

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

Инженерная школа энергетике

Специальность: **14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг**

НОЦ И.Н. Бутакова

### ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАВШЕГО РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА</b>

УДК 621.039.75-032.36

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5052	АНИКИН Олег Владимирович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	Губин В.Е.	к.т.н., доцент		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гузырь В.В.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.	-		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг»	Воробьев А.В.	к.т.н., доцент		

## Результаты освоения ООП

Код	Результат освоения ООП	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
P1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм и имеющихся ресурсов и ограничений.	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке и иностранном(ых) языке(ах) для академического и профессионального взаимодействия	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах.	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни.	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P9	Способен решать задачи профессиональной деятельности с использованием базовых знаний естественнонаучных дисциплин и информационных технологий, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны.	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P10	Способен использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт для реализации исследований в области создания, модернизации и эксплуатации ядерных энергетических установок	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P11	Способен проводить математическое моделирование физических процессов и аппаратов технологического оборудования АС, в том числе на базе пакетов автоматизированного проектирования и исследований	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P12	Способен формулировать цели и задачи ис-	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO

Инв. № подл. Подп. и дата. Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата
------	--------	------	--------	-------	------

ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ

Код	Результат освоения ООП	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
	следований в области создания и повышения эффективности эксплуатации АС, выбирать методику и средства проведения научных исследований, выполнять и анализировать результаты НИОКР, участвовать в испытаниях оборудования	Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P13	Способен участвовать в организации безопасной экономической эксплуатации реакторной установки, оборудования и технологических систем энергоблока атомной электростанции, анализировать технологические процессы, режимные ограничения, алгоритмы управления и защиты АС, проводить контроль параметров сред	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P14	Способен участвовать в проектировании элементов оборудования и технологических систем атомных станций с учетом требований ядерной, радиационной, пожарной, промышленной и экологической безопасности и с использованием современных информационных технологий	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P15	Способен применять и разрабатывать техническую документацию в соответствии с требованиями государственных, отраслевых и ведомственных стандартов и осуществлять проектно-конструкторскую деятельность в соответствии с техническим заданием в области профессиональной деятельности	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P16	Способен проводить технико-экономический анализ и оценку конкурентоспособности и экономической эффективности проектируемых систем, оборудования и АС в целом	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P17	Способен анализировать и рассчитывать ядерно-физические и нейтронно-физические процессы термодинамические, теплогидравлические, физико-химические и технологические процессы на атомной станции	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P18	Способен провести оценку ядерной и радиационной безопасности, организовывать мероприятия по обеспечению ядерной, радиационной, технической, пожарной безопасности, выполнению требований охраны труда в процессе производства электрической и тепловой энергии на атомных станциях, в том числе при обращении с ядерным топливом	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P19	Способен организовать работу малых коллективов исполнителей, планировать работу персонала, разрабатывать оперативные планы работы первичных производственных подразделений, организовывать рабочие места	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P20	Способен участвовать в проведении испытаний основного и вспомогательного оборудования атомных станций и ядерных энергетических установок, проводить физические эксперименты на этапах физического энергетического пуска энергоблока с целью определения нейтронно-физических параметров реакторной установки и АС в целом	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P21	Способен проводить измерения электрических и неэлектрических величин примени-	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями

Инв. № подл. Подп. и дата. Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата
------	--------	------	--------	-------	------

ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ

Лист  
3

Код	Результат освоения ООП	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
	тельно к объектам профессиональной деятельности, выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств	международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P22	Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач в сфере ядерной энергетики и технологий, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников
P23	Способен анализировать технологии монтажа, ремонта и демонтажа оборудования АС (и ЯЭУ) применительно к условиям сооружения, эксплуатации и снятия с эксплуатации энергоблоков АС	Компетенции ФГОС ВО, СУОС ТПУ, CDIO Syllabus, АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования работодателей к компетенциям выпускников

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№зак.		

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

---

Инженерная школа энергетики

Специальность: **14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжини-  
ринг**

НОЦ И.Н.Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

А.В. Воробьев

\_\_\_\_\_  
(Подпись)

\_\_\_\_\_  
(Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

**дипломной работы**

(бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
<b>5052</b>	<b>Аникин Олег Владимирович</b>

Тема работы:

<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТИРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАВШЕГО РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	16.12.2020 №351-38/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**25 января 2021 года**

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b> <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Целью исследования является отработка технических решений обращения с радиоактивным графитом российских атомных станций и определение наиболее эффективных высокотемпературных технологических решений.</p>
--	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обзор литературы для изучения процессов и методов используемых для переработки реакторного графита</li> <li>2. Разработка принципиальных схем установок</li> <li>3. Проведения экспериментов на экспериментальной установке</li> <li>4. Совершенствование технологий утилизации</li> <li>5. Заключение</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Принципиальная схема установки</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>  <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Раздел</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Консультант</b></p>
<p><b>Финансовый менеджмент</b></p>	<p>Гузырь В.В. Доцент ОСГН ШБИП</p>
<p><b>Социальная ответственность</b></p>	<p>Мезенцева И.Л. Ассистент ООД ШБИП</p>
<p><b>Автоматизация технологических процессов</b></p>	<p>Атрошенко Ю.К. Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>25 июня 2020 года</p>
--	--------------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ</p>	<p>Губин В.Е.</p>	<p>к.т.н., доцент</p>		<p>25.06.20</p>

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>5052</p>	<p>Аникин Олег Владимирович</p>		<p>25.06.20</p>

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСО-  
СБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5052	Аникин Олег Владимирович

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>НОЦ И.Н.Бутакова</b>
Уровень образования	Специалитет	Направление/специальность	14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Оклад доцента, к.т.н. – 27600 руб./мес. Оклад ассистента – 17850 руб./мес. Каталоги заводов-изготовителей (поставщиков)
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Районный коэффициент 1,3
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления на социальные нужды 30 %

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

1. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений	Проведение комплексного анализа посредством составления матрицы SWOT-анализа
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Планирование работ; Затраты на проект: 1. Стоимость материалов 2. Заработная плата участников проекта 3. Начисление по оплате труда 4. Накладные расходы
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Матрица SWOT-анализа
2. Смета итоговых расходов

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	25.10.20
---	----------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Гузыр В.В.		25.10.20

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5052	Аникин О.В.		25.10.20

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
<b>5052</b>	<b>Аникин Олег Владимирович</b>

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>Ноц. Им. Бутакова</b>
<b>Уровень образования</b>	<b>Специалитет</b>	<b>Направление/специальность</b>	<b>14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг</b>

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

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: радиоактивный графит и высокотемпературная термическая утилизация Область применения: утилизации отработавшего радиоактивного графита
--	---

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

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– Федеральный закон “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности” от 28.12.2013 г. №123 – Федеральный закон “О специальной оценке условий труда” от 28.12.2013 г. №426
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: повышенный уровень шума и вибрации, недостаточная освещенность рабочей зоны Опасные факторы: опасности поражения электрическим током, нагретыми поверхностями, механические повреждения и пожарная опасность.
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Атмосфера: выбросы CO и CO <sub>2</sub>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможные ЧС: пожары, землетрясения, обрушения зданий. Наиболее типичная ЧС: пожар

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	<b>25.10.20</b>
---	-----------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент	Мезенцева И.Л.	-		25.10.20

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5052	Аникин Олег Владимирович		25.10.20



## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 94 с., 15 рис., 15 табл., 76 источника.

Ключевые слова: радиоактивный графит, графит, переработка радиоактивного графита, обращение с РАО, РАО, утилизация реакторного графита.

Объектом исследования являются экспериментальные установки для электродуговой плазменной обработки реакторного графита.

Целью работы является отработка технических решений обращения с радиоактивным графитом российских атомных станций и определение наиболее эффективных высокотемпературных технологических решений.

В процессе выполнения работы была разработана принципиальная схема экспериментальной установки, выполнены эксперименты по переработке реакторного графита. Также рассмотрены вопросы пожарной, производственной безопасности, электробезопасности.

В результате данной исследовательской работы были произведены эксперименты по переработке реакторного графита и синтезу карбида циркония. Экспериментальные данные могут служить для более эффективной доработки технических решения обращения с радиоактивным графитом, а также помочь ученым в разработке производственной технологии и оборудования для переработки реакторного графита.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№зак.		Подп.

## Список сокращений

РБМК – Реактор большой мощности канальный;

УГР – Уран графитовый реактор;

НТР – Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор;

ЖРО – Жидкие радиоактивные отходы;

РАО – Радиоактивные отходы.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №							Лист
			ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ						
Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата				10

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Список сокращений .....</b>	<b>10</b>
<b>Введение .....</b>	<b>14</b>
<b>1 Обзор литературы .....</b>	<b>16</b>
1.1 Объект исследования .....	18
1.2 Образование <sup>14</sup> C .....	19
1.3 Механизм образования трития ( <sup>3</sup> H) .....	21
1.4 Транспортные процессы в графитовом теле.....	22
1.4.1 Диффузия .....	22
1.4.2 Сорбция.....	23
1.5 Существующая проблема .....	24
1.6 Способы утилизации и переработки радиоактивного графита .....	24
1.7 Обзор компаний по обращению с ядерными отходами .....	25
1.8.1 Утилизация после иммобилизации в инертной матрице .....	27
1.8.2 Утилизация после покрытия и пропитки.....	28
1.8.3 Сжигание.....	29
1.8.4 Паровой риформинг .....	30
1.8.5 Химическая обработка.....	30
1.8.6 Термическая обработка .....	31
<b>2 Цели и задачи исследования .....</b>	<b>33</b>
<b>3 Электродуговая плазменная обработка реакторного графита .....</b>	<b>35</b>
3.1 Описание электродуговой плазменной обработки реакторного графита как способа утилизации.....	35
3.2 Описание установки для электродуговой плазменной обработки реакторного графита .....	35
3.3 Синтез в дуговой плазме порошка ZrC .....	40
3.4 Уравнение реакции .....	41
3.5 Тепловая задача .....	42
3.6 Диаграмма состояния .....	44
3.7 Анализ полученного вещества.....	46
<b>4 Автоматизация производственных процессов.....</b>	<b>48</b>
4.1 Описание технологической схемы работы оборудования .....	48

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					Лист
			ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ				
Изм.	Коллч.	Лист	№Эок.	Подп.	Дата	11	

