВт электрической мощности.

Второй тип МОХ-тепловыделяющей сборки подразумевают использование в качестве питания оружейный плутоний вперемишку с тем плутонием, который высвободился в процессе переработки топлива PWR.

Конечный результат сборки включает в себя такое процентное соотношение изотопов плутония:

Pu^{238} – 1 %

Pu^{239} – 74 %

Pu^{240} – 15 %

Pu^{241} – 6 %

Pu^{242} – 4 %

Таким образом, она становится близка к плутонию, полученному в MAGNOX-реакторе. Для урегулирования большого воздействия Pu^{238} , Pu^{240} , Pu^{242} , которые выступают в роли поглотителей было принято решение об увеличении количества изотопов плутония, подверженных процессу деления. Вновь была применена схема с тремя зонами и количеством в с 2,4 %; 3,4 % и 4,7 % в разных зонах соответственно.

Третий тип MOX-тепловыделяющей сборки включает в себя урановые стержни с гадолиниевым внешним покрытием (2,5 % U^{235} и 2,5 % Gd_2O_3) в количестве 12 штук для уменьшения уровня начальной реактивности.

Сравнению между собой подверглись различные типы равновесных циклов с разными способами загрузки. Большой акцент делали на значении реактивности АЗ. Итоги анализа схем движения MOX-тепловыделяющих сборок с процентом перегружаемого топлива достигающим значения от 30 % до 50 % можно сопоставить с результатами исследований о применении коммерческого плутония после того, как был завершен цикл с высоким выгоранием.

1.5 ВВЭР-1000

Под использование в ВВЭР–1000 были спроектированы MOX-тепловыделяющие сборки двух типов: со средним значением изотопов плутония, подвергающегося делению в 3,7 % и 4,1 %. Такое количество делящегося плутония даст выгорание, соответствующее сборкам с ураном, обогащение которых по изотопу U^{235} составляет 3,6 % и 4,0 % соответственно. Для того,

чтобы было достигнуто равномерное распределение энерговыделения, стержни, находящиеся на периферии сборки, нуждаются в уменьшении количества плутония, подвергающегося делению; также нужно создать 4 зоны, где будет реализовано разное процентное содержание плутония, подвергающегося делению. Последний пункт требуется для возможности загрузки, в которой не уделяется внимание отделению от стандартных ТВС на уране. Конструкции, в которой применяются 24 урановых стержня с гадолиниевым внешним покрытием характеризуется начальной реактивностью, достигающей оптимального значения.

Сравнение главных характеристик для ВВЭР-1000 произведено в таблице 2.

Таблица 2 – Обзор исследования схем движения топлива для PWR1300

Схема	Содержание делящегося Pu, %			
	3,78*	4,08**	3,87**	4,42**
Свежие ТВС:				
урановые / начальное обогащение	–	–	4/4,0	4/4,0
U-Gd/начальное обогащение	28/3,95	28/3,95	24/3,95	20/3,96
МОХ	20	20	16	20
ТВС в АЗ:				
урановые	–	–	16	17
U-Gd	112	112	107	88
МОХ	81	81	72	88
Эффективная продолжительность цикла выгорания, сут	328	310	304	315
Критическая концентрация бора, %	0,1940	0,1900	0,1530	0,1775
* Загрузочная схема PLL				
** Загрузочная схема FLL				

1.6 Продолжительность кампании и выгорание МОХ-ТВС

В случае если понадобится замена с изначально использующейся на реакторе неотравленной урановой сборки на МОХ-тепловыделяющую сборку, то это процесс замены не окажет существенного влияния на длительность кампании. Уровень выгорания тепловыделяющихборок на МОХ топливе сопоставим с выгоранием урановыхборок. Вышесказанные факты дают понять, что количество плутония в МОХ-тепловыделяющейборке выбрано верно.

1.7 Распределение энерговыделения в течение кампании

При сопоставлении значений начальной реактивности и энерговыделения у МОХ-тепловыделяющейборки с плутонием оружейным и плутонием из реакторов на лёгкой воде, можно сделать вывод о том, что большие значения начальной реактивности и энерговыделения присутствуют у сборки, в составе которой присутствует оружейный плутоний (таблица 3). Оптимальный уровень максимально возможной мощности тепловыделяющего элемента возможен при применении типа загрузки PLL, при которой происходит установка новых МОХ-тепловыделяющихборок на периферии АЗ, около отражателя, в то время как загрузка типа FLL вызывает неостребованное увеличение энерговыделения.

Таблица 3 – Исследование схем движения топлива для ВВЭР-1000

Схема	Число схем с Pu,%		
	3,70	4,10	4,10
Свежие ТВС			
Урановое/начальное обогащение	24/3,6	24/4,0	18/4,0
МОХ	24	18	24
ТВС в АЗ			
Урановые	79	91	24

Продолжение таблицы 3

U-Gd	–	–	43
МОХ	84	72	96
Эффективная продолжительность равновесного цикла, сут	289	298	294
Максимальная мощность на ТВС, МВт	1,38	1,44	1,34
Критическая концентрация без ксенона, %	0,2105	0,2240	0,2157
Примечание. Изотопный состав делящегося Pu –0/94/5/1/0, схема загрузки – PLL			

За счет высокой концентрации Pu^{238} , Pu^{240} и Pu^{242} проявляется оптимизация значения энерговыделения, что объясняется тем, что эти изотопы выступают в роли поглотителей нейтронов. За счёт этого осуществимо применение FLL без использования изотопов-поглотителей в МОХ-тепловыделяющих сборках.

1.8 Коэффициенты реактивности и критическая концентрация бора

Применение МОХ-тепловыделяющих сборок, в составе которых присутствует оружейный плутоний, снижает важность регулирования процесса при помощи бора и одновременно с этим увеличивает его критическую концентрацию до 0,194 % у 40 % топлива в самом начале цикла. Это происходит за счет извлечения стержней СУЗ. МОХ-тепловыделяющие сборки, компонентом которых является плутоний, получаемый на реакторах на лёгкой воде, даёт сопоставимые с этим результаты в 0,19 % бора. За счёт того, что отравленные урановые стержни на ВВЭР-1000 не подвергались применению, следует увеличение концентрации бора до 0,22 %.

Если рассматривать температурный коэффициент реактивности замедлителя на момент начала кампании, то можно сказать, что его стандартные значения варьируется от $-3,4$ до $-4,0 \cdot 10^{-5}/\text{K}$ для реактора PWR-1300 и в пределах от значения температурного коэффициента реактивности (ТКР) замедлителя В начале кампании для исследованных схем передвижения топлива от $-3,4$ до $-4,0 \cdot 10^{-5}/\text{K}$ для PWR—1300 и равен $-30 \cdot 10^{-5}/\text{K}$ для реактора ВВЭР-1000. После этого следует его увеличение и достижение максимума по завершению кампании в пределах от $-6,5$ до $-7,0 \cdot 10^{-5}/\text{K}$. Загрузка МОХ-тепловыделяющей сборки или её выгорание оказывает сильное влияние на Доплер-коэффициент.

1.9 Эффективность управляющих стержней

Все варианты, которые подверглись анализу показали, что они обладают нужной степенью эффективности стержней СУЗ. Оптимальное значение запаздывающих нейтронов, равное 0,5 % для смешанных загрузок в реакторе типа PWR-1300 соотносится с особенностями, возникающими во время переходных процессов.

Анализ полностью загруженных МОХ-тепловыделяющихборок с равным количеством плутония, подвергающегося делению, по всей АЗ выявил более отчетливые эффекты, которые наблюдались во время исследования смешанных АЗ. Тем не менее, как было сказано выше, применение PLL загрузки, при которой свежие стержни располагаются у отражателя (на периферии), позволяет достичь такого максимально возможного энерговыделения, которое не будет выходить за рамки разумного. Так как борное регулирование будет оказывать меньший эффект, а его концентрация повысится до 0,25 % в реакторе типа PWR-1300 и 0,32 % для ВВЭР-1000. Таким образом возникает необходимость в модернизации системы регулирования бором, либо использование бора с большим обогащением по изотопу В¹⁰. Из-за этого произойдет понижение числа запаздывающих нейтронов, и их эффективная доля

составит 0,35 %. Для того, чтобы произвести оценку показателей безопасности с такими условиями.

Самые важные характеристики, такие как:

- Доплер-коэффициент;
- температурный коэффициент реактивности замедлителя;
- эффективность регулирующих стержней

фиксируются в том же промежутке, что и схемы со смешанной АЗ.

1.10 Применение плутония в кипящих реакторах

Первым случаем, в котором плутоний, прошедший процесс переработки, нашел применение в кипящем реакторе считается его использование на реакторе типа BWR «Сименс». В середине 1966 года была применена схема «островных» тепловыделяющих сборок вместе с МОХ-тепловыделяющими сборками. Принцип «островной» ТВС заключается в одновременном использовании как урановых, так и МОХ-стержней.

В 1995 году атомной электростанцией Гундремминген было получено разрешение на использование АЗ, на 30 % наполненной МОХ-тепловыделяющими сборками. После это собраны тепловыделяющие сборки объемом 140 штук. Они были предназначены для поддержания уровня выгорания в интервале 35–40 МВт·сут/кг. На сегодняшний день в первом цикле выгорания находится 36 ТВС, во втором 32 ТВС и 48 перешли на третий цикл выгорания. По новой лицензии Гундремминген имеет право использовать МОХ-тепловыделяющую сборку типа ATRIUM с выгоранием 50 МВт·сут/кг.

Особенностями описываемой конструкции являются во-первых то, что плутоний применяется совместно с ураном природного обогащения или в матрице с ураном обедненным по изотопу U^{235} , во-вторых контроль значения реактивности в PWR при помощи использования стержней из U с гадолинием и в-третьих конструкция, которая повторяет строение тепловыделяющихборок на уране.

То, что такие тепловыделяющие сборки уже применяются на реакторе «Сименс» является большим преимуществом, так как благодаря это мы избавляемся от нужды тестирования различных материалов, на которое может уйти не одно десятилетие.

Так как в процессе эксплуатации, поглотительная способность материалов, предназначенных для этого падает, то соответственно с этим снижается эффективность работы, проделываемой регулируемыми и гадолиниевыми стержнями. За счёт этого возрастает значение максимального энерговыделения, что обусловлено увеличением градиента потока тепловых нейтронов. Основываясь на полученных результатах этого была разработана МОХ-тепловыделяющая сборка ВWR.

1.11 Потребление плутония

Потребление плутония ядерными реакторами, является важным параметром. Одним из важнейших аспектов использования оружейного плутония В ядерных реакторах является его потребление, которое может быть рассчитано с помощью нульмерной программы расчета выгорания KORIGEN. Сечения актинидов и спектральные характеристики (входные параметры) были рассчитаны по стандартному программному пакету «Сименс» SAV90 для PWR [15].

Анализ проведен для выгораний 40 И 50 Мвт·сут/Кг. Результаты для PWR-1300, ВВЭР-1000 И ВWR (таблица 4) сравниваются с учетом выработанной электрической энергии. Различие значений воднотопливного отношения российского ВВЭР-1000 (1,8) И немецкого PWR-1300 (2,0) также принимались в расчет, изотопная композиция плутония представлена в таблице; материал-носитель МОХ-ТВС — обедненный уран (обогащение 0,25 %). При расчетных выгораниях отношение количества делящегося плутония К общему снижалось с 95 до 66 и 58 %, что очень близко к значениям для энергетического плутония.

Таблица 4 – Баланс масс плутония для легководных реакторов

Показатели	Реактор		
	PWR-1300	ВВЭР-1000	BWR-1300
Средняя энерговыработка АЭС на одну загрузку, ТВт	10	6,9 7,2	10
Свежие МОХ-ТВС с $Pu_{\text{дел}}/Pu_{\text{общ}}+U$, %	3,25 3,75	3,70 4,10	3,32
Масса плутония, кг	18,1 20,9	17,6 19,6	6,3
Расчетное выгорание, МВт-сут/кг	40 50	40 50	50
Выгрузка МОХ-ТВС с $Pu_{\text{дел}}/Pu_{\text{общ}}+U$, %	61 58	66 64	–
Масса плутония, кг	11,7 12,5	11,8 12,1	–
Масса оружейного плутония, загружаемая при перегрузке МОХ-ТВС, кг			
30%	305 276	254 246	–
50%	508 460	423 410	–
100%	1015 920	847 821	825
Примечание. $Pu_{\text{дел}}$ – делящийся плутоний: Pu^{239} , Pu^{241} ; $Pu_{\text{общ}}$ – все нуклиды плутония от Pu^{238} до Pu^{242} .			

Возрастание выгорания от 40 до 50 МВт-сут/кг вызывает уменьшение числа ТВС, которые нужно изготовить и загрузить. На заводе по производству МОХ-топлива производительностью 120 т/год около 5 т оружейного плутония ежегодно может быть переработано в МОХ—топливо с содержанием делящихся нуклидов 3,7—4,1 %. Годовое производство может обеспечить 12 АЭС PWR-1300 – 20 МОХ-ТВС на перегрузку (3,75 %). В случае ВВЭР-1000 за год может быть изготовлено ~260 МОХ-ТВС. При содержании МОХ-ТВС в АЗ 30 и 100 % могут быть обеспечены соответственно 20 и 6 АЭС.

За 10 лет работы завод может переработать 50 т оружейного плутония. При суммарном выгорании 45 МВт·сут/кг ИЗ этого плутония и материала—носителя может быть получено ~500 ТВт электроэнергии. Для производства такого количества энергии традиционными способами необходимо 125 млн т угля или 85 млн т нефти.

1.12 Выводы

С технической точки зрения использование оружейного плутония в действующих легководных реакторах осуществимо. При расчетных значениях выгорания отношение количеств делящихся и неделящихся изотопов плутония изменяется с 95 до 66 и 58 %.

Завод по производству МОХ–топлива мощностью 120 т/год может переработать ~ 5 Т оружейного плутония. Этого достаточно, чтобы обеспечить топливом 12 энергоблоков с реакторами PWR-1300 – 20 МОХ–ТВС на перегрузку. В случае ВВЭР-1000 и 30 % МОХ-топлива в АЗ ~ 20 энергоблоков могут быть обеспечены топливом.

Опыт повторного использования плутония в Германии позволяет создать МОХ-ТВС, характеристики которых гарантируют безопасность при нормальной эксплуатации реактора и в аварийных ситуациях. При использовании оружейного плутония в российских ВВЭР можно воспользоваться опытом европейских PWR. Опыт крупных немецких BWR может служить основой утилизации избыточного оружейного плутония в американских BWR.

2 Экспериментально-расчетная часть

2.1 Описание экспериментальной установки на базе ВЧФ – плазмотрона

Эксперименты по получению порошков оксидных композиций проводились на плазменном стенде. Стенд предназначен для проведения исследований процессов плазменной обработки различных водно-солевых растворов в условиях воздушной плазмы ВЧФ-разряда в виде диспергированных ВОНР. Схема плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона представлена на рисунке А.1 приложения А.

От высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01 (рабочая частота 13.56 МГц, колебательная мощность до 60 кВт) по коаксиальному выводу 6 осуществляется передача высокочастотной энергии на водоохлаждаемый медный электрод 4 ВЧФ-плазмотрона 3, предназначенного для генерирования потоков воздушной плазмы со среднемассовой температурой до 4000 К. Разрядная камера ВЧФ-плазмотрона представляет собой трубку из кварцевого стекла диаметром 50 мм и длиной 860 мм [16].

Высоконапорный вытяжной вентилятор 9 осуществляет прокачку воздуха через ВЧФ-плазмотрон 3 и реактор плазменного стенда.

На входе в ВЧФ-плазмотрон установлен импеллер с постоянной входной площадью $S_{\text{ин}}=25 \text{ см}^2$, предназначенный для закрутки поступающего плазмообразующего газа (воздуха) в разрядную камеру,

На входе в реактор установлен импеллер 7, также служащий для закрутки поступающего в реактор воздуха. Входная площадь импеллера реактор $S_{\text{имп}}$ может регулироваться при помощи шибера, в пределах (0–1650 см²).

Для определения содержания загрязняющих веществ (СО, NO, NO₂) в отходящих после реактора газах служит газоанализатор 11 с пробоотборником 12. Используемый газоанализатор «Quintox» КМ 9106 также позволяет с помощью трубки Пито измерять напор набегающего воздушного потока в

воздуховодах и определять его скорость и расход. Высокоточный цифровой пирометр 14 марки IPE 140/145 предназначен для бесконтактного измерения в реакторе рабочей температуры плазменного горения диспергированных ВСОК в воздушно-плазменном потоке.

2.2 Определение расходов воздушного теплоносителя через ВЧФ – плазмотрон

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

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

$$f = \frac{\rho V^2}{2} = P_{\text{п}} - P_{\text{ст}} \quad (2.1)$$

где $P_{\text{п}}$ – полное давление, Па;

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

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

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

Преобразовав формулу 2.1, выразим скорость набегающего потока V :

$$V = [2 \cdot (P_{\text{п}} - P_{\text{ст}}) / \rho]^{0,5} \quad (2.2)$$

Искомое значение объёмного расхода воздуха через воздуховод вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{пт}} = S \cdot V, \quad (2.3)$$

где S – площадь поперечного сечения воздуховода.

На основании этих данных построены зависимости расхода плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон ($Q_{\text{пт}}$), а также воздушного теплоносителя через газоход ($Q_{\text{гхд}}$) от входной площади шиберов реактора. Влияние входной площади шиберов реактора на объёмные расходы воздуха через ВЧФ-плазмотрон и газоход представлено на рисунках 2.1 и 2.2.

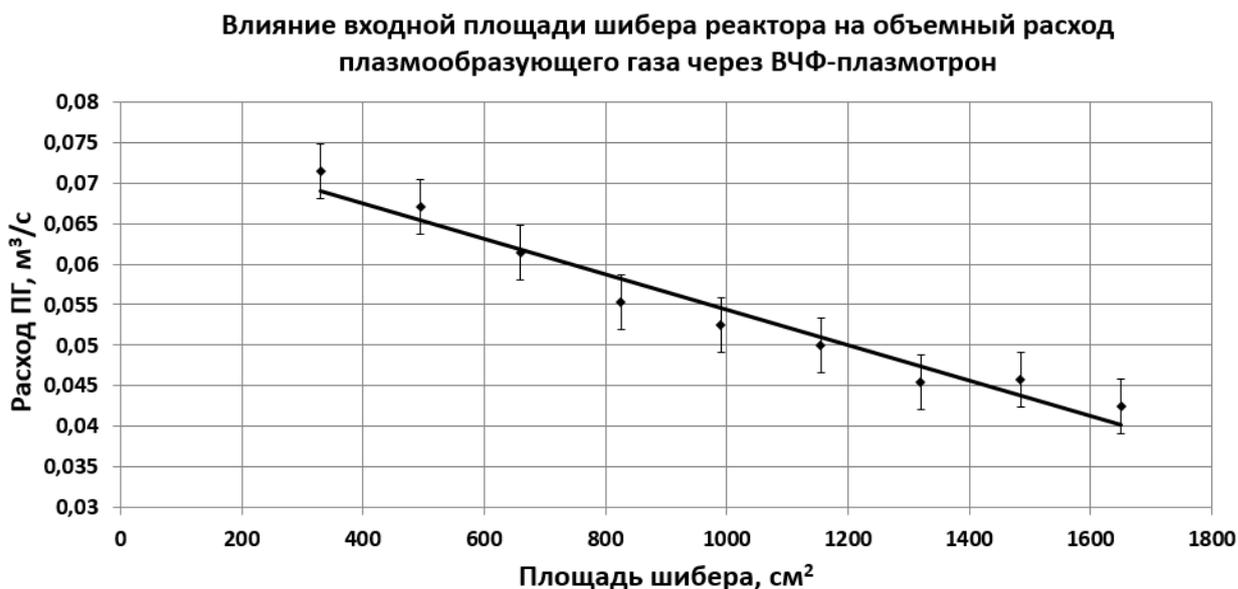


Рисунок 1 – Влияние входной площади шибера реактора на объемный расход плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон

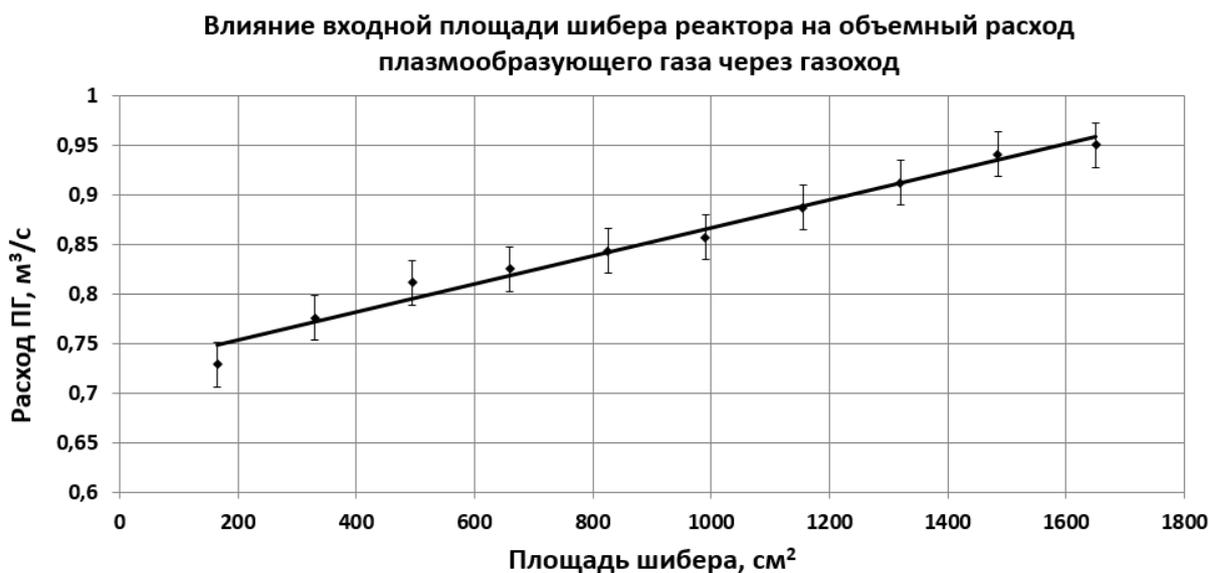


Рисунок 2 – Влияние входной площади шибера реактора на объемный расход плазмообразующего газа через газоход

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

2.3 Определение расходов воздушного теплоносителя через реактор

Расход газа через реактор определялся косвенным образом. Для расчета

расхода воздуха через реактор использовалось следующее выражение:

$$Q_p = Q_{гхд} - Q_{птр} \quad (2.4)$$

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.