4.2	Обзор и выбор принципиальных схем контроля и автоматизации.....	49
4.3	Выбор технических средств для реализации систем контроля и автоматизации .....	51
4.3.1	Выбор первичных измерительных преобразователей температуры ..	51
4.3.2	Выбор первичных измерительных преобразователей силы тока .....	53
4.3.3	Выбор регулирующих и регистрирующих устройств.....	54
4.3.4	Выбор оборудования функциональной схемы .....	55
<b>5</b>	<b>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b> .....	<b>56</b>
5.1	Планирование работ .....	56
5.2	Затраты на проект .....	57
5.2.1	Смета на комплектующие для экспериментальной установки и необходимые материалы .....	57
5.2.2	Затраты на заработную плату .....	57
5.2.3	Затраты на социальные отчисления .....	58
5.2.4	Итоговая стоимость проекта.....	58
5.2	SWOT – анализ.....	59
<b>6</b>	<b>Социальная ответственность</b> .....	<b>61</b>
6.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	61
6.2	Производственная безопасность .....	64
6.3	Анализ вредных факторов.....	65
6.4	Анализ опасных факторов.....	71
6.5	Экологическая безопасность.....	75
6.6	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	76
	<b>Заключение</b> .....	<b>78</b>
	<b>Список использованных источников</b> .....	<b>80</b>
	<b>Приложение А</b> .....	<b>87</b>
	<b>Приложение В</b> .....	<b>89</b>
	<b>Приложение Г</b> .....	<b>91</b>

Графический материал:

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам инв. №								Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата		
ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ									12	

ФЮРА.ХХХХХХ.002 С3. Принципиальная схема установки для утилизации графита.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ

Лист

13

## Введение

Графит широко используется в атомной энергетике в качестве углеродного конструкционного материала, т.к. имеет хорошие ядерно-физические свойства, а также имеет отличные механические и термические сопротивления, используется в качестве замедлителя и отражателя нейтронов как в реакторах-наработчиках оружейного плутония, так и в реакторах атомных энергоблоков первых поколений в разных странах мира. Создание эффективных технологий обращения с облученным в реакторах радиоактивным графитом — одна из ключевых задач, которую надо решить, чтобы выводить из эксплуатации такие реакторы, в том числе на АЭС.

На территории России было в разное время построено 13 (всего в мире 123) промышленных уран-графитовых реакторов для наработки оружейного плутония (ПУГР), уран-графитовый реактор (УГР) АМ первой в мире Обнинской АЭС, 2 УГР АМБ-100 и АМБ-200 первой очереди Белоярской АЭС, 4 УГР ЭГП-6 Билибинской АЭС, 11 реакторов РБМК Ленинградской, Курской и Смоленской АЭС. К настоящему моменту остановлены и ведутся работы по выводу из эксплуатации всех 13 ПУГР, реакторов первой очереди Белоярской АЭС и Обнинской АЭС. Завершается срок эксплуатации энергетических реакторов РБМК и ЭГП-6. Таким образом, подавляющее большинство УГР, в том числе и все (кроме КНДР) промышленные реакторы для наработки оружейного плутония остановлены и подлежат выводу из эксплуатации.

Вывод из эксплуатации уран-графитовых реакторов связан с необходимостью решения вопроса по обращению с облученным реакторным графитом. Решение вопроса по окончательному обращению с реакторным графитом, то есть по его захоронению, осложняется как наличием в составе графитовых изделий долгоживущих радионуклидов (это, прежде всего, углерод-14 и хлор-36), так и значительными количествами реакторного графита. По разным оценкам, суммарное количество облученного реакторного графита в России может достигать 50-60 тысяч тонн (260 тысяч тонн в мире).

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					Лист
			ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ				
Изм.	Коллч.	Лист	№Экз.	Подп.	Дата	14	

Концепция рециркуляции предусматривает прямую утилизацию с оптимизированной по объему упаковкой в хранилище для не генерирующих тепло отходов. Поскольку стоимость утилизации связана с объемом, дальнейшее сокращение объема приведет к значительной экономии.

Использование большого числа хранилищ приведет к некоторым негативным последствиям, концепция использования хранилищ как основного инструмента управления РАО влечет за собой долгосрочные финансовые обязательства, как для нашего нынешнего поколения, так и для будущего поколения, а также обеспечение надлежащего контроля. Если мы примем тот факт, что будущие поколения не извлекли выгоду из первоначального актива, то станет ясно, что это не соответствует нормам этики по отношению к ним. Таким образом, становится ясно, что необходима альтернатива безопасному хранению в хранилищах. Эта альтернатива должна иметь более короткое время обращения, а также важно, чтобы существовала технология раннего экономического извлечения и переработки графита безопасным и радиологически приемлемым способом.

В графите содержится значительное количество радионуклидов от нейтронных реакций, как в самом графите, так и в содержащихся в нем примесях. Содержащиеся радиоизотопы удобно разделить на две группы. Короткоживущие изотопы (такие как  $^{60}\text{Co}$ ) усложняют обращение с графитом сразу после остановки реактора, но распадаются через несколько десятков лет. Долгоживущие изотопы (главным образом,  $^{14}\text{C}$  который имеет период полураспада 5730 лет [1]) имеют большое значение из-за возможности их выброса в биосферу. Переработка графита позволяет отделить большую часть графитовой массы (углерода) от недолговечных радиоизотопов. Это, в свою очередь, облегчает утилизацию графитовых отходов вскоре после окончания срока службы реактора.

Инв. № подл.

Подп. и дата

Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата

# 1 Обзор литературы

Основная проблема вывода из эксплуатации ядерных установок с уран-графитовым реактором (УГР) связана с выбором оптимальных методов обращения с большими объемами отработавшего графита, который занимает особое место при обращении с накопленными радиоактивными отходами (РАО). Весь отработавший облученный и радиоактивно-загрязненный графит, получаемый в результате демонтажа УГР можно разделить на две основные группы:

- Конструкционный графит, из которого выполнена кладка реактора;
- Графит, образующийся в ходе ремонтов и ликвидации инцидентов и аварий на реакторах.

После длительного облучения в реакторе графит не приобретает никаких полезных свойств. Учитывая удельную активность облученного графита (~1 ГБк/кг) [2], его относят к категории твёрдых РАО среднего или высокого уровня активности.

Облученный реакторный графит обладает следующими специфическими свойствами [3]:

- Специфичной кристаллической структурой и пористостью, которые обусловлены облучением нейтронов и определяют его физические свойства;
- Незаменимостью графитовой кладки в течение всего срока эксплуатации активной зоны УГР, и, как следствие, наибольшим из всех РАО набранным флюенсом нейтронов;
- Неравномерностью загрязнения кладки как по величине, так и изотопному составу и отдельных графитовых деталей;

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата



- Загрязненностью кладки долгоживущими биологически значимыми радионуклидами  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , которые химически более активны и могут замещать в живых организмах стабильные изотопы  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{39}\text{K}$ , тем самым создавая дополнительное внутреннее облучение;
- Дополнительным вкладом в активность графита таких радионуклидов, как  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и др., возникшим в результате аварий и попадания в него фрагментов ядерного топлива;
- Пожароопасностью графита и взрывоопасностью графитовой пыли;
- Высокой удельной теплотой сгорания ( $\sim 8$  ккал/г) и температурой воспламенения  $\sim 700^\circ\text{C}$ ;
- Наличием накопленной «энергии Вигнера», образующейся при облучении нейтронами кристаллической решетки, которая деформируется, приобретая более высокую потенциальную энергию. Количество накопленной энергии зависит от потока нейтронов, времени облучения и температуры. Максимальное количество накопленной энергии может достигать  $\sim 2.700$  Дж/г, что при одновременном высвобождении теоретически может привести к повышению температуры примерно на  $1\ 500^\circ\text{C}$ ;
- Выделением из кладки радиоактивных и токсичных газов, таких как  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^3\text{H}$ .

Вышеперечисленные свойства ОРГ требуют при выводе из эксплуатации комплексного планирования и реализации нескольких взаимосвязанных операций для надежной изоляции от живых систем.

В настоящее время суммарное количество накопленного ОРГ в мире  $\sim 260$  тысяч тонн [3]. Из них порядка 60 тысяч тонн – в РФ [4], методы обращения с которым еще не определены. Поэтому проблема эффективной экологической

Инв. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эак.	Подп.	Дата

гически безопасной утилизации облученного реакторного графита является общемировой.

### 1.1 Объект исследования

В графите атомы углерода  $sp^2$ -гибридизованы. Три электрона гибридной орбиты  $sp^2$  образуют три ковалентные  $\sigma$ -связи. А четвертый негибридизованный  $\pi$ -электрон остается плавающим и создает квазиметаллическую связь между плоскостями гексагонального слоя. Когезия (связь между одинаковыми молекулами) между плоскостями слоя обусловлена слабыми ван-дер-ваальсовыми силами [7].

Взаимно неупорядоченные углеродные слои имеют связь только ван-дер-ваальсовой связью. Только при идеальном сформировании графитовой решетки, то есть параллельное упорядоченное расположение слоев друг к другу ведет к свободной подвижности  $\pi$ -электронов в качестве носителей металлической проводимости [8]. С повышением температуры электрическое сопротивление графита возрастает в направлениях  $a$ ,  $b$ . Это явление возникает из-за уменьшения средней длины свободной волны электронов. В вертикальном направлении наблюдается некоторое снижение электрического сопротивления с повышением температуры.

Последовательность упорядочивания слоев гексагонального (альфа) и ромбоэдрического (бета) графита может быть характеризовано последовательностью АВАВ или АВСАВС. Кристаллическая структура графита показана на рисунке 1.

Расстояние между двумя углеродными соседними слоями составляет 0,335 нм. и может изменяться в зависимости от степени графитизации. В турбостатической микроструктуре расстояние между слоями составляет 0,344 нм. Различные плоскости слоя могут быть скручены, смещены или наклонены во-

Инв. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эок.	Подп.	Дата

круг оси с в произвольном направлении, в то время как положение связи С-С-связей внутри углеродного кольца 0,142 нм. остается постоянным [6].