В результате расчетов получены зависимости расходов воздушного теплоносителя через реактор плазменного стенда в зависимости от входной площади шиберов реактора. Полученные зависимости представлены на рисунке 2.3.

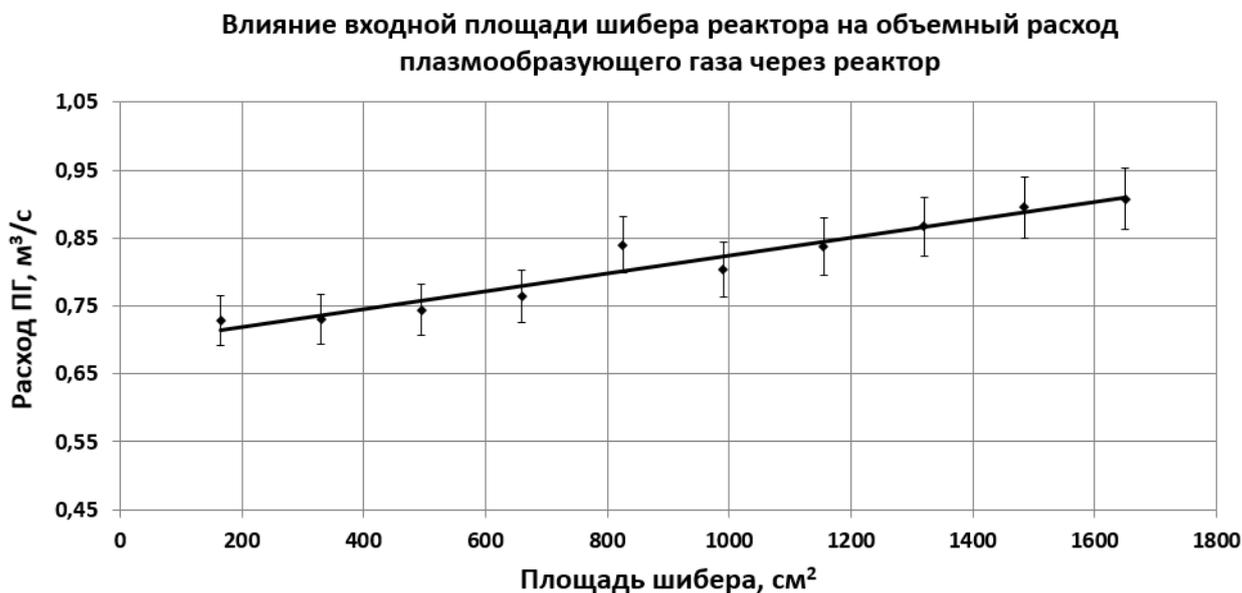


Рисунок 3 – Влияние входной площади шиберов реактора на объемный расход воздушного теплоносителя через реактор

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

2.4 Исследование режимов работы плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона

Исследования заключались в измерении потерь тепловой мощности на водоохлаждаемых теплонапряженных элементах ВЧ генератора (анод

генераторной лампы, сеточная индуктивность) и ВЧФ-плазмотрона (электрод, корпус) и определении теплофизических параметров плазменного стенда (КПД, энтальпия и температура воздушной плазменной струи и др.).

Расчетные соотношения представлены ниже.

Электрическая мощность, потребляемая ВЧ генератором от сети:

$$P_o = I_a \cdot U_a, \text{ кВт}, \quad (2.5)$$

где I_a – ток анода А;

U_a – напряжение на аноде генераторной лампы, кВ.

Тепловая мощность, рассеиваемая на аноде генераторной лампы:

$$P_a = m_a \cdot C_p \cdot \Delta t_a \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (2.6)$$

где m_a – массовый расход воды, кг/с;

Δt_a – изменение температуры охлаждающей воды, °С;

C_p – теплоемкость воды, ккал/кг·°С.

Тепловая мощность, рассеиваемая на сеточной индуктивности:

$$P_c = m_c \cdot C_p \cdot \Delta t_c \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (2.7)$$

где m_c – массовый расход воды, кг/с;

Δt_c – изменение температуры охлаждающей воды, °С;

C_p – теплоемкость воды, ккал/кг·°С.

Тепловая мощность, рассеиваемая на электроде:

$$P_{эл} = m_{эл} \cdot C_p \cdot \Delta t_{эл} \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (2.8)$$

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

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

C_p – теплоемкость воды, ккал/кг·°С.

Тепловая мощность, рассеиваемая на корпусе плазмотрона:

$$P_{кп} = m_{кп} \cdot C_p \cdot \Delta t_{кп} \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (2.9)$$

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

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

C_p – теплоемкость воды, ккал/кг·°С.

Мощность ВЧФ-разряда рассчитывалась по формуле:

$$P_{разр} = P_0 - (P_a + P_c + P_э), \text{ кВт} \quad (2.10)$$

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

$$P_{стр} = P_{разр} - P_{кл}, \text{ кВт} \quad (2.11)$$

Энтальпия плазменной струи:

$$H_T = H_0 + \frac{P_{разр}}{Q_{ПГ}}, \text{ кДж/кг}, \quad (2.12)$$

где H_0 – энтальпия газовой смеси при температуре 300 К;

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

Коэффициент полезного действия ВЧФ-плазмотрона:

$$\eta_{пд} = \left(\frac{P_{стр}}{P_{разр}} \right) \cdot 100, \% \quad (2.13)$$

Установочный коэффициент полезного действия плазменного стенда:

$$\eta_{уст} = \left(\frac{P_{стр}}{P_0} \right) \cdot 100, \% \quad (2.14)$$

На рисунке 2.4 показано влияние входной площади импеллера реактора среднemasсовую температуру воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном (при анодных токах генератора $I_a=3,0; 3,6; 4,0$ А).

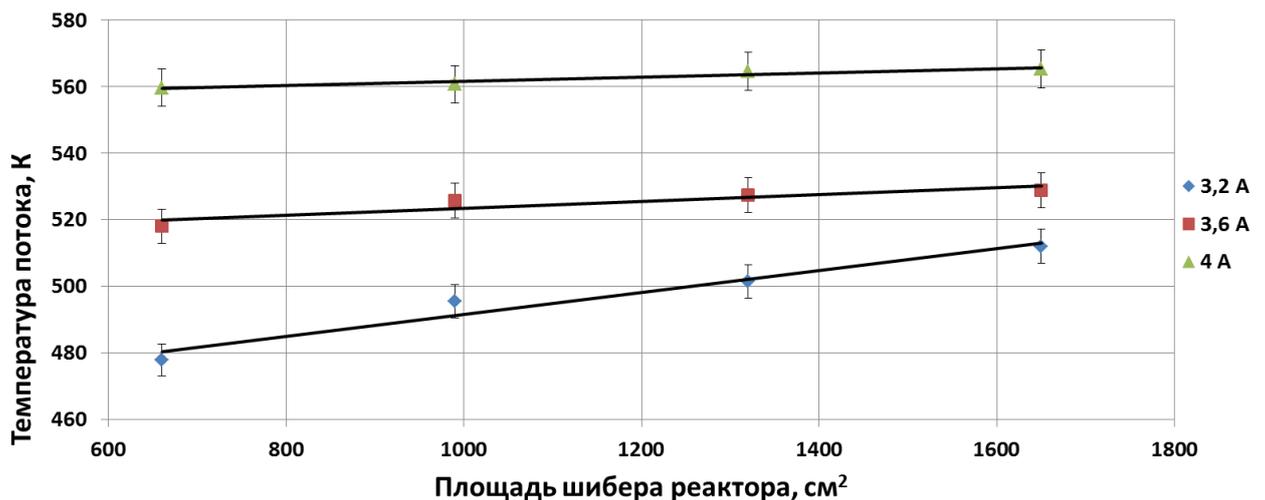


Рисунок 4 – Влияние входной площади импеллера реактора на среднemasсовую температуру воздушного плазменного потока, генерируемого ВЧФ-плазмотроном: ($I_a=3,0$ А; 3,6 А; 4,0 А)

Режим работы плазмотрона выбирается с таким расчетом, чтобы температура пламенной струи была не меньше температуры воспламенения горючего компонента перерабатываемой ВСОК

2.5 Плазмохимическая переработка модельных ВОНР

Для подтверждения возможности прямого плазмохимического синтеза высокодисперсных порошков гомогенных оксидных композиций тория и урана в воздушно-плазменном потоке были проведены экспериментальные исследования на модельных смесевых нитратных растворах. Для подготовки модельных ВОНР были использованы соли $\text{Sm}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (имитатор нитрата плутония) и $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (имитатор нитрата тория). Это обусловлено тем, что данные соединения, в растворах, формируют сложные ионы, сходные по свойствам, а также неодим находится в одной группе с ураном, а церий в одной группе с торием.

В качестве горючего компонента был использован ацетон, т.к. он обладает высокой теплотворной способностью, высокой взаимной растворимостью, а также легкой доступностью.

В таблице 5 представлен состав растворов ВОНР на основе ацетона.

Таблица 5 – Расчет состава растворов ВОНР на основе ацетона

Состав оксидной композиции	Состав раствора ВОНР				
	H_2O , % масс.	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$, % масс.	$\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ г/л	$\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, г/л	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, г/л
$\text{PuO}_2/(\text{ThO}_2+\text{PuO}_2)=0,1$	ВОНР-1				
«89% ThO_2 –9% PuO_2 –10% MgO »	22.4	62.2	28.7	267.9	160.3
	ВОНР-2				
«72% ThO_2 –8% PuO_2 –20% BeO »	22	60.2	25.5	238.1	320.5
	ВОНР-3				
«63% ThO_2 –7% PuO_2 –30% BeO »	21.2	58.4	22.3	208.3	480.8

Общий объем модельной ВОНР составил 5л.

«Розжиг» реактора осуществлялся воздушной плазменной струей

($T_{\text{стр}} \approx 565 \text{ K}$), генерируемой ВЧФ-плазмотроном, на чистом горючем компоненте – ацетоне, при анодном токе $I = 4 \text{ A}$ и входной площади шибера реактора $S_{\text{шиб}} = 1320 \text{ см}^2$.

Полученные в реакторе высокодисперсные продукты плазменной переработки модельной ВОНР направлялись в узел «мокрой» очистки (УМО) плазменного стенда, где под действием оборотной технологической воды (объем 155 л) происходило резкое охлаждение (закалка) и отделение этих продуктов с образованием водной суспензии, а очищенные отходящие газы забирались вытяжным вентилятором и выбрасывались в атмосферу.

Сразу после завершения опыта полученная суспензия с высокодисперсными продуктами была перекачана в осадительную емкость из нержавеющей стали (объем 250 л). Через 2 часа на дно емкости произошло выпадение порошков в виде осадка. Верхние слои воды были откачаны, а порошок собран.

Размер частиц порошков определялся на приборе DeslaMax PRO. Диапазон изменения прибора 0,4–10000 нм.

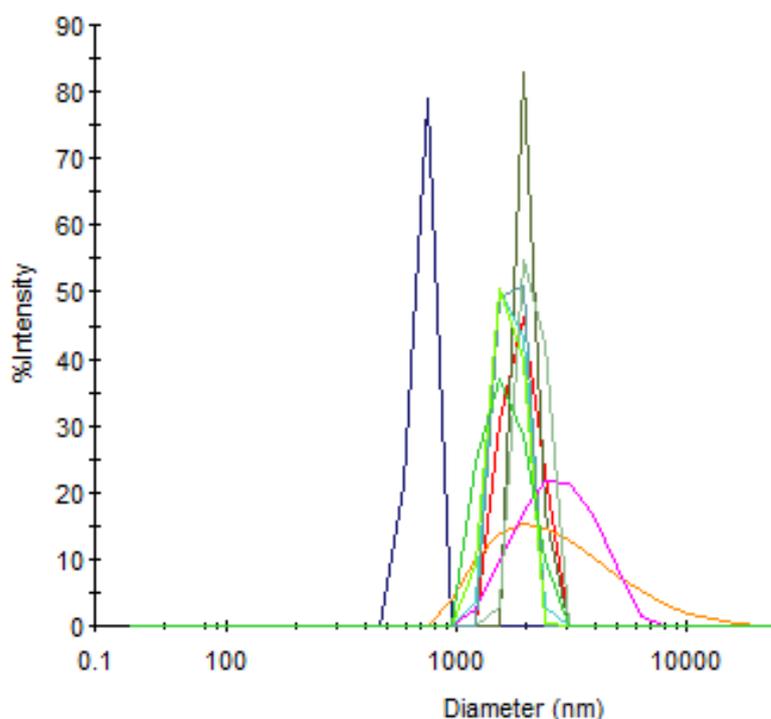


Рисунок 5 – Распределение частиц по размерам в полученных порошках

Из анализа данного рисунка и текстового выходного отчета прибора следует, что размер частиц в исследуемых порошках лежит строго в диапазоне 1–10 мкм. Размеры основной доли частиц в полученных порошках составляют (1,2–3) мкм.

Элементный анализ полученных порошков проводился на рентгенофлуоресцентном спектрометре марки QUANT'X EDXRF ANALYZER.

Спектрограмма представлена на рисунке 2.6.

Согласно данным спектрограммы в исследуемой пробе содержатся Sm, Ce. Благодаря тому, что полученные порошки обладают гомогенной структурой во всем объеме, оценка отношения площадей пиков для иттрия и циркония может быть использована для косвенной оценки соотношения $Sm/(Ce+Sm)$ в полученном порошке.

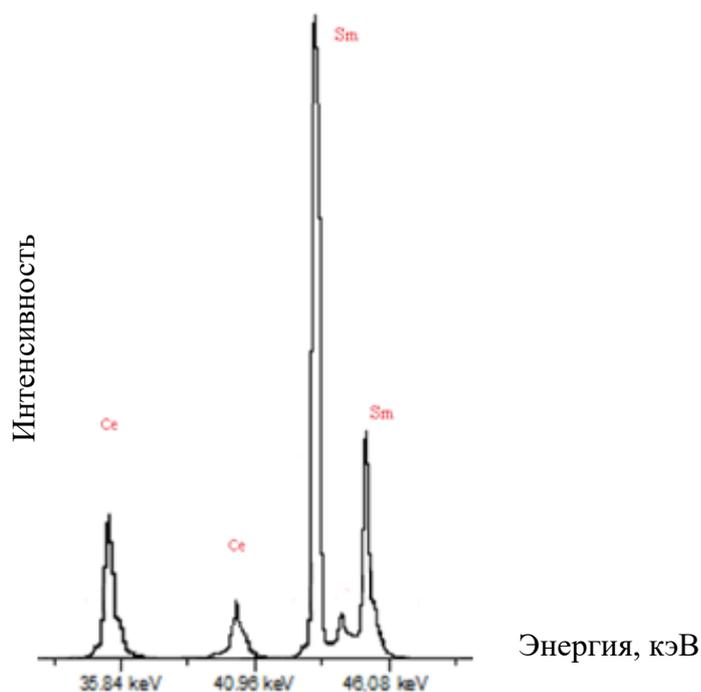


Рисунок 6 – Спектрограмма РФЛА

Из оценки отношения площадей пиков $Sm/(Ce+Sm) \approx 0,12$, можно сделать вывод о том, что массовое соотношение циркония и иттрия в полученных порошках и исходной модельной ВОНР (0,1) выдерживается.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

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

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

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

3.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В процессе написания магистерской диссертации были определены потенциальные потребители результатов исследования. К ним можно отнести инвестиционные компании, частных инвесторов, готовых вкладывать свои деньги в акции. Для анализа потребителей необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

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

Сегмент рынка – группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

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

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

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

Услуги по формированию портфеля:

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

Услуги по управлению портфелем:

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

3.2 Анализ конкурентных технических решений

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

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

Проведем данный анализ с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 6.

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

Таблица 6 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

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

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

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (3.1)$$

где

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что метод синтез ДЯТ с использованием воздушной плазмы по многим показателям является наиболее предпочтительным, чем традиционный метод синтеза ДЯТ, так как значение 4,6 больше значения 3,7.

3.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ представляет собой сводную таблицу, иллюстрирующую связь между внутренними и внешними факторами компании. Целью данного анализа является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

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

Таблица 7 – Матрица SWOT

	Сильные стороны С1.Технология, позволяющая достичь лучшего качества продукта. С2.Расширенный потребительский рынок. С3.Обширная база ресурсов для реализации.	Слабые стороны Сл1. Доступность методики исполнения. Сл2. Внедрение новой производственной технологии и обусловленные этим сложности.
Возможности В1. Работа с разными типами реакторов. В2. Заключение договора с крупной компанией (Росатом).	В1С1 Реализация большого числа проектов. В1С2 Исполнение индивидуальных заказов. В2С1 Получение выгодного контракта и улучшение репутации.	В2Сл1 Исполнение сложных задач узкой направленности. В2Сл2 Возможность обучения сотрудников и покупки необходимого оборудования.
Угрозы У1. Сильные конкуренты. У2. Политические санкции, кризис.	У1С3 Возможность выполнения большего числа заказов. У2С2 Обеспечение конкуренции за счет способности к исполнению задач разного типа.	У1Сл1 Переход на более сложную технологическую цепочку. У2Сл2 Аналитика политической ситуации и своевременное реагирование на изменение цен.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективными в сложившейся ситуации являются следующие стратегии:

1. Необходимо реализовывать большое количество проектов различной специализации и сложности и своевременно реагировать на политические и экономические факторы;
2. Необходимо обучить сотрудников навыкам работы в новом технологическом цикле, обеспечив высокий уровень конкурентоспособности.

3.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

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

Таблица 8 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

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

12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	2
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	3	1
	ИТОГО БАЛЛОВ	42	28

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

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

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i \quad (3.2)$$

где

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

B_i – балл по i -му показателю.

Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Так, если значение $B_{\text{сум}}$ получилось от 75 до 60, то такая разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации. Если от 59 до 45 – то перспективность выше среднего. Если от 44 до 30 – то перспективность средняя. Если от 29 до 15 – то перспективность ниже среднего. Если 14 и ниже – то перспективность крайне низкая.

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

3.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации. Выделяют следующие методы коммерциализации научных разработок:

1. Торговля патентными лицензиями, т.е. передача третьим лицам права использования объектов интеллектуальной собственности на лицензионной основе.

2. Передача ноу-хау, т.е. предоставление владельцем ноу-хау возможности его использовать другим лицом, осуществляемое путем раскрытия ноу-хау.

3. Инжиниринг предполагает предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг.

4. Франчайзинг, т.е. передача или переуступка разрешения продавать чьи-либо товары или оказывать услуги в некоторых областях.

5. Организация собственного предприятия.

6. Передача интеллектуальной собственности в уставной капитал предприятия.

7. Организация совместного предприятия, т.е. объединение двух и более лиц для организации предприятия.

8. Организация совместных предприятий, работающих по схеме «российское производство – зарубежное распространение».

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

3.6 Инициация проекта

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

1. Цели и результат проекта.

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

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в

результате завершения проекта. Информацию по заинтересованным сторонам проекта представим в таблице 9.

Таблица 9 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Частные инвесторы	Получение максимальной доходности в зависимости от вложений
Управляющие компании	Использование в атомной промышленности топлива нового типа

Представим информацию об иерархии целей проекта и критерия достижения целей в таблице 10.

Таблица 10 – Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Внедрение в атомное производство ДЯТ, полученного с применением воздушной плазмы
Ожидаемые результаты проекта:	Использование атомными предприятиями топлива, полученного с применением воздушной плазмы
Критерии приемки результата проекта:	Определенный процент предприятий, перешедший на топливо, синтезированного с помощью воздушной плазмы
Требования к результату проекта:	Требование:
	Надлежащее качество продукта, соответствующее регламенту
	Удовлетворение потребностей инвесторов

2. Организационная структура проекта.

Определим участников рабочей группы данного проекта, роль каждого участника в данном проекте, а также функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Представим эту информацию в таблице 11.

Таблица 11 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место ра- боты, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Иванов К.С., ТПУ, магистр	Построение мо- дели синтеза ДЯТ	Основной разра- ботчик проекта	492
2	Каренгин А.Г., ТПУ, доцент	Консультации по основным вопро- сам темы	Руководитель проекта	62
ИТОГО:				554

3. Ограничения и допущения проекта.