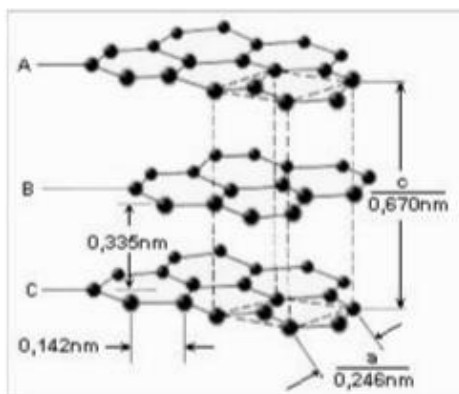


Рисунок 1 – Кристаллическая решетка альфа-графита [7]

В гексагональном графите третий слой расположен выше первого, а в ромбоэдрическом только слой номер четыре находится выше первого. Ромбоэдрическая модификация может быть произведена, например механическим напряжением (например, фрезерование шарика в течение короткого времени). Во время обработки под высокой температурой выше 2000°C ромбоэдрическая форма полностью превращается в гексагональную, т.е. что гексагональная модификация является более стабильной формой графита при нормальных условиях [9].

## 1.2 Образование $^{14}\text{C}$

Изотоп углерода  $^{14}\text{C}$  является слабым  $\beta$ -излучателем с максимальной энергией 0,156 МэВ и периодом полураспада 5700 лет.

Изотоп углерода  $^{14}\text{C}$  может быть образован нейтронными реакциями активации изотопов  $^{14}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C}$  и  $^{17}\text{O}$ . Скорости производства  $^{14}\text{C}$  сильно зависят от предполагаемого загрязнения азотом. В таблице 1 [7] перечислены реакции образования  $^{14}\text{C}$ .

Сечения  $\sigma$  относятся к тепловым нейтронам со скоростью 2200 м/с или энергией нейтронов 0,0253 эВ [10].

Инв. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата

Для расчета активации предполагались объем графита 1 см<sup>3</sup>, поток нейтронов 5 • 10<sup>13</sup> Н/см<sup>2</sup> и время облучения один год. Основная часть <sup>14</sup>С возникает в результате реакции <sup>14</sup>N. Высокая активность 104 Бк/см<sup>3</sup> обусловлена большим поперечным сечением.

Таблица 1 – реакции активации <sup>14</sup>С[7]

Реакция	Изотопное изобилие [%]	Массовая доля в графите [1 • 10 <sup>-6</sup> ] (* допущение)	Сечение σ [барн]	Активность [Бк]
<sup>14</sup> N(n,p) <sup>14</sup> С	99,63	30	σ(n,p)1,81	2,56•10 <sup>4</sup>
<sup>13</sup> С(n,γ) <sup>14</sup> С	1,1	11100	σ 0,0009	5,06•10 <sup>3</sup>
<sup>17</sup> О(n,α) <sup>14</sup> С	0,04	> 30*	σ(n,α)0,235	> 2,73•10 <sup>3</sup>

Из-за высокой температуры многие примеси воздействуют на графит и металлические детали реактора, вызывающие коррозию, к охлаждающему газовому гелию должны предъявляться требования высокой чистоты. Основными неактивными газообразными загрязнителями являются Н<sub>2</sub>О, Н<sub>2</sub>, СО, СО<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> и аргон. Элементарный кислород не был обнаружен, поскольку он реагирует с графитом при температуре выше примерно 250 °С [11].

Азот также присутствует в виде примеси в теле графита. Он занимает вакансии в кристаллической решетке или присутствует в газообразной форме в порах связующего материала. В зависимости от типа реактора графит содержит разные концентрации азота, обычно они колеблются от 10 до 100 частей на миллион [12].

Поскольку активация <sup>14</sup>N является ключевым источником образования <sup>14</sup>С, уменьшение загрязнения азотом в материалах реактора было бы возможностью уменьшить запасы радиоактивного углерода. Основная масса азота поступает из воздуха и поглощается на поверхности во время хранения графита или в виде воздуха, заполняющего часть пор. Поэтому реакторные графиты,

Инв. № подл. Подп. и дата. Взам инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата
------	--------	------	--------	-------	------

которые будут использоваться при изготовлении после процесса графитизации, должны быть подвергнуты дополнительной стадии очистки газа при 2500 °С. В этом случае путем газирования графита газообразным галогеном содержание азота в воздухе, заполняющем весь объем пор, может быть в значительной степени устранено [12].

### 1.3 Механизм образования трития ( $^3\text{H}$ )

Тритий является радиоактивным изотопом водорода, образующимся в ядерном реакторе в результате ядерного расщепления  $^{235}\text{U}$  ( $n, f$ )  $^3\text{H}$  и взаимодействия легких элементов, таких как  $^3\text{He}$ ,  $^6,7\text{Li}$   $^{9,10}\text{B}$ , с нейтронами [7]. Таблица 2 суммирует наиболее важные реакции для образования трития [7].

Таблица 2 – Реакции активации трития [7]

Реакция	Изотопное изобилие [%]	Массовая доля в графите [ $1 \cdot 10^{-6}$ ] (* допущение)	Сечение $\sigma$ [барн]	Активность [Бк]
$^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$	7,5	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$\sigma(n, \alpha)940$	$2,06 \cdot 10^6$
$^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$	0,00013	$> 2,0 \cdot 10^{-6}$ *	$\sigma(n,p)5327$	
$^{10}\text{B}(n,2\alpha)^3\text{H}$	20	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$\sigma(n, 2\alpha)3836$	$5,05 \cdot 10^6$

В высокотемпературных реакторах, помимо реакций расщепления, важную роль играет реакция  $^6\text{Li}$  ( $n, \alpha$ )  $^3\text{H}$  с присутствием лития в качестве примеси в матричном графите топливных элементов, в графите замедлителя и в графите отражателя. Литий локализован на базовых поверхностях. Поэтому выработка  $^3\text{H}$  из  $^6\text{Li}$  определяется загрязнением графита (от 0,007 до 0,25 ч/млн.) и топлива (33 ч/млн.) литием и дозой тепловых нейтронов [7]. Содержание гелия ( $^3\text{He}$ ) в охлаждающем газе способствует образованию трития по реакции ( $n, p$ )  $^3\text{H}$  [7]. Содержание трития в делении зависит от материала деления и нейтронного спектра.

Инв. № подл. Подп. и дата. Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата
------	--------	------	--------	-------	------

## 1.4 Транспортные процессы в графитовом теле

### 1.4.1 Диффузия

Барьерная система частиц топлива и графитовая матрица должны быть предотвращены [13], чтобы радиоактивные продукты деления или продукты активации попадали в контур охлаждения, и происходило загрязнение.

Диффузия через графит и матрицу сборки топлива важна для продуктов деления, которые не полностью удерживаются в слоях оболочки частиц топлива [7]. Продукты деления, такие как:  $^{134,137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{110}\text{Ag}$ , в основном ответственны за загрязнение первичного контура НТР.

Если продукты деления попадают в окружающую графитовую матрицу, то примесь определяется их диффузионным поведением в графите. На диффузионные процессы в теле графита влияют физико-химические процессы. Могут происходить процессы адсорбции и десорбции, которые препятствуют или способствуют переносу массы. Влияние таких процессов на диффузию зависит от транспортируемых элементов и структурной природы графитового компонента, который может быть различным в разных местах микроструктуры [7].

В зависимости от того, происходит ли диффузионный процесс в кристаллической решетке или вдоль границ раздела, это называется объемной диффузией или межфазной диффузией. Межфазная диффузия различает диффузию по границам зерен (вдоль двух соседних кристаллов) и поверхностную диффузию (на внешней или внутренней поверхностях). Объемная диффузия описывает атомные движения в твердом теле. Миграция ядер, происходит из-за дефектов кристаллической решетки (вакансий) [14].

Эти дефекты, возникающие в кристаллической решетке, также могут влиять на свойства графитового материала и, следовательно, на ход реакций.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №								Лист
Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата	ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ				22

Бесперебойная диффузия описывается первым законом Фика:

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (1)$$

Согласно первому закону Фика, плотность тока частиц (поток)  $J$  (моль  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ ) пропорциональна локальному градиенту концентрации, противоположному направлению диффузии  $\partial c / \partial x$  (моль  $\text{м}^{-4}$ ). Константа пропорциональности представляет собой коэффициент диффузии  $D$  ( $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$ ). Количественная зависимость между коэффициентами диффузии и температурой описывается уравнением Аррениуса:

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

где  $E_a$  – энергия активации диффузии;

$R$  – газовая постоянная, 8,314 Дж / моль К;

$T$  – абсолютная температура, К;

$D_0$  – константа диффузии.

Энергия активации ( $E_a$ ) должна использоваться так, чтобы рассеивающий атом мог преодолеть потенциальный барьер между двумя узлами решетки [7].

### 1.4.2 Сорбция

Атомы решетки, расположенные на поверхности твердого тела, взаимодействуют только с одной стороны с соседними атомами. Он не производит насыщенных валентностей, которые позволяют связывать посторонние атомы на поверхности. Этот поверхностный эффект называется адсорбцией. Если посторонние атомы дополнительно проникают в объем твердого тела, это называется поглощением [7]. Сорбция включает в себя оба процесса. Тип сил, вызывающих поглощение, отличается. В целом различают два процесса: физическую сорбцию и хемосорбцию. Физическая сорбция относится к процессу, который приводит к слабой адгезии к взаимодействию неактивных газообразных атомов на адсорбирующей поверхности. Действие активных газооб-

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№Эок.		
							23	

разных атомов на адсорбирующую поверхность может привести к образованию химических связей на поверхности. Этот процесс называется хемосорбцией [7].

## 1.5 Существующая проблема

Существует два типа захоронения: приповерхностный и глубинный. При выборе типа захоронения – приповерхностный или глубинный – определяющим является содержание долгоживущих радионуклидов в графите. При этом захоронение графита в глубоких геологических формациях – это наиболее затратный вариант.

Таким образом, уменьшение объемов долгоживущих радионуклидов в реакторном графите путем его дезактивации приведет к существенной экономии средств, направляемых на решение проблемы обращения с радиоактивными отходами.

## 1.6 Способы утилизации и переработки радиоактивного графита

Существующие технологии переработки ядерных графитовых отходов в большинстве своем основаны на изоляции радиоактивного графита от окружающей среды. Однако они не способны обеспечить значительное уменьшение объема, поэтому уменьшение объема существующих отходов играет важную роль. Сжигание обеспечивает способ отделения изотопов, таких как  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$  [11], от графитовой матрицы, так как радиоактивные элементы невозможно уничтожить сжиганием. Они либо остаются с негорючей частью отходов, либо испаряются в зависимости от степени их летучести. 90-95% радиоактивности содержится в  $^{14}\text{C}$  [12], который составляет 1-2% от массы облученного реакторного графита. Поэтому, хотя сжигание рассматривается как эффективное средство комплексной обработки и удаления графитовых отходов атомной промышленности, приемлемость выбросов радиоактивных элементов для со-

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №							Лист
			ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ						
Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата			24	



хранения окружающей среды является основным критерием успешного развития процесса сжигания. Сжигание графита обеспечивает значительное сокращение объема отходов. Объем конечных отходов сокращается в 70-100 раз, что значительно увеличивает в них содержание ядерных материалов и побуждает оценивать возможность возникновения самоподдерживающейся цепной реакции деления.