Ограничения проекта – все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Представим эту информацию в таблице 12.

Таблица 12 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	175362,12
3.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
3.2. Сроки проекта:	5 месяцев
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	09.01.2021
3.2.2. Дата завершения проекта	31.05.2021

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

3.7 Планирование научно-исследовательского проекта

Для выполнения работы формируется рабочая группа, в состав которой входит научный руководитель проекта (НР) и инженер (И). После чего, в рамках проведения научного исследования выполняется ряд основных этапов, представленных в Таблице 13.

Таблица 13 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение задания	И, НР
	2	Календарное планирование работ по теме	И
	3	Изучение материалов по теме	И
Выбор направления исследований	4	Анализ исходных параметров ЯТ, эксплуатируемого на АЭС	И
	5	Выбор метода выполнения работы	И, НР
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Применение модели синтеза ДЯТ	И
	7	Анализ результатов работы	И
Обобщение и оценка результатов	8	Составление отчета по работе	И

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта. Линейный график представлен в таблице 14.

Таблица 14 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление и утверждение задания магистерской диссертации	1	09.01.2021	10.01.2021	Иванов К.С. Каренгин А.Г.
2	Календарное планирование работ по теме	2	11.01.2021	15.01.2021	Иванов К.С.
3	Изучение материалов по теме	9	16.01.2021	28.01.2021	Иванов К.С.
4	Анализ исходных параметров	8	29.01.2021	07.02.2021	Иванов К.С.
5	Выбор метода выполнения работы	7	08.02.2021	18.02.2021	Иванов К.С. Каренгин А.Г.
6	Применение метода к исходным параметрам	29	19.02.2021	30.03.2021	Иванов К.С.

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (3.3)$$

где

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (3.4)$$

где

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

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: 10,4;

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

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (3.5)$$

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

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

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (г. Томск).

Таблица 17 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	52	52
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени:		
– отпуск	48	48
– невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Приведем расчет заработной платы для научного руководителя:

$$Z_{\text{м}} = 33300 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 56277 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{56277 \cdot 10,4}{251} = 2331,8 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{осн}} = 2331,8 \cdot 8 = 18654,4 \text{ руб.}$$

Приведем расчет заработной платы для инженера:

$$Z_{\text{м}} = 14874,45 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 25137,82 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{25137,82 \cdot 10,4}{251} = 1041,57 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{осн}} = 1041,57 \cdot 101 = 105198,57 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы приведем в таблице 18.

Таблица 18 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$, руб	$Z_{\text{дн}}$, руб.	$T_{\text{р. раб. дн.}}$	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Научный руководитель	33300	0,3	1,3	56277	2331,8	8	18654,4
Инженер	14874,45	0,3	1,3	25137,82	1041,57	101	105198,57
Итого:							123852,97

Отразим обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (3.6)$$

$k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

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

Расчет отчислений во внебюджетные фонды приведем в таблице 19.

Таблица 19 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.
Научный руководитель	18654,4
Инженер	105198,57
Коэффициент отчислений	0,271
Итого:	33564,15

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 20.

Таблица 20 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты	17945
2. Основная заработная плата	123852.97
3. Отчисления во внебюджетные фонды	33564.15
Бюджет затрат:	17362.12

Таким образом, проведено планирование бюджета научного исследования, рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления). Бюджет затрат составил 175362,12 рублей.

3.9 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин:

Интегральный финансовый показатель разработки:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (3.7)$$

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (3.8)$$

где

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 21.

Таблица 21. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО \ Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,10	5	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	2
3. Помехоустойчивость	0,20	3	4
4. Энергосбережение	0,20	4	5
5. Надежность	0,25	4	4
6. Материалоемкость	0,10	5	4
Итого:	1	26	22

$$I_{тп} = 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,1 = 4,6$$

$$I_{аналог} = 3 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,1 = 3,8$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки $I_{исп.i}$ определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{р-исп.i}}{I_{финр.i}} \quad (3.9)$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} \quad (3.10)$$

Таблица 22 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог
-------	------------	------------	--------

	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,6	3,8
	Интегральный показатель эффективности	4,6	3,8
	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,21	

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом, основываясь на показателях эффективности.

Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Потенциальными потребителями результатов исследования являются инвестиционные компании, частные инвесторы.

2. В результате проведения анализа конкурентных технических решений сделан вывод о том, что выбранный метод синтеза ДЯТ является наиболее предпочтительным, чем технология, используемая в производстве на данный момент.

3. Определены сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы для реализации проекта. По итогам выполнения SWOT-анализа выбраны наиболее эффективные стратегии.

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

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

6. При планировании бюджета рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды. Бюджет затрат составил 175362,12 рублей.

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

4 Социальная ответственность

Одно из основных направлений профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда. Таким образом осуществляться планомерное повышение качества и эффективности средств защиты от вредных и опасных производственных факторов.

Законодательство Российской Федерации об охране труда основывается на Конституции Российской Федерации и Трудовом кодексе Российской Федерации.

Работодатель берет на себя обязанности по обеспечению безопасных условий и охраны труда в организации. Согласно Федеральному закону от 17 июля 1999 г. №181-ФЗ "Об основах охраны труда в Российской Федерации" (с изменениями от 20 мая 2002 г., 10 января 2003 г., 9 мая, 26 декабря 2005 г.) остановимся на некоторых понятиях.

Охрана труда – система сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая в себя правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия.

Условия труда – совокупность факторов производственной среды и трудового процесса, оказывающих влияние на работоспособность и здоровье работника[17].

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его заболеванию.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его травме и смерти.

Безопасные условия труда – такие условия труда, при которых воздействие вредных или опасных производственных факторов на работников исключено или уровни их воздействия не превышают установленные нормы.

Рабочее место – место, в которое необходимо прибыть работнику для выполнения его работы.

Поставленные задачи требуют использования достижений многих научных дисциплин, прямо или косвенно связанных с задачами создания безопасных условий труда. При разработке требований производственной санитарии используются результаты исследований ряда медицинских и биологических дисциплин [18].

Огромнейшее влияние на решение проблем охраны труда оказывает качество подготовки специалистов в этой области, их умение принимать верные решения в сложных и динамичных условиях современного производства.

Рабочие, служащие, инженерно-технические работники и руководящий состав обязан следовать правилам по охране труда и техники безопасности.

4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Научно-исследовательская работа проводилась в отделе ядерно-топливного цикла ИШЯТ. Исследования и расчёты проводились с применением ЭВМ, также использовался ВЧФ-плазменный стенд с использованием высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01.

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

В таблице 23 представлены основные виды работ, которые могут привести к воздействию опасных и вредных факторов.

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

– физические: температура и влажность воздуха, шум, статическое электричество, электромагнитное поле низкой частоты, освещенность, наличие излучения;

– химические: вредные вещества (оксид самария, оксид неодима, диоксид

церия, ацетон, оксид углерода);

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

Таблица 23 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы по ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа с химическими реактивами	Химические вредные вещества	–	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества
Работа на плазменной установке.	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.)	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность, СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона
		Пожарная опасность	ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность
Расчёт данных на ЭВМ.	Шум, вибрация, микроклимат; воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.)	Электрический ток	СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах», ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность

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

4.2.1 Организационные мероприятия

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

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

4.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 4.1.

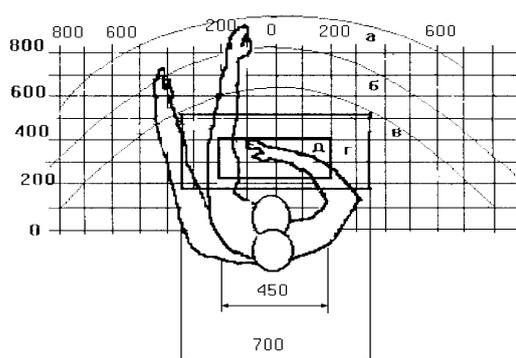


Рисунок 7 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

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

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 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 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

– по высоте +3 см;

– по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;

– в левом и правом направлениях.

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

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.

4.2.3 Условия безопасности работы

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

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [19] и приведены в таблице 24.

Таблица 24 – 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 – 20-25 °С, зимой – 13-15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. В нашем случае источником шума является откачивающий компрессор. Согласно уровню шума компрессора менее 65 дБ, что соответствует санитарным нормам. Шум на рабочем месте может быть

вызван работой ЭВМ. Уровень шума ЭВМ лежит в пределах 30-40 дБ, что также соответствует [20].

Электромагнитное излучение - распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля. ВЧФ-плазматрон питается от генератора высокочастотного тока. Генератор полностью экранирован. Согласно [21], предельно допустимая величина электромагнитного воздействия от установки на человека составляет менее 0,2 мкТл. Это значение входит в допустимый порог строгих санитарных норм электромагнитного излучения.

Экран и системные блоки ЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно [22] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

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

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц-2кГц – 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц – 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от 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 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.

4.3 Химическая безопасность

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.

В таблице 25 приведены предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ и их класс опасности.

Классы опасности:

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

Таблица 25 – Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ и их класс опасности

№	Вещество	ПДК, мг/м ³	Класс опасности
1	Оксид самария	4,0	3
2	Оксид неодима	4,0	3
3	Диоксид церия	5,0	3
4	Ацетон	0,35	2
5	Оксид углерода	5	3

Вентиляция — процесс удаления отработанного воздуха из помещения и замена его наружным. Система вентиляции обеспечивает отток и приток воздуха в помещении. Вентиляция обеспечивает санитарно-гигиенические условия (температуру, относительную влажность, скорость движения воздуха и чистоту

воздуха) воздушной среды в помещении, благоприятные для здоровья и самочувствия человека, отвечающие требованиям санитарных норм, технологических процессов, строительных конструкций зданий, технологий хранения и т. д. Система вентиляции на плазматроне осуществляется с помощью специальных движимых лопастей. Скорость потока воздуха через газопровод (вентиляцию) равна 18,76 м/с.

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

4.4 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.

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

Существует опасность электропоражения в следующих случаях: при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта электрических приборов, при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции), при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением, при коротком замыкании.

Электрический ток, проходя через организм человека может оказывать на него три вида воздействий:

– термическое действие тока выражается в появлении на теле ожогов разных форм, перегревание кровеносных сосудов, нарушение функциональности внутренних органов, которые находятся на пути протекания тока;

– электролитическое действие проявляется расщеплением крови и иной органической жидкости в тканях организма;

– результатами биологического действия становятся нарушение нормальной работы мышечной системы, возникновение непроизвольных судорожных сокращений мышц, нарушению нормальной работы органов дыхания и сердца, в том числе абсолютное прекращению их функциональности.