Целью обработки облученного графита является облегчение его последующей утилизации или уменьшение воздействия на окружающую среду выбранного способа утилизации. Термическая обработка, химическая обработка, иммобилизация и газификация - основные потенциальные методы обработки облученного графита.

### 1.7 Обзор компаний по обращению с ядерными отходами

Studsvik, Inc. – компания по обращению с ядерными отходами и их переработке, организованная для обслуживания ядерных энергетических и государственных объектов США. Руководство и технический персонал Studsvik имеют богатый опыт в переработке жидких, жидких растворов и твердых низкоактивных радиоактивных отходов (ЖРО). Используются следующие основные технологии: пиролиз, паровой риформинг, стеклование, термическая обработка, сжигание, системы контроля отходящих газов, ионный обмен, обратный осмос, разделение мембран, затвердевание, плавление металла, испарение, транспортировка, упаковка и захоронение широкого спектра ЖРО.

Studsvik, Inc. является дочерней компанией Studsvik Holding AB, шведской компании по обслуживанию и утилизации отходов, расположенной к югу от Стокгольма, Швеция.

Bradtec - британская компания, специализирующаяся на дезактивации и утилизации отходов.

Инв. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата

Компания Studsvik, Inc. завершила строительство, пусковые испытания и начала коммерческую эксплуатацию установки по переработке низкоактивных радиоактивных отходов (LLRW) в Эрвине, штат Теннесси, США. Обрабатывающая установка Studsvik (SPF) имеет возможность безопасно и эффективно принимать и обрабатывать широкий спектр потоков твердых и жидких ЖРО, включая: ионообменные смолы (IER), древесный уголь, графит, шлам, масла, растворители и моющие растворы с контактом уровни излучения до 2,0 Зв/ч (200 р/ч). Лицензированный и сильно экранированный SPF может принимать и перерабатывать более 10 тонн ЖРО в день, включая жидкие и твердые ЖРО с высоким содержанием воды и/или органических веществ.

SPF использует запатентованный процесс термического органического восстановления (THOR SM) [15], разработанный Studsvik, Inc., в котором используется технология пиролиза/парового риформинга. THOR SM надежно и безопасно обрабатывает широкий спектр ЖРО в уникальной системе обработки с псевдооживленным слоем при умеренной температуре и пиролизе. Технология THOR SM подходит для переработки опасных, смешанных и сухих активных ЖРО с соответствующими модификациями лицензирования и подачи отходов.

Операции продемонстрировали последовательные, надежные рабочие характеристики с сокращением объема до 80:1 и снижением веса до 100:1 при переработке ионообменных смол с обедненным смешанным слоем, содержащих более 99,9% всех нелетучих радионуклидов в отходах, включены в конечный твердый остаток продукта. Конечный преобразованный остаток содержит недиспергируемое гранулированное твердое вещество, пригодное для длительного хранения или непосредственного захоронения в подходящем контейнере. THOR SM эффективно преобразует шестивалентный хром в неопасный трехвалентный хром и может разрушать или преобразовывать нитраты в азот с эффективностью более 99% за один проход.

Инв. № подл.	
Подп. и дата	
Взам инв. №	

Изм.	Коллч.	Лист	№Эок.	Подп.	Дата

## 1.8. Методы очистки и переработки радиоактивного графита

По большому счету, большинство радиоизотопов можно удалить методами очистки, применяемыми при производстве ядерного графита. Но из-за того же химического поведения, что и  $^{12}\text{C}$ , это не применимо к  $^{14}\text{C}$  [16]. Наибольшую озабоченность при долгосрочном удалении облученного графита вызывает  $^{14}\text{C}$  [17]. Облученный графит не может храниться в наземных помещениях для захоронения отходов из-за длительного периода полураспада [16]. Сжигание ядерного графита может быть эффективным методом уменьшения объема, но не будет принято общественностью, пока весь  $^{14}\text{C}$  выбрасывался в атмосферу в форме  $\text{CO}_2$  [16].

Целью обработки облученного графита является облегчение его последующей утилизации или уменьшение воздействия на окружающую среду выбранного способа утилизации. Термическая обработка, химическая обработка, иммобилизация и газификация - основные потенциальные методы обработки облученного графита.

### 1.8.1 Утилизация после иммобилизации в инертной матрице

Для каждого объекта по захоронению будет применяться ряд общих критериев независимо от типа отходов, например, размер и вес контейнера; мощность дозы облучения поверхности упаковки; теплоотдача и поверхностное загрязнение; и выброс радиоактивности упаковки при нормальных и аварийных условиях обращения, транспортировки и захоронения. Кроме того, для графитовых отходов существует ряд специфических свойств материала, которые необходимо учитывать при разработке вариантов упаковки.

Целью кондиционирования является производство подходящих упаковок для непосредственного захоронения. Может быть использован широкий спектр возможных матриц цемент, полимер-модифицированный цемент, полимер, битум, стекло, металл с низкой температурой плавления, а также керамика [18]. Основной процесс, состоит в предварительном смешивании це-

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №							Лист
			ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ						
Изм.	Коллч.	Лист	№Экз.	Подп.	Дата				27

ментного раствора в неактивной зоне с последующим переносом раствора в ёмкость, содержащую отходы. Затем ёмкость транспортируется в хранилище.

В РФ был предложен интересный простой метод захоронения графита, загрязненного ураном и актинидами, известный как процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [19]. После размола графита добавляются порошки Al и оксиды Y, Ce, Ti; затем, после некоторого начального нагрева, в герметичных стальных контейнерах производится самораспространяющийся высокотемпературный синтез. Этот процесс аналогичен процессу алюминотермии. Реакция соответствует следующему уравнению:  $3C + 4Al + 3TiO_2 = 2Al_2O_3 + 3TiC$

Плотность полученного продукта составляет 2-4 г/см<sup>3</sup>. При высокотемпературном синтезе атомы Y могут быть замещены атомами урана и актинидов. Продукт представляет собой стабильный карбидно-оксидный композиционный материал, готовый к утилизации. <sup>14</sup>C также успешно изолируется. Эта технология, как утверждается, является полностью экологически безопасной.

### 1.8.2 Утилизация после покрытия и пропитки

Целью нанесения защитных покрытий и пропитки является дезактивация радиоактивных отходов или их защита от воздействия окружающей среды, например, от окисляющих газов или влаги. Пропиточные материалы могут включать ультратонкий шпатлевку, битум, полимеры и модифицированные полимеры [20]. По сравнению с иммобилизацией нанесение защитных покрытий и пропитка оставляют возможность для дальнейшей обработки, такой как сжигание.

Инв. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	

Изм.	Коллч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

### 1.8.3 Сжигание

Для типичного процесса сжигания отношение графита к золе составляет приблизительно 160 [21], поэтому общий объем материала, подлежащего захоронению путем иммобилизации, консервирования и захоронения, будет значительно меньше по сравнению с исходным графитом, хотя этот материал будет иметь более высокую категорию отходов. Чтобы избежать выброса несконденсированного радиоактивного газа, необходимо оснастить систему сжигания графита эффективной системой фильтрации, состоящей из фильтра предварительной очистки, фильтра обратной промывки и высокоэффективный фильтр очистки воздуха для улавливания всех радиоактивных частиц и аэрозолей. При загрязнении  $^{36}\text{Cl}$  система сжигания должна быть также оснащена мокрым скруббером для нейтрализации образовавшейся соляной кислоты и устранения выброса хлора в несконденсированный газ. Для удержания некоторых других газообразных загрязнителей (например,  $\text{NO}_x$ ) следует использовать дополнительную систему фильтрации. Радионуклид  $^{14}\text{C}$  будет сбрасываться в окружающую среду вместе с несконденсированным газом.

Перспектива сжигания графитовых отходов ставит четыре основных вопроса:

1. Трудность сжигания графита, особенно очень чистой формы, используемой в ядерных целях;
2. Выброс радиоактивных газов, особенно  $\text{C-14}$ ,  $\text{Cl-36}$  и остаточных  $\text{H-3}$ ;
3. Переработка и захоронение остаточной золы, в которой сконцентрированы другие радиоактивные изотопы;
4. Графит должен быть измельчен на мелкие кусочки до сжигания. Сжигание в печи, сжигание в кипящем слое и сжигание с помощью лазера могут использоваться для сжигания графита.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №							Лист
			ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ						
Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата				29

#### 1.8.4 Паровой риформинг

В работе [22] рассмотрена технология пиролиза и парового риформинга для удаления радионуклидов из облученного графита. При высокотемпературном взаимодействии с паром графитовые фрагменты преобразуются в водород и окись углерода. Газообразные продукты могут в дальнейшем окисляться путем поступления дополнительного кислорода или воздуха для получения неопасных продуктов, углекислого газа и воды. Различные примеси, за исключением  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$  и  $^{129}\text{I}$ , могут собираться на скрубберах и различных фильтрах.

#### 1.8.5 Химическая обработка

Химикат может дезактивировать графит, выборочно удаляя поверхностный слой и разрушая связующий материал. На основании исследований с использованием минеральных кислот, щелочных растворов, растворенных окислителей или комбинаций были выявлены две возможности дезактивации поверхностного слоя графитового материала. Комбинированный раствор разрушает связующий материал и растворяет минимальное количество графита. Более агрессивный подход с использованием электрохимической технологии не только разрушает связующий материал, но и растворяет поверхностный материал графита [23,24].

В работе [25] исследовали возможность использования измельченного графита с микроокислением в качестве наполнителя для получения нового графита. Доказано, что графит из переработанного реактора превосходит по плотности, прочности и теплопроводности. Процесс микроокисления повысил прочность переработанного графита за счет большего количества пор и негладкой поверхности на окисленных частицах графита.

Механизмом, стоящим за удалением  $^{14}\text{C}$ , считается включение в межслойное пространство внутри графитовой структуры. Механизмом выделения  $^3\text{H}$  считается изотопный обмен ионами водорода. Процесс химической обработки может привести к удалению только подвижных и доступных  $^3\text{H}$  и  $^{14}\text{C}$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№Эок.		

до вывода из эксплуатации или помещения в хранилище. И значительная часть радионуклидов все еще остается в составе графита.

Органический растворитель (например, N-Метил-2-пирролидон) был применен для разделения графитовых слоев и извлечения радионуклидов. Для ускорения процесса дезактивации используется ультразвук. Поскольку не происходит ни окисления, ни воздействия кислоты, графен может быть полностью восстановлен. Восстановленный графен может быть использован повторно [26].

### 1.8.6 Термическая обработка

При термической обработке облученного графита можно удалить значительную часть  $^{14}\text{C}$ , которая существовала на поверхности графита. При термической обработке атомы углерода на поверхности графита могут вступить в реакцию с естественно адсорбированными кислородными комплексами для получения газов  $\text{CO}_x$ , т.е. "газифицировать" графит. Этот процесс сильно зависит от наличия адсорбированных соединений кислорода. Количество и форму адсорбированных комплексов кислорода в предварительно и после облучения графита можно исследовать с помощью масс спектрометра на вторичных ионах (ToF-SIMS) и рентгеноспектроскопии (XPS), чтобы лучше понять процесс газификации и оптимизировать процесс обработки [27].

Целью термической обработки является селективное удаление  $^{14}\text{C}$  без окисления основной массы графита [16,26,28]. Термическая обработка облученного графита основана на открытии, что  $^{14}\text{C}$  сконцентрирован на его поверхности, а не в основной кристаллической структуре [29–31]. Исходя из этого, большая часть поверхностного  $^{14}\text{C}$  может быть удалена путем окисления графитовых компонентов.

Термическая обработка включает нагрев графита в инертной атмосфере до достаточно высокой температуры, чтобы химически активные газы на поверхности графита вступили в реакцию с адсорбированными радиоизото-

Инв. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	

Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата

пами или инициировали пиролизные эффекты, разрушающие химические связи. В качестве альтернативы этот процесс может быть выполнен в разбавленных активных газах, таких как кислород, пар, углекислый газ или водород, для удаления более подвижных/летучих загрязняющих веществ, что в результате приводит к удалению отходящего газа, обогащенного  $^{14}\text{C}$  [32–34]. Аргон обычно используется в качестве продувки для удаления выделяемых продуктов или разбавления химически активных газов.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №							ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата		32



## 2 Цели и задачи исследования

На данный момент утилизация радиоактивных отходов (РАО), в том числе радиоактивного графита, является острой задачей в мировой атомной отрасли. При решении этой задачи важны такие факторы, как способы уменьшения масс и объемов радиоактивных отходов, обеспечение безопасности переработки, хранения и транспортировки РАО.

Существует два типа захоронения – приповерхностный и глубинный. При выборе типа захоронения определяющим фактором является содержание долгоживущих радионуклидов в графите. Таким образом, графит, в котором содержится большое количество радионуклидов необходимо захоранивать в глубоких геологических формациях, а это наиболее затратный вариант.

Таким образом, уменьшение объемов отходов реакторного графита достигается при помощи газификации, это приведет к существенной экономии средств, направляемых на решение проблемы обращения с радиоактивными отходами.

Для решения описанной выше проблемы, а именно утилизации радиоактивного графита, можно использовать экспериментальные данные, приведенные в этой работе.

Целью представленного в данной выпускной квалификационной работе исследования является определение изменения массы радиоактивного графита при газификации, а также изучения синтеза порошка карбида циркония на экспериментальной установке.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- Разработать методику проведения экспериментов
- Провести исследования физико-химических характеристик исходных образцов
- Подготовить образцы и выполнить эксперименты;

Инв. № подл.
Подп. и дата
Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата
------	--------	------	--------	-------	------

- На основании полученных в ходе экспериментов данных произвести оценку эффективности данных методов утилизации радиоактивного графита;
- Сделать выводы на основании экспериментальных данных.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№ док.		

### 3 Электродуговая плазменная обработка реакторного графита

#### 3.1 Описание электродуговой плазменной обработки реакторного графита как способа утилизации

Утилизация и обработка радиоактивных отходов является острой задачей в мировой атомной энергетике, в том числе Российской. Утилизация реакторного графита является важной задачей, поэтому разрабатываются различные способы обращения с радиоактивным графитом. Одним из способов обработки радиоактивного вследствие использования в ядерном реакторе графита является электродуговая плазменная обработка реакторного графита.

Радиоактивные отходы низкого уровня, можно обработать системой плавления, которая представляет собой плазменную дугу [35]. Система обработки включает в себя печь для плазменной плавки с графитовым электродом, мусоросжигатель и система очистки выхлопных газов.

Таким образом, ссылаясь на научные статьи [35], [36] можно сделать вывод, что способ обращения с реакторным графитом посредством электродуговой плазменной обработки является приемлемым и имеет большой потенциал.

#### 3.2 Описание установки для электродуговой плазменной обработки реакторного графита

Для осуществления процесса электродуговой плазменной обработки реакторного графита был использован экспериментальный плазмохимический реактор постоянного тока рисунок 2 [37]. В данной установке в качестве источника питания используется выпрямительно-инверторный сварочный трансформатор марки Condor Colt 200 с диапазоном рабочих токов от 20 А до 200 А, с возможностью плавного регулирования. При помощи силовых линий связи к источнику питания подключались графитовые элект-

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					Лист
			ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ				
Изм.	Коллч.	Лист	№Эок.	Подп.	Дата	35	

троды, формирующие разрядный промежуток. Дуговой разряд инициировался кратковременным соприкосновением электродов; рабочие ток и напряжение фиксировались в процессе рабочего цикла посредством измерительного шунта (75 ШСМ-200) и омического делителя напряжения (1:10) [38]. На рисунке 3 показана принципиальная схема экспериментального плазмохимического реактора.



Рисунок 2 – Экспериментальный плазмохимический реактор постоянного тока

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

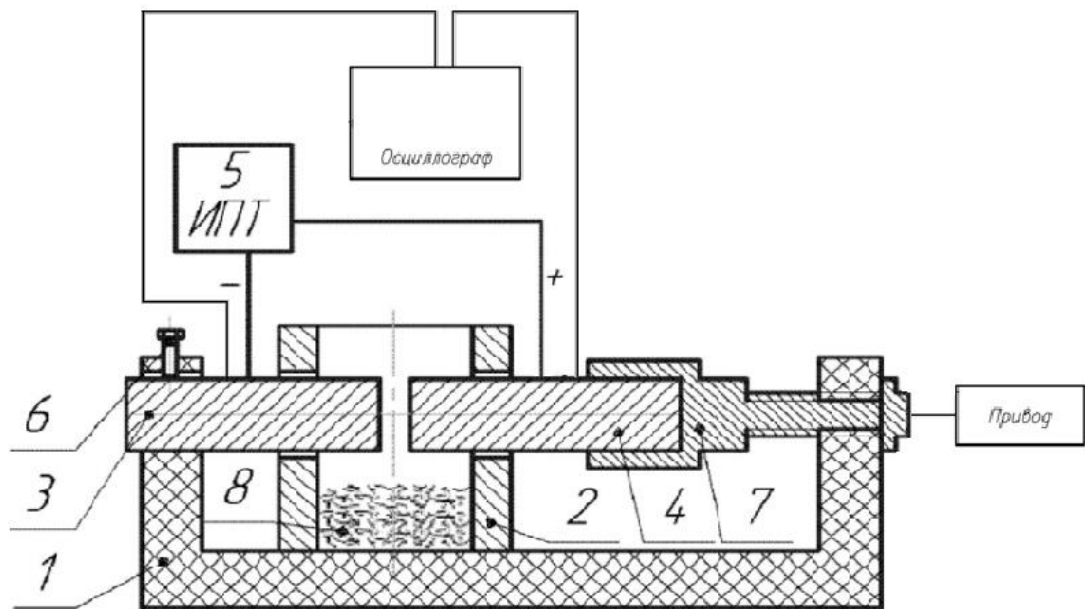


Рисунок 3 – Принципиальная схема экспериментального плазмохимического реактора

- где 1 – Корпус;  
 2 – Графитовый Тигель;  
 3 – Графитовый катод;  
 4 – Графитовый анод;  
 5 – Трансформатор сварочный выпрямительно-инверторный;  
 6 – Болт установочный;  
 7 – Держатель;  
 8 – Порошки углерода и диоксида циркония.

Экспериментальная установка может использоваться для утилизации и повторного использования радиоактивного графита, тем самым уменьшения доли отходов, за счет получения соединений с углеродом и вторичное их использование, а именно может быть использовано для получения порошка на основе карбида циркония из порошков углерода и диоксида циркония, который находит широкое применение в атомной энергетике. Экспериментальная установка состоит из диэлектрического корпуса 1, графитного тигля 2, который закрепляется при помощи прижимных планок, тигель имеет два сквозных

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам инв. №					Лист
Изм.	Коллч.	Лист	№ Эок.	Подп.	Дата	ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	37

отверстия, находящихся на одном уровне, в которые соосно вставлены с одной стороны графитовый цилиндрический катод 3, закрепленный болтом 6, а с другой стороны анод 4, закрепленный в держателе 7, который имеет возможность перемещения по горизонтальной оси рисунок 4. Анод и катод подключены к источнику постоянного тока 5. Под действием постоянного источника тока между катодом и анодом образуется дуговой разряд в разрядном промежутке, инициированный в открытой воздушной среде в полости графитового тигля, в плазме дугового разряда под действием высокой температуры (1900°С) происходит синтез порошка на основе карбида циркония рисунок 5. При достижении заданной температуры напряжение на электродах отключается. Температура измеряется при помощи пирометра. Для стабильности электродугового разряда, сила тока должна быть постоянной. Сила тока на электродах измеряется при помощи датчика силы тока.

Методика исследования процесса газификации включает несколько этапов:

1. Измерение начальной массы образцов;
2. Поместить образцы в тигель, а тигель установить таким образом, чтобы электроды не касались тигля и были расположены соосно относительно друг друга;
3. Включить установку;
4. Подать напряжение на электроды;
5. Инициировать дуговой разряд кратковременным соприкосновением электродов;
6. Поддерживаем дуговой разряд необходимое количество времени, затем реверсируя привод выводим анод в крайнее положение
7. После проведения эксперимента достать образец и измерить конечную массу.