Основными факторами поражения, которые возникают в результате действия электрического тока на человека являются:

– электрическими травмами называется местное повреждение тканей организма в результате действия электрического тока или электрической дуги, такие как электрические ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, механические повреждения;

– электрические знаки, которые проявляются на коже человека, который подвергся действию тока, в виде пятен овальной формы серого или бледно желтого цвета, как правило, безболезненны, затвердевают подобно мозоли, со временем омертвевший слой кожи сходит самостоятельно;

– металлизация кожи возникает в результате проникновения в верхний слой кожи мелких частиц металла, который оплавился под действием электрической дуги, кожа в месте поражения становится болезненной, становится жесткой, принимает темный металлический оттенок;

– электроофтальмия наступает в результате воспаления наружной оболочки глаз под действием ультрафиолетовых лучей электрической дуги (для защиты необходимо пользоваться защитными очками и масками с цветными стеклами);

– механические повреждения – проявляются под действием тока, произвольным судорожным сокращением мышц. Это может привести к разрыву кожи, кровеносных сосудов и нервных тканей.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

– отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;

– вывешивание плакатов, указывающих место работы;

– заземление корпусов всех установок через нулевой провод;

– покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;

– недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей);

– применение средств защиты.

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

К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся: оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть заблокированы с устройствами, отключающими рабочее напряжение при снятии, изолирующие устройства и покрытия, устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения, устройства дистанционного управления, предохранительные устройства и др.

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

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

4.5 Пожарная и взрывная безопасность

В зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. 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.

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

Все работы с ацетоном должны проводиться с использованием приточно-вытяжной вентиляции вдали от огня и источников искрообразования. В производственных условиях должна быть соблюдена герметизация оборудования, аппаратов, процессов слива и налива для исключения попадания паров ацетона в воздушную среду помещений.

При сливо-наливных операциях необходимо соблюдать правила защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности.

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

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

Концентрацию ацетона в воздухе определяют методом, основанным на образовании йодоформа при взаимодействии ацетона с йодом в щелочной среде и сравнении степени помутнения со стандартной шкалой, а также с помощью газоанализатора УГ.

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 по телефону – 112;

- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Заключение

Проведен обзор литературы, описывающей технологии применения ядерного топлива плутоний-ториевого цикла. В работе используется специальная моделирующая программа «Терра» для изучения плазменных процессов. Приведена схема стенда, на котором выполнялся процесс плазмохимической переработки ВОНР и последующее синтезирование опытных партий порошков.

Образцы проанализированы с помощью технологии БЭТ-метода, рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной микроскопии. Данные полученные в ходе проведения этих анализов подтвердили получение образцов, требуемого размера.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза из растворов ВОНР оксидных композиций, применяемых в ядерном топливе плутоний-ториевого цикла.

Список публикаций

1. Зотов Е. Э., Иванов К. С., Каренгин А. А. Моделирование и исследование процесса плазмохимического синтеза наноразмерных оксидных композиций для уранового дисперсионного ядерного топлива // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XXI Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 21-24 Сентября 2020. - Томск: ТПУ, 2020 - С. 645-646

2. Басс В., Иванов К. С., Зубов В. В. Плазмохимический синтез и исследование оксидных композиций «оксид самария–оксид церия–оксид магния» // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов VI Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 26-29 Октября 2020. - Томск: ТПУ, 2020 - С. 51

3. Каренгин А. А., Кузнецов С. Ю., Иванов К. С. Плазмохимический синтез и исследование наноразмерных оксидных композиций, моделирующих дисперсионное REMIX–топливо // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов VI Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 26-29 Октября 2020. - Томск: ТПУ, 2020 - С. 44-45

4. Иванов К. С., Новоселов И. Ю., Тихонов А. Е. Плазмохимический синтез и исследование наноразмерных сложных оксидных композиций, моделирующих дисперсионное плутоний-ториевое ядерное топливо // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов VI Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 26-29 Октября 2020. - Томск: ТПУ, 2020 - С. 47

5. Иванов К. С., Новоселов И. Ю., Тихонов А. Е. Моделирование процесса плазмохимического синтеза наноразмерных сложных оксидных композиций "PuO₂-ThO₂-MgO" // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Российский и международный опыт подготовки кадров: сборник

научных трудов X Международной научно-практической конференции, Томск, 9-11 Сентября 2020. - Томск: Ветер, 2020 - С. 26-27

6. Каренгин А. А., Иванов К. С., Каренгин А. Г. Моделирование процесса плазмохимического синтеза наноразмерных оксидных композиций «UO₂-MgO» для дисперсионного REMIX–топлива // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Российский и международный опыт подготовки кадров: сборник научных трудов X Международной научно-практической конференции, Томск, 9-11 Сентября 2020. - Томск: Ветер, 2020 - С. 28

7. Иванов К., Хоцеловский Н. С., Побережников А. Д. Плазмохимический синтез и исследование модельных композиций «Sm–Ce–Be–O» // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 30 Сентября-4 Октября 2019. - Томск: ТПУ, 2019 - С. 131

8. Иванов К. С., Новоселов И. Ю. Моделирование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций «PuO₂–ThO₂–BeO» // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов V Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 19-23 Ноября 2018. - Томск: Графика, 2018 - С. 62 Школа-Конференция Молодых Атомщиков Сибири 9-13 ноября 2020 года Сборник тезисов докладов, г. Томск. / г. Кемерово: изд-во «Практика», 2020. – [с. 34]

Список использованных источников

- 1 Самойлов, А.Г. Дисперсионные тепловыделяющие элементы ядерных реакторов / А.Г. Самойлов, А.И. Каштанов, В.С. Волков. – Изд. 2-е М., Атомиздат, 1969. – 584 с.
- 2 Куммерер К. Поведение твэлов при высоком выгорании / К. Куммерер. – «Атомная техника за рубежом», 1972, № 9, С.26.
- 3 Чабб, У. Факторы, влияющие на набухание ядерного топлива при высоких температурах / У. Чабб // Атомная техника за рубежом. – 1976. – № 2, С. 8.
- 4 Frost В.Т. Studies of irradiation effects in ceramic fuels at Harwell / В.Т. Frost // Ceramic Nuclear Fuels. – 1969, С. 255.
- 5 Brucklacher, D. Creep behavior of ceramic nuclear fuels under neutron irradiation / D. Brucklacher, W. Dienst // Journal of Nuclear Materials. – 1972. – №42, p. 285.
- 6 Скоров Д.М. Реакторное материаловедение / Д.М. Скоров, Ю.Ф. Бычков, А.М. Дашковский. – М.: Атомиздат –, 1979. – 344 с.
- 7 Самойлов А.Г. Дисперсионные тепловыделяющие элементы ядерных реакторов / А.Г. Самойлов, А.И. Каштанов, В.С. Волков. – М.: Атомиздат –, 1965. – 343 с.
- 8 Алексеев С.В. Дисперсионное ядерное топливо / С.В. Алексеев, В.А. Зайцев, С.С. Толстоухов. – М.: Техносфера –, 2015. – 248 с.
- 9 Горский В.В. Ядерное топливо с инертной матрицей / В.В. Горский // Атомная техника за рубежом. – 1999. – Т. 10, – С. 9–13.
- 10 Degueldre С. Concepts of an inert matrix fuel, an overview / С. Degueldre, J.M. Paratte // Journal of Nuclear Materials. – 1999. – №. 274, – P. 1– 6.
- 11 Neff T.L. Disposition of HEU and Plutonium from Nuclear Weapons / Proc. 17 Intern. Symp. On Uranium and Nuclear Energy: The Uranium Institute. Sept. – 1992.

12 Sofer G.A. Swords to plowshares: Recycling weapons-origin Uranium and Plutonium in Light Water Reactors / G.A. Sofer, D.A. Nauman, J.K. Bilmann // Proc. Intern. Conf. And Technology Exposition on Nuclear Fuel Systems. «Global-93» Sept 12–17, 1993, Seattle.

13 Schlosser G.J. Experience in PWR and BWR Mixed-Oxide Fuel. Management / G.J. Schlosser, W.D. Krebs, P. Urban // Nuclear Technology, 1993. Vol. 102. P. 54.

14 Goll W. Irradiation behavior of UO₂/PuO₂ fuel in Light Water Reactors / W. Goll, H.-P. Fuchs, F.U. Schlemmer // Nuclear Technology, 1993. Vol. 102. P. 29.

15 Schlosser G.J. Advances in MOX Fuel Design for BWRs and PWRs / G.J. Schlosser, D. Bender // Proc. Intern. KTG/EN3 Topical Meeting on Nuclear Fuel. «TOPFUEL-95», March 12–15, 1995, Wurzburg (Germany).

16 Pekarek H. Reprocessing and Recycling – the Effect on the Plutonium Balance / H. Pekarek, W.D. Krebs // ENC`94 : Intern. Nucl. Congress Atoms for Energy, Oct. 2–6, 1994, Lyon.

17 Организация, нормирование и оплата труда: учебное пособие / А. С. Головачев, Н. С. Березина, Н. Ч. Бокун [и др.] ; – М.: Новое знание, 2004. – 496 с.

18 Пашуто, В. П. Организация, нормирование и оплата труда на предприятии: учебно-практическое пособие / В. П. Пашуто ;. – М: КНОРУС, 2005. – 320 с.

19 Моссэ А.Л. Применение низкотемпературной плазмы в технологии неорганических веществ / А.Л. Моссэ, В.В. Печковский. – Минск: Наука и техника –, 1973. – 216 с.

20 Эксплуатационная документация для компрессора AIRTECH 220/25W1.

21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : (СанПиН 1.2.3685-21) : официальное издание : утверждены Постановлением Главного

государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021. –
URL: <http://study.garant.ru/#/document/400274954/paragraph/134:0> (дата
обращения: 31.05.2021). – Текст: электронный.