Инв. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эак.	Подп.	Дата



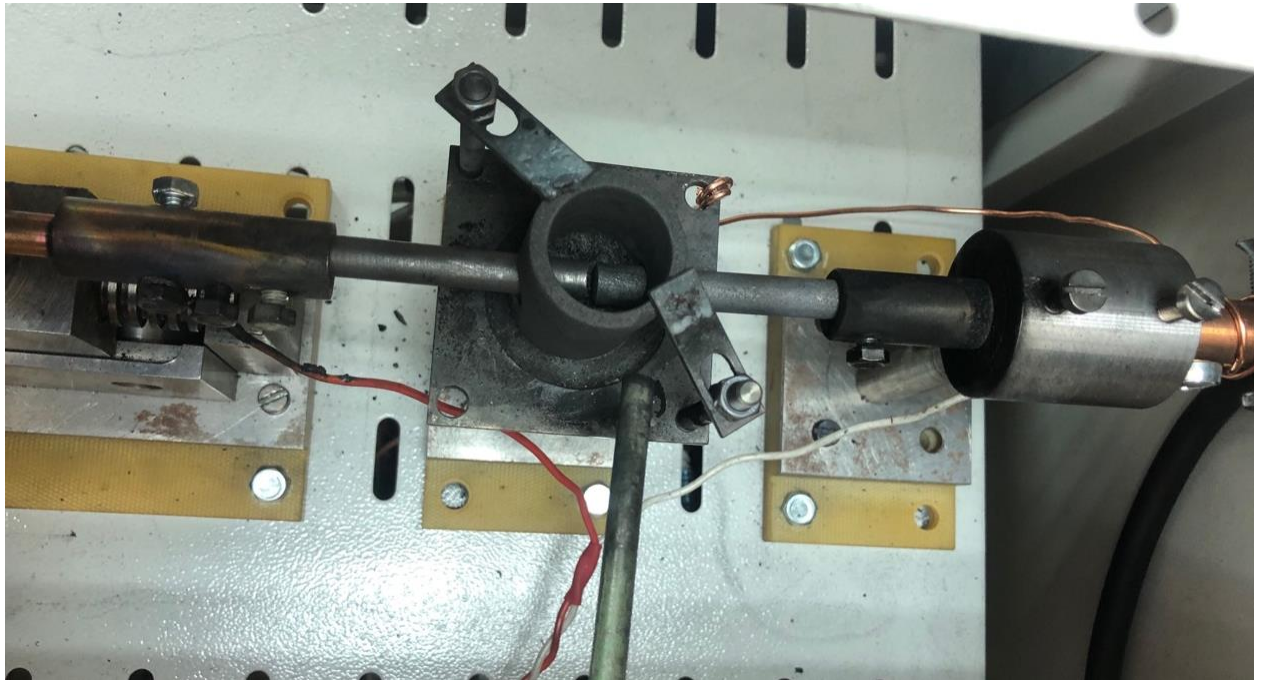


Рисунок 4 – Закрепление тигля и электродов на установке

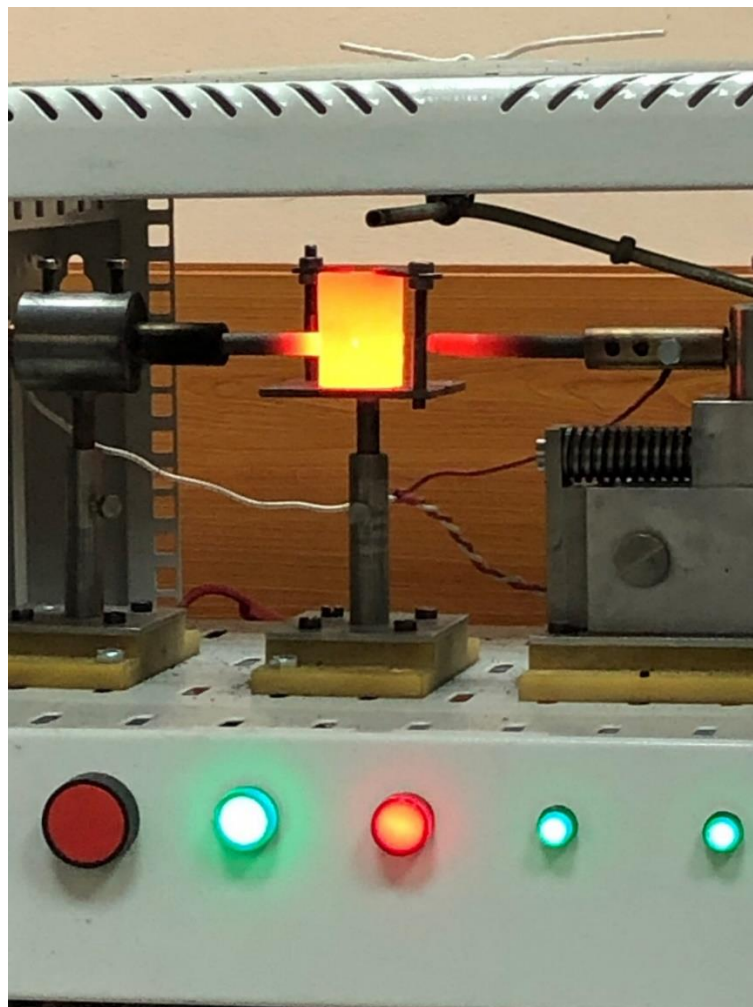


Рисунок 5 – Нагретый электродуговым разрядом тигель

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

### 3.3 Синтез в дуговой плазме порошка ZrC

Благодаря высокой температуре плавления (3550 °с), стабильности твердотельной фазы и низкой скорости испарения карбид циркония (ZrC) является перспективным материалом для потенциальных применений при сверхвысоких температурах [39,40]. Свойства ZrC, в том числе высокая твердость (25 ГПа), износостойкость и низкое нейтронное сечение, делают его полезным для режущего инструмента, износостойких компонентов и материалов активной зоны ядерного реактора [39,41,42].

Несколько методов, в том числе реакция механически активированного Zr и C, твердотельный метод карботермического восстановления и раствор на основе методы, описанные для синтеза порошка ZrC [43-50].

Среди них, благодаря простой обработке и низкой себестоимости производства, карботермическое восстановление ZrO<sub>2</sub> является наиболее распространенным методом синтеза порошка ZrC. Однако для твердотельного карботермического восстановления ZrO<sub>2</sub> требовались высокие температуры и увеличенное время реакции, что приводило к значительному росту частиц [45]. Благодаря уменьшению размера частиц синтез ультрадисперсного порошка ZrC считается средством улучшения механических свойств [51]. Синтезирован мелкодисперсный порошок ZrC путем длительных периодов высокоэнергетического шарового измельчения (20 ч) и карботермического восстановления ZrO<sub>2</sub> и графитового порошка. Полученный порошок ZrC (средний размер 7,53 мкм) состояли из мелких частиц размером около 200 нм [46]. Синтез порошка ZrC с ультрадисперсным, однородным размером частиц и высокой чистотой практически не описан в дошедшей до нас литературе.

По сравнению с обычными методами нагрева, искровая плазма процесс спекания имеет потенциальное преимущество синтеза ультрадисперсного порошка из-за быстрой скорости нагрева/охлаждения, низкой температуры синтеза и короткого времени. Сообщалось, что ток, проходящий через образцы во время процесса, увеличивает скорость образования соединений и уменьшает

Инв. № подл.  
Подп. и дата  
Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата
------	--------	------	--------	-------	------

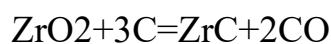


время инкубации для зарождения новых фаз [52]. В нашей предыдущей работе модифицированный процесс спекания использовался для синтеза наноборидных и карбидных порошков [53-55]. Графитовый тигель с двумя боковыми отверстиями был специально разработан для успешного синтеза порошков в дуговой плазме [55].

В настоящей работе рассмотрен процесс синтеза ультрадисперсного порошка карбида циркония методом карботермического восстановления  $ZrO_2$ . Исследованы параметры синтеза, в том числе молярные соотношения  $ZrO_2/C$ , температура синтеза, время выдержки и скорость нагрева. Размер частиц, морфология и охарактеризованы также фазовые составы синтезированных порошков  $ZrC$ .

### 3.4 Уравнение реакции

Составим уравнение реакции, по уравнению реакции найдем соотношение масс порошков, для успешного протекания синтеза карбида бора с минимальными издержками компонентов.



Молярные соотношения  $ZrO_2/C$  относятся как 91,22/36 и равно 3,4. Отсюда подбираем пропорции исходных порошков.

Порошки двуокиси циркония (0,755 грамма) и нано волокнистого углерода (0,248 грамма) с удельной поверхностью 150 м<sup>2</sup>/г протираются через сито с размером ячейки 100 мкм. После этого готовая шихта массой 1,003 граммов рисунок б, засыпается в графитовый тигель. Тигель помещается в установку под электродуговой разряд. Далее включается электропитание печи. Температура нагрева шихты дугой 1900°С, время выдержки при этой температуре 36 секунд.

Инв. № подл. Подп. и дата. Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата



Рисунок 6 – Шихта

### 3.5 Тепловая задача

Чтобы понять достигаем ли мы минимальной температуры для успешного протекания синтеза самих порошков, так как мы не можем мерить температуру в самом тигле, а можем замерить температуру внешней стенки тигля при помощи пирометра, для этого решим тепловую задачу. Используя допущения, выделим элементарную площадку в зоне замера температуры, будем считать нашу выделенную площадку как элементарную пластину[56].

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №							Лист
			ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ						
Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата				42

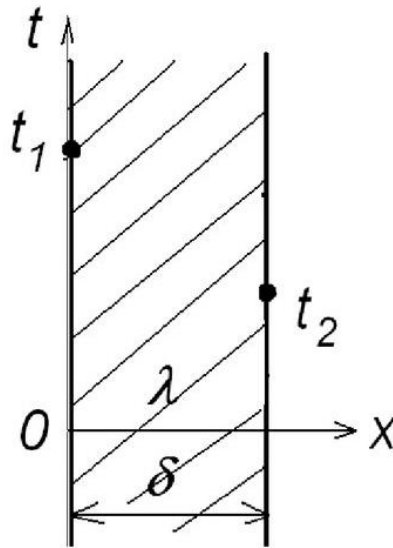


Рисунок 7 – Распределение температуры в элементарной пластине [56]

Найдем температуру  $t_1$ :

$$T(x) = -\left(\frac{q_f}{\lambda}\right)(x - \delta) + T_2; \quad (1)$$

Где  $q_f$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$x$  – координата, на которой ищется температура, м;

$\delta$  – толщина, м.