Приложение А

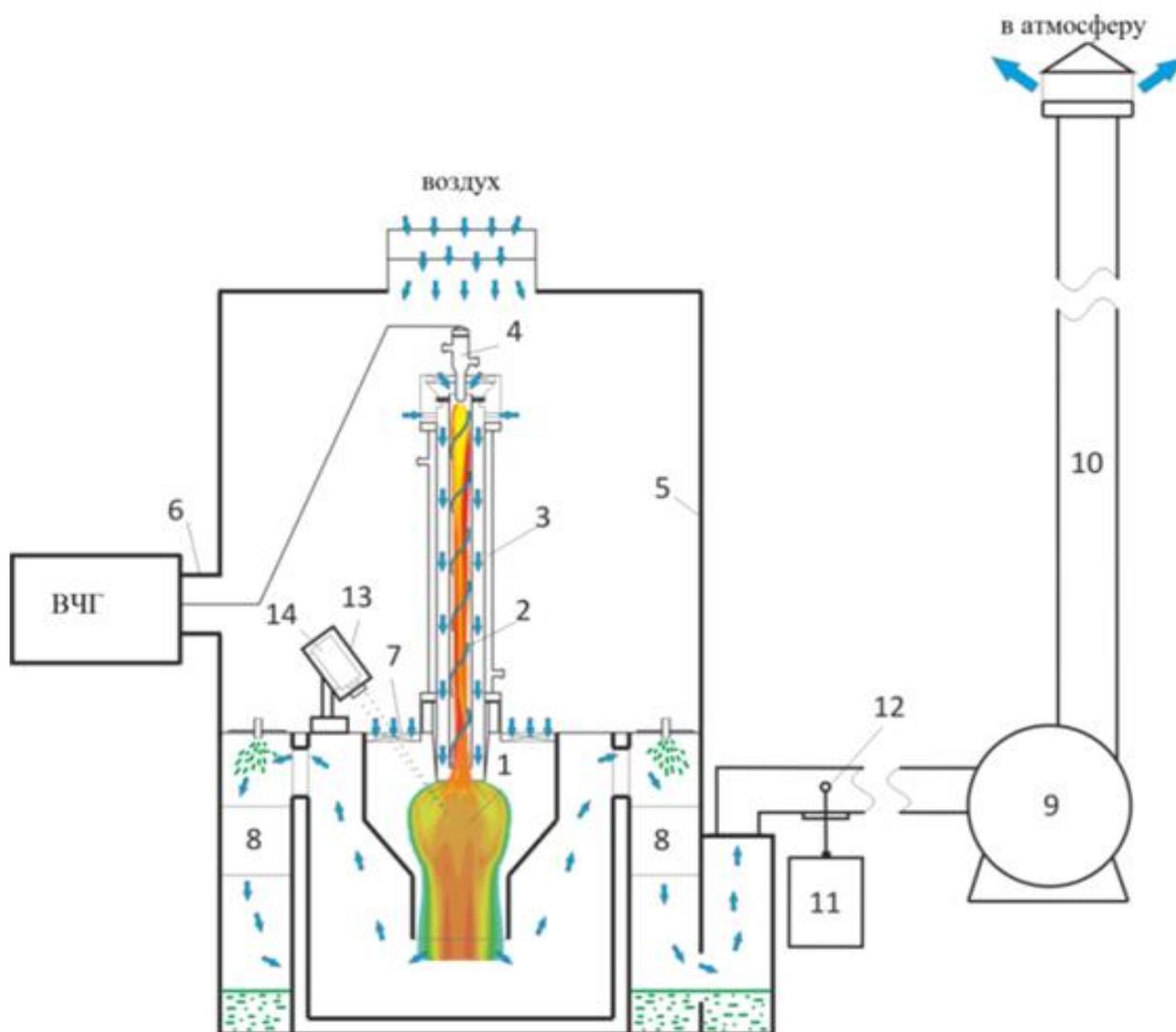


Рисунок А.1 – Схема плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона:

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

Приложение Б

(Справочное)

Plasma-chemical synthesis and study of oxide compositions simulating dispersed plutonium-thorium nuclear fuel

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Иванов Кирилл Сергеевич		

Руководитель ВКР

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

Консультант-лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Преподаватель ОИЯ ШБИП	Шайкина О.И.	-		

Introduction

A significant part of nuclear power in the twenty-first century is still represented by nuclear power plants using ceramic nuclear fuel (NF) from uranium dioxide enriched in the isotope uranium-235. Obviously, along with undoubted advantages, they are characterized by significant disadvantages: low thermal conductivity, which limits the specific power of the reactor in terms of melting point; brittleness and tendency to cracking; short cycle of use (up to 3-5 years), the impossibility of creating energy units of ultra-small (up to 10 MW) and small (10-100 MW) power; large expenses for disposal of spent nuclear fuel; limited resource of the uranium isotope 235.

When using isotopes uranium-238 and plutonium-239, there is no need for expensive isotopic enrichment, and cycle of such nuclear fuel can be 10-15 years. At the same time, the forecast thorium reserves in the earth's crust is 3-5 times more than uranium, and the use of ceramic nuclear fuel from oxide compositions based on plutonium will give the possibility of creating ultra-small and small power plants that can be built in remote and hard-to-reach regions, in mines and quarries. However, ceramic nuclear fuel still has a significant drawback, i.e. low thermal conductivity.

One of the promising areas for the further development of nuclear power engineering is the use of dispersive nuclear fuel, in which inclusions from fissile materials (uranium, thorium, plutonium) in the form of granular oxide compositions (microspheres) are placed in a matrix having a high coefficient of thermal conductivity. However, the use of a matrix of powders metals (aluminum, molybdenum, tungsten, stainless steel, etc.) increases the coefficient of thermal conductivity, but leads to a deterioration neutron balance due to high resonance absorption of neutrons. In addition, the use of external gelation (sol-gel process) for obtaining microspheres from mixed aqueous nitrate solutions is associated with the following disadvantages: multistage; duration; low performance; the need to use chemicals; additional hydrogen reduction; high cost. Besides, separate production and mechanical mixing of microspheres and matrix do not provide a homogeneous distribution of phases in such nuclear fuel.

In comparison with the sol-gel process and technology based on separate production and mechanical mixing metal oxides, the undoubted advantages of using plasma for plasma-chemical synthesis of oxide compositions from dispersed mixed aqueous nitrate solutions include: one-stage; high speed; the ability to actively influence the size and morphology of particles; compactness of technological equipment. However, plasma treatment of only mixed aqueous nitrate solutions requires significant energy consumption (up to 4 MW·h/t) and does not allow obtaining oxide compositions in one stage required stoichiometric composition without additional hydrogen recovery.

It is for the first time when the direct synthesis of complex oxide compositions (including oxide of fissile materials and a matrix of refractory metal oxide which have high thermal conductivity and low absorption of neutrons) is used in an air-plasma flow from dispersed combustible water-organic nitrate solutions (WONS). WONS contain an organic component (alcohols, ketones and etc.) and have a net calorific value of at least 8.4 MJ/kg and adiabatic combustion temperature at least 1200 °C.

A 1 Literature review

A 1.1 Plutonium dioxide and mixed oxide fuel production

Plasma treatment of such solutions VONR will lead to significant reduction in specific energy consumption for their processing (up to 0.1 MWh/t). Also, it will significantly increase the productivity of plasma installations and provide the conditions in the plasma-chemical reactor of the installation for direct synthesis in air plasma of nanosized complex oxide compositions with a homogeneous phase distribution, high thermal conductivity, including the required stoichiometric composition without additional hydrogen reduction. It was proposed to apply a cooling (quenching) of plasma-chemical synthesis products to control the physicochemical properties of the powders of complex oxide compositions (particle size and morphology, specific surface, granulometric and phase composition).

PuO_2 is the final product of calcination in air of various plutonium compounds: Pu(IV) peroxide and Pu(III) and Pu(IV) oxalates. Dry precipitates are slowly heated to 700 °C to a constant mass of PuO_2 . The characteristics of PuO_2 powders, like UO_2 , depend on the technology of their manufacturing and to a greater extent on the calcination temperature: this increase leads to a coarsening of the powder: the size of its particles and bulk density increase, as well as there is a reduced chemical activity. Plutonium forms several oxides from PuO to PuO_2 . Diagram of the state of the Pu–O system is distinguished by significant complexity, due to the fact that plutonium, like uranium, forms nonstoichiometric oxides, but if for UO_2 is characterized by a superstoichiometric state with embedded internodes by oxygen, then PuO_2 more easily transforms into a sub-stoichiometric state. PuO_2 easily loses oxygen at elevated temperatures in inert and reducing environments, which is accompanied by the expansion unit cell as a result of the formation of the Pu^{3+} ion. This effect is noticeable at temperatures above 100-12000 C.

A 1.2 Plasma technology for predicting oxides

After the sorption and extraction, refining has been introduced into hydrometallurgy of plutonium, uranium and other elements for the manufacture of nuclear-grade substances. Uranium and plutonium oxides obtained from solutions are used for the manufacture of ceramic nuclear fuel or are intermediate raw materials for obtaining nuclear materials. With the traditional method of making ceramic materials from solutions, the procedure is carried out using the following operations: precipitation of insoluble salt, filtration, drying, calcining, processing of initial solution, absorption of oxides. For the manufacture of nuclear-grade elements, nuclear-grade elements such as uranium and plutonium should be refined. Plasma technology allows "closing" the technological chain "solutions-oxides" due to decomposition of solutions directly. In technical and economic terms, such a change in the structure of the nuclear fuel cycle will significantly reduce the costs of certain stages by reducing the maximum number of stages, volume capacitive equipment, costs of chemical reagents, energy costs and labor costs.

A 1.3 Sol-gel process

The preparation of $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$ by the sol-gel process includes three main stages: preparation of sols, removal of water with the formation of solid particles gel, calcining.

The preparation of $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$ by the sol-gel process includes three main stages: preparation of sols, removal of water with the formation of solid particles gel, calcining.

Mixed oxide fuel with any U/Pu ratio is obtained by mixing the sols. The peculiarities of the formation of PuO_2 sols are due to hydrolytic reactions of Pu(IV) and unstable Pu (IV) nitrate in diluted HNO_3 . The minimum concentration of free HNO_3 in the initial solution of polymerization of $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ is maintained at least 1 M for prevention of plutonium polymerization; in this case, the concentration of free nitric acid can be up to 3 M. To ensure rapid neutralization and precipitation of Pu (OH) to

ammonia is added to the stock solution at a rate of 30 ml/min. Excess ammonia is removed from the final solution by filtration through a filter from of stainless steel. Industrial introduction of sol-gel preparation processes mixed oxide fuel will depend on the possibility of their implementation advantages over existing preparation production nuclear fuel. The expected benefits can be significant importance for the economy of the plant processes that make up the fuel cycle of fast neutron power reactors:

1) microspheres can be made with a size of 20-1000 microns with careful control of them at the stage of obtaining a gel; defective microspheres can be returned to the beginning of the process before the sintering operation;

2) mixed oxide microspheres can be sintered to high density (more than 95% of theoretical density) at a temperature of 2000 lower than the sintering temperature of the tablets, or made with a given controlled porosity ranging from 10 to 30%;

3) microspheres, including porous ones, have high strength when crushed, which creates additional technological advantages; no dusty product during the preparation of microspheres allows for easy localization of α -activity within working volumes technological equipment; the process of preparing microspheres is easy to carry out remotely in automatic cycle.