Тепловой поток найдем по формуле

$$q_f = \frac{N}{S_{\text{поверх}}}; \quad (2)$$

Где  $N$  – мощность, Вт;

$S$  – площадь, м<sup>2</sup>;

$$S_{\text{поверх}} = 2S_{\text{дна}} + S_{\text{боковая}}; \quad (3)$$

Инв. № подл.	Лист и дата	Взам инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.		

Найдем площадь поверхности тигля:

$r=0,009$  м, радиус тигля;

$h=0,025$  м, высота тигля;

$$S_{\text{поверх}} = 2\pi r^2 + 2\pi rh = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,009^2 + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,009 \cdot 0,025 = 0,00192168 \text{ м}^2;$$

Найдем тепловой поток:

где  $N=6$  кВт;

$$q_r = \frac{6000}{0,00192168} = 3122,268 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2};$$

Подставим значения в формулу (1):

Коэффициент теплопроводности примем  $\lambda=40$  Вт/(м·К) для реакторного графита для наших условий. Толщина стенки тигля  $\delta=0,004$  м, температура на внешней стенке тигля  $t_2=1600^\circ\text{C}$ .

$$T(0) = -\left(\frac{3122268}{40}\right)(0 - 0,004) + 1600 = 1912^\circ\text{C};$$

Получаем температуру в точке  $t_1$  равной  $1912^\circ\text{C}$ . Таким образом можно сделать вывод, что минимальная температура внутри тигля превышает температуру, при которой начинается процесс синтеза карбида циркония[57].

### 3.6 Диаграмма состояния

Далее рассмотрим диаграмму состояния Zr-C [58]. Система Zr-C представлена на рисунке 8. Цирконий образует с углеродом карбид ZrC с температурой плавления  $3530^\circ\text{C}$ , плотностью  $6,66$  г/см<sup>3</sup>. Энтальпия образования ZrC равна  $\Delta H_{\text{обр}} = -199,86$  кДж/моль. Изменение энергии Гиббса реак-

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №
Изм.	Коллч.	Лист
№ док.	Подп.	Дата

ции образования карбида циркония  $Zr + C = ZrC$  в зависимости от температуры описывается уравнением

$$\Delta G^0 = -184338 + 9,19T, \text{ Дж/моль.}$$

Зная температуру и процентное содержание углерода можем найти область, в которую попадем на диаграмму в процессе синтеза.

На рисунке 8 видно, что попадаем в область образования  $ZrC+C$ .

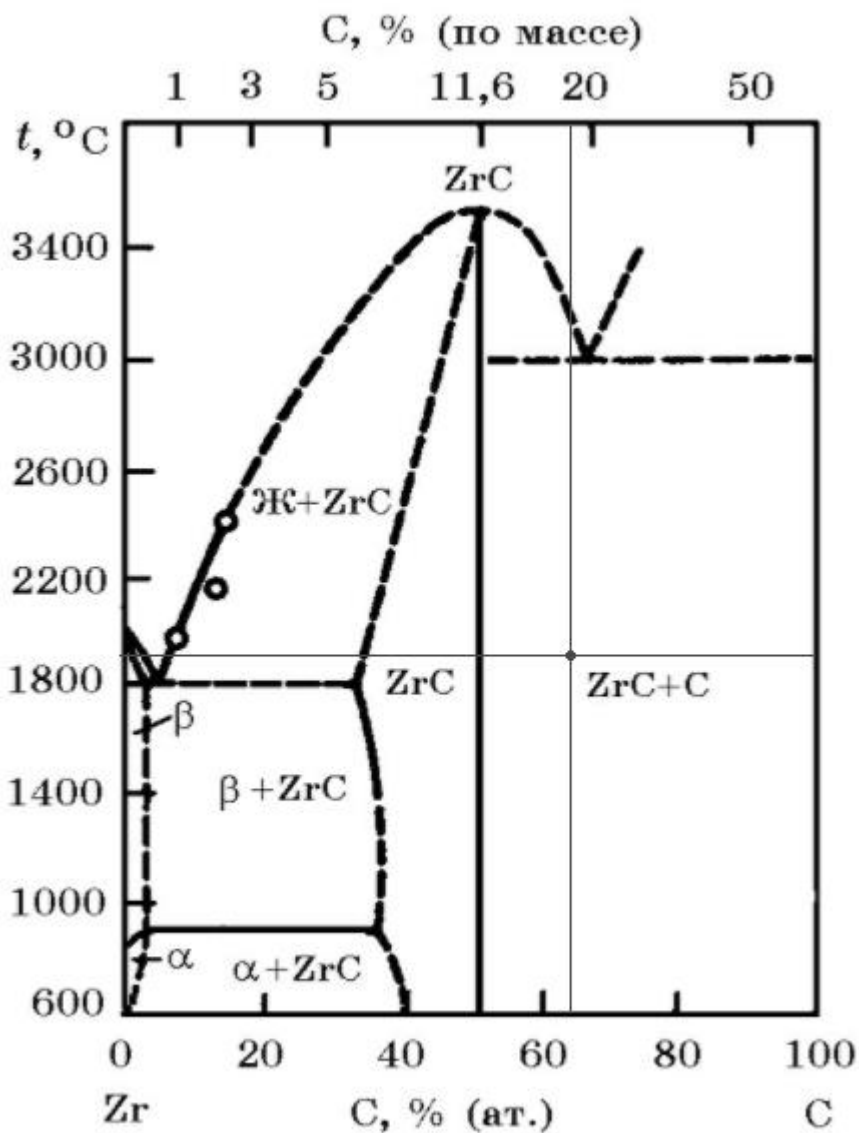


Рисунок 8 –Диаграмма равновесного состояния системы Zr-C [58]

Инв. № подл. Подп. и дата. Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата
------	--------	------	-------	-------	------

### 3.7 Анализ полученного вещества

Полученный материал исследовался методом рентгеновской дифрактометрии на рентгеновском дифрактометре shimadzu xrd-7000s рисунок 9. Методом рентгеновской дифрактографии определяется присутствие определенных кристаллических решёток, кристаллических фаз в материале. Прибор выдает рентгеновскую дифракцию, которую загружаем в программу PowderCell 2.4 для анализа рентгеновских дифрактограмм. Используя эталон из международной базы карбида циркония ZRC\_00\_035\_0784 сравниваем положение дифракционных максимумов на экспериментальной кривой черного цвета с эталонной фиолетового цвета. Видно, что главной кристаллической фазой полученного материала является кубическая модификация карбида циркония, соответствующая эталону. Остальные дифракционные максимумы, не соответствующие эталону, соответствуют различным примесям, в частности оксидам циркония, графиту и другим примесям.



Рисунок 9 –Рентгеновский дифрактометр shimadzu xrd-7000s [59]

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата

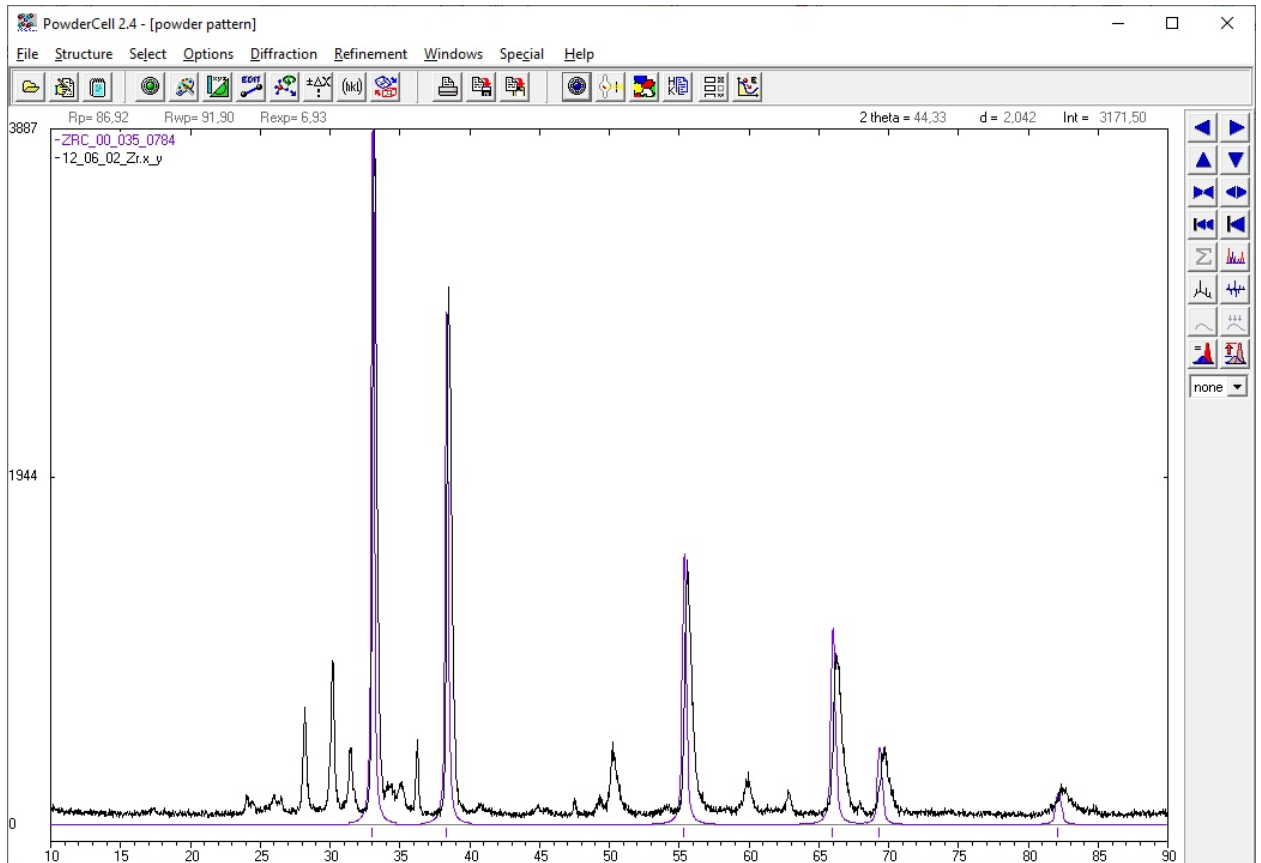


Рисунок 10 –Рентгеновская дифрактограмма

Таким образом по данной картине дифракции можно утверждать, что основной кристаллической фазой продукта синтеза является карбид циркония кубической модификации. А это значит, что технические решения и параметры процесса синтеза были выбраны правильно. Поэтому можно сказать, что метод электродуговой плазменной обработки в открытой воздушной среде с синтезом карбида циркония является весьма перспективным.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№зак.		