Б 5.1 Dispersive nuclear fuel

As nuclear fuel in some types of active zones (AZ) reactors use dispersion type fuel, which is a composition of nuclear fuel, in which the fissile phase (U^{233} , U^{235} , Pu^{239}) is in the form of particles (metal, compound). This fuel is uniformly distributed in a matrix of non-fissile material (metal, alloy, ceramics, graphite, etc.), as well as from U^{238} , Th^{232} , their alloys and compounds. The main advantage of dispersive nuclear fuel is its increased radiation resistance during long-term operation of fuel elements according to the compared fuel elements containing cores of a homogeneous nuclear fuel. High radiation resistance of dispersed fuel is provided by its structure, in which fission products are localized in fuel particles or near them. Every particle of nuclear

fuel dispersed in the fuel composition is a micro fuel, in which the matrix, which restrains volumetric changes in the core, performs the role of the shell. Dissociation of fission products and continuity matrices prevent damage to the fuel element core.

A characteristic feature of dispersive nuclear fuel is its increased radiation resistance during long-term operation in reactor. In this regard, dispersive fuel has found wide application in research and material science reactors, as well as in nuclear installations for special purposes, which are characterized by increased fission density, power release and temperature. The last time there was another incentive for the development and use of fuel dispersive type. This is due to the need to reduce the accumulated stocks of weapons and energy-grade plutonium.

Б 5.2 Dispersive nuclear fuel

With the reduction of nuclear weapons, a large amount of weapons-grade plutonium can be directed towards production. According to rough estimates, this figure may be about 220 tons. In order to prevent the proliferation of fissionable materials, this volume of weapons-grade plutonium is converted into energy plutonium. When using mixed oxide fuel, also known as MOX fuel, an energy release of about 1 PW can be achieved from 100 tons of plutonium (in case of burnup at the level of 45 MW · d / kg). The currently available technologies for the design, production and operation of fuel will allow, in the shortest possible time, using plutonium extracted from warheads in light water reactors, which are widely used in Russia.

Let us consider a similar situation in Germany. Their experience is the use of 382 MOX-FAs in eight pressurized water reactors and 294 MOX-FAs in six boiling-water reactors and pressurized heavy water reactors. The spectrum of those tested in pressurized water reactors turned out to be quite wide and included, in addition to MAGNOX-plutonium with a plutonium-239 content of less than 76%, plutonium obtained as a result of the reprocessing of SNF from light water reactors with the following percentage: Pu²³⁸ - 2% Pu²³⁹ - 58% Pu²⁴⁰ - 25% Pu²⁴¹ - 9% Pu²⁴² - 6% In

1977, it was decided to conduct the first tests of MOX fuel. The first to be tested was the MOX fuel composition with the lowest possible amount of fissionable isotope. The plutonium composition of this composition from the composition of the entire composition as a whole was equal to 44% Pu²³⁹ + 14% Pu²⁴¹. As a result of the experiments carried out, data were obtained on the campaign time, power release, reactivity coefficient and how the control rods designed for reactor cores with a varying number of MOX fuel assemblies in different zones affect. In other words, information was obtained on the profiling of MOX fuel in the reactor core [8]. Information on fuel elements consisting of irradiated MOX fuel with burnup in the range from 6 to 47 MW·day/kg was obtained through a thorough examination of the fuel assembly storage pools and inspection of individual elements. The most important parameters of the equilibrium burnup cycle containing MOX fuel prove that the reactor operating according to this scheme is safe. If we consider the real cycles applicable to light water reactors, then we can come to the conclusion that all the existing programs for calculations are adequate. It is generally known that plutonium enriched for use in nuclear weapons contains 95 % or more Pu²³⁹, the fission of which occurs using thermal neutrons, the energy of which approaches the energy that is observed during the thermal motion of gas molecules at normal temperature. This effect is achieved by reducing the periods of irradiation in industrial reactors with a specially developed design. The maximum benefit from the use of plutonium in the energy sector is achieved with the greatest possible burnup. It follows from this that after the reprocessing process, the plutonium composition contains a greater number of isotopes that are not subject to fission by thermal neutrons. The composition of some typical fuel compositions are given in table B.1. The number of isotopes can vary by one or two percent due to the fact that the periods and patterns of exposure differ from each other. It is also associated with the time elapsed from the cycle of past irradiation and the reprocessing process, which is explained by the decay of Pu²⁴¹, which has a half-life of 14.9 years. Since energy-grade plutonium contains more Pu240 than weapons-

grade plutonium, the production of fissionable Pu²⁴¹ is reduced. This is due to the lower absorption in the resonance region of Pu²⁴⁰.

Table B.1 - Examples of isotopic compositions of plutonium

Material	Pu ²³⁸	Pu ²³⁹	Pu ²⁴⁰	Pu ²⁴¹	Pu ²⁴²
Armory Pu	0	94	5	1	0
Energetic					
MAGNOX	0.3	76.1	18.4	4.4	0.8
PWR standard	1.8	59.0	23	12.2	4.0
Low burnout PWR	1.5	60.1	24.5	8.8	5.0
High burnup PWR	2.6	51.5	27.6	10.5	7.8
recycled MOX fuel (second generation)	1.4	43.5	34.3	14.3	6.5

Initially, the uranium fuel assembly is more reactive than the MOX fuel assembly with standard non-weapon plutonium, which is explained by the lower content in the first isotopes that absorb neutrons. However, due to the fact that the breeding ratio of isotopes subject to fission is quite high, the decrease in reactivity during operation is less noticeable in comparison with fuel assemblies based on uranium. This effect is explained by the fact that the absorption of neutrons decreases together with a smaller initial amount of Pu²⁴⁰

Б 5.3 Western type PWR

The analysis of the reactors was extended to the following reactors:

- Unterweser KKW;
- Grafenraynfeld KKG;
- Philipsburg KKP-2;
- Gronde KWG;
- Brockdorff KBR.

The designated reactors were used to operate 228 MOX fuel assemblies, which mostly consisted of non - weapon plutonium from light water reactors. During the licensing period, the use of 50 % MOX fuel assemblies in the core was fully justified and approved as safe. These reactors used fuel assemblies of a conventional design [10], where four water rods were located in the center of the assembly and three MOX rods. The choice of such an arrangement was due to the fact that it guarantees a uniform distribution of energy release.

In 1987, the first version of the assembly, containing an increased amount of plutonium, was designed and built. This assembly was intended for use by the Obriheim KWO reactor (with a grid of 14x14 rods) to increase the U^{235} content in the refueling fuel to 4 %. Eight fuel assemblies of this design were installed for operation in the reactor in 1988. Uranium with a natural content of U^{235} was chosen as the carrier material . In the resulting system, there were three zones, differing in the amount of plutonium subject to fission. The average plutonium value was 3.8 %. After irradiation for three fuel assemblies burnout cycles gave a value of the order of 35 MW·day/kg.

After that, for Grafenraynfelda KKG has implemented a replacement of natural uranium in the uranium from the stockpile. Under the active license in force at the enterprise, it was possible to reduce the amount of U^{235} due to the increase in Pu^{239} , however, the concentration of uranium enriched in the carrier material in the fuel assembly remained constant at 0.25 %. The average Pu in the assembly designed for these parameters was set at 3.48 %. Similar to the previous type of assembly, four water rods and rods with the highest amount of plutonium were installed in its center. As in the previous case, this gave the most uniform distribution of energy release. The difference was that the standard size for such assemblies was 16x16. MOX - fuel assemblies in the amount of 16 pieces in the 12th burnup cycle were installed in Grafenreinfeld in 1993.

MOX fuel assemblies that differ from the above were intended to be used as an example to consider a fuel campaign with a fuel assembly based on uranium and an enrichment level of U^{235} up to 4 %. They could also find application for fuel assemblies of a different type, the boundary conditions of which differ from the usual ones, or when working with nuclear power plants.

By the end of 1997, eight MOX fuel assemblies, in which waste uranium and plutonium were used as a carrier material in a percentage of 4.8 % of the total amount in the assembly, successfully completed the first burnup cycle at one of the stations in Sweden. In connection with this result, another 20 pieces of such assemblies were installed in this reactor in 1998, and 16 similar MOX-FAs were sent to the installation in Germany.

The study involved the neutron-physical parameters of fuel assemblies containing enriched plutonium, previously used in nuclear weapons, and a three-zone assembly scheme. This fuel includes only 3 % of fuel assemblies of this type, and this indicates the disposal of a rather small volume of plutonium: about 0.28 tons per 10 TW of electrical power.

The second type of MOX fuel assembly involves the use of weapons-grade plutonium mixed with the plutonium that is released during the reprocessing of PWR fuel.

The final assembly result includes the following percentage of plutonium isotopes:

Pu²³⁸- 1 %

Pu²³⁹- 74 %

Pu²⁴⁰- 15 %

Pu²⁴¹- 6 %

Pu²⁴²- 4 %

Thus, it becomes close to the plutonium produced in the MAGNOX reactor . To settle the large impact of Pu²³⁸, Pu²⁴⁰ and Pu²⁴², which act as absorbers, it was decided to increase the number of plutonium isotopes subject to the fission process. The scheme was again applied with three zones and an amount of 2.4; 3.4 and 4.7 % in different zones, respectively.

The third type of MOX fuel assembly includes 12 uranium rods with a gadolinium outer coating (2.5 % U²³⁵ and 2.5 % Gd₂O₃) to reduce the level of initial reactivity.

Different types of equilibrium cycles with different loading methods were compared to each other. Great emphasis was placed on the significance of the AZ reactivity. The results of the analysis of the patterns of movement of MOX fuel assemblies with the percentage of refueling fuel reaching values from 30 to 50 % can

be compared with the results of studies on the use of commercial plutonium after the cycle with high burnup has been completed.

Б 5.4 VVER-1000

MOX fuel assemblies of two types were designed for use in VVER-1000: with an average value of plutonium isotopes subject to fission of 3.7 and 4.1 %. This amount of fissile plutonium will give a burnup corresponding to assemblies with uranium, the enrichment of which in the U^{235} isotope is 3.6% and 4.0 %, respectively. In order to achieve a uniform distribution of energy release, the rods located at the periphery of the assembly need to reduce the amount of plutonium that undergoes fission; it is also necessary to create 4 zones where different percentages of plutonium undergoing fission will be realized. The last point is required for loading capability, which does not pay attention to separation from standard uranium fuel assemblies. The design, which uses 24 uranium rods with a gadolinium outer coating, is characterized by an initial reactivity reaching the optimum value.

Comparison of the main characteristics for VVER-1000 is made in Table B.2.
Table B.2 - Review of the study of fuel flow patterns for PWR 1300

Scheme	Fissile Pu content, %			
	3.78*	4.08**	3.87**	4.42**
New FA (fuel assembly):				
U/initial enrichment	–	–	4/4.0	4/4.0
U-Gd/initial enrichment	28/3.95	28/3.95	24/3.95	20/3.96
MOX	20	20	16	20
FA B AZ:				
U	–	–	16	17
U-Gd	112	112	107	88
MOX	81	81	72	88
Effective duration of the burn-out cycle, days	328	310	304	315
Boron critical concentration,%	0.1940	0.1900	0.1530	0.1775
* Boot circuit PLL				
** FLL Boot Scheme				