## 4 Автоматизация производственных процессов

### 4.1 Описание технологической схемы работы оборудования

В рамках ВКР требуется разработка системы автоматического регулирования параметров работы лабораторного стенда. Экспериментальная установка может использоваться для утилизации и повторного использования радиоактивного графита. Это способствует уменьшению доли отходов за счет получения соединений с углеродом и вторичного их использованию. А именно может быть использовано для получения порошка на основе карбида циркония, который находит широкое применение в атомной энергетике. Экспериментальная установка состоит из диэлектрического корпуса 1, графитного тигля 2, который закрепляется при помощи прижимных планок. Тигель имеет два сквозных отверстия, находящихся на одном уровне, в которые соосно вставлены, с одной стороны, графитовый цилиндрический катод 3, закрепленный болтом 6. С другой стороны, анод 4, закрепленный в держателе 7, который имеет возможность перемещения по горизонтальной оси. Анод и катод подключены к источнику постоянного тока 5. Под действием постоянного источника тока между катодом и анодом образуется дуговой разряд в разрядном промежутке, инициированный в открытой воздушной среде в полости графитового тигля, в плазме дугового разряда под действием высокой температуры ( $1600^{\circ}\text{C}$ ) происходит синтез порошка на основе карбида циркония. При достижении заданной температуры напряжение на электродах отключается. Температура измеряется при помощи пирометра. Для стабильности электродугового разряда, сила тока должна быть постоянной. Сила тока на электродах измеряется при помощи датчика силы тока. Принципиальная схема данной установки приведена на рисунке 11.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №							Лист
			ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ						
Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата				48



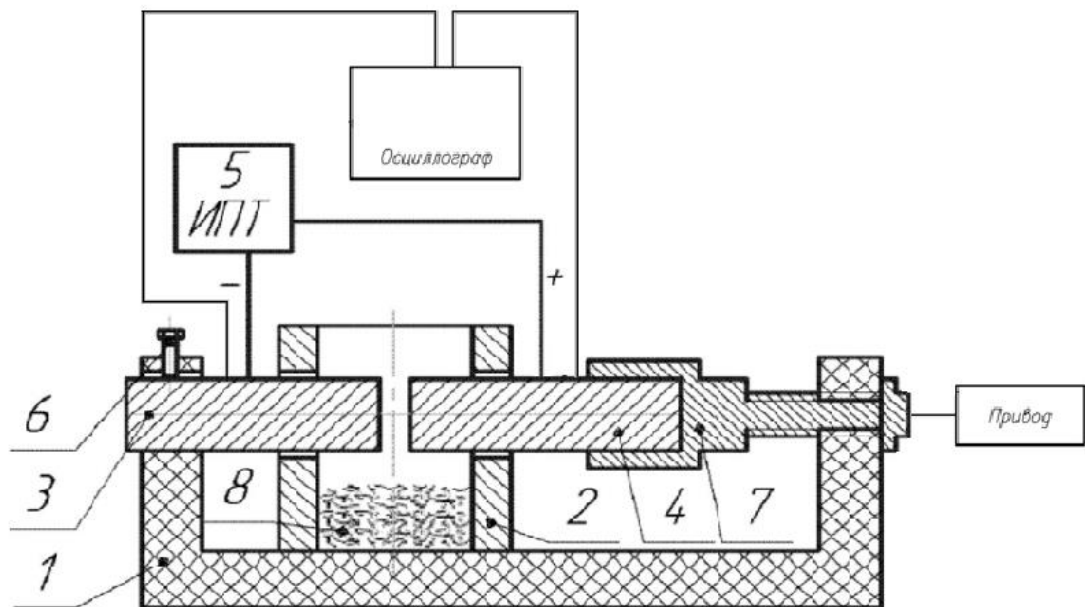


Рисунок 11 – Принципиальная схема установки для исследования газификации графита

#### 4.2 Обзор и выбор принципиальных схем контроля и автоматизации

Система автоматического регулирования состоит из:

- Объекта контроля;
- Измерительных преобразователей температуры;
- Преобразователей силы тока;
- Регуляторов.

Измерение температуры происходит при помощи пирометра, направленного на стенку тигля, а измерение силы тока при помощи датчиков тока перед электродами.

Структурная схема системы автоматического регулирования приведена на рисунке 12.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №
Изм.	Коллч.	Лист
№ док.	Подп.	Дата

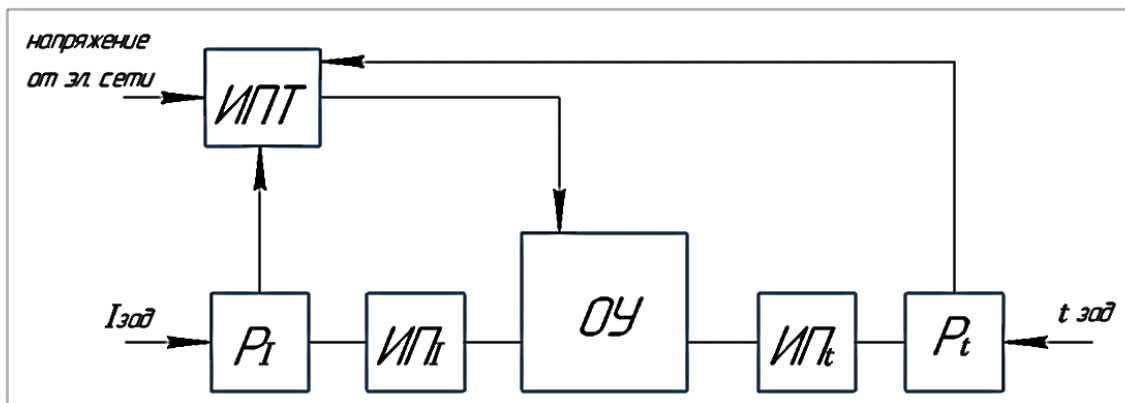


Рисунок 12 – Структурная схема системы автоматического регулирования

Таблица 3 – Условные обозначения рисунка 12.

Обозначение	Наименование
ОУ	Объект управления
$I_{зад}$	Заданное значение электрического тока
$t_{зад}$	Заданное значение температуры
ИП <sub>т</sub>	Измерительный преобразователь электрического тока
ИП <sub>т</sub>	Измерительный преобразователь температуры
Р <sub>т</sub>	Регулятор электрического тока
Р <sub>т</sub>	Регулятор температуры
ИПТ	Источник постоянного тока

Инв. № подл. Подп. и дата. Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата
------	--------	------	-------	-------	------

### 4.3 Выбор технических средств для реализации систем контроля и автоматизации

При выборе первичных измерительных преобразователей следует учитывать ряд факторов метрологического и технологического характера [60]:

- Предел измерения первичного измерительного преобразователя;
- Допускаемая погрешность измерительных устройств;
- Влияние на работу параметра контролируемой и окружающей среды;
- Наличие в месте установки первичного измерительного преобразователя недопустимых для его функционирования магнитных и электрических полей, вибраций и др.;
- Расстояние, на которое должна быть передана информация, полученная с помощью первичного измерительного преобразователя;
- Предельные значения измеряемой величины.

#### 4.3.1 Выбор первичных измерительных преобразователей температуры

Для выбора первичных измерительных преобразователей температуры нужно учитывать предельные значения температуры. В данной экспериментальной установке температура может достигать до 1600-1800°C. Исходя из описанных выше условий в качестве первичного преобразователя температуры используется пирометр Venetech GM1850. Класс допуска 2. Пирометр для измерения температуры направляется непосредственно на тигель. Характеристики пирометра Venetech GM1850 приведены в таблице 4.

Инв. № подл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	

Изм.	Коллч.	Лист	№Эок.	Подп.	Дата

Таблица 4 – Характеристики пирометра Venetech GM1850 [61]

Назначение	Предназначен для бесконтактного, быстрого и чрезвычайно точного измерения температуры поверхностей от 200°C до 1850°C.
Класс допуска	2
Пределы измерений температуры, °C	200 ÷ 1850
Время отклика	500мс
Погрешность	1,5 % или 1,5 °C/°F
Длина волны	900 - 1700 нм
Гарантийный срок эксплуатации	12 месяцев
Завод изготовитель	ООО «Venetech»

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №							Лист
Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата	ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ			52

### 4.3.2 Выбор первичных измерительных преобразователей силы тока

При выборе измерительных преобразователей силы тока необходимо учитывать следующие факторы [60]:

- Предельную рабочую силу тока;
- Характер изменения измеряемой силы тока во времени;

В данной экспериментальной установке рабочая сила тока 200А. Исходя из описанных выше условий, в качестве первичного преобразователя силы тока используется преобразователь измерительный датчик постоянного и переменного тока ПИТ-300-УА-Б14. Предел допускаемой основной приведенной погрешности  $\pm 0,7\%$ . Характеристики преобразователя приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики ПИТ-300-УА-Б14 [60]

Назначение	Предназначен для измерения постоянных, переменных и импульсных токов без разрыва цепи.
Приведенная погрешность	$\pm 0,7\%$
Пределы измеряемых токов, А	0 ÷ 300
Гарантийный срок эксплуатации	24 месяцев
Завод изготовитель	ООО «Лаборатория ДТиН», г. Тверь

Инв. № подл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата

### 4.3.3 Выбор регулирующих и регистрирующих устройств

Регулирующие устройства используются в качестве аналоговых комплексов либо на базе микропроцессорных контроллеров. Возможны три вида микропроцессорных контроллеров: РС-совместимые, модульные, моноблочные.

Основные требования, предъявляемые к контроллерам [60]:

- Технические характеристики контроллера должны соответствовать требованиям проекта;
- Модульность структуры контроллера;
- Соответствие международным стандартам;
- Связь контроллера с верхним уровнем систем управления по интерфейсу Ethernet;
- Наличие у контроллера режима автонастройки параметров регулятора;
- Показатели надежности и экономические показатели.

В качестве прибора, предназначенного для измерения, регистрации и сигнализации температуры выберем измеритель-регулятор микропроцессорный ТРМ101, которые производит промышленная группа «Овен» г. Москва. Прибор предназначен для измерения и автоматического регулирования температуры (при использовании в качестве первичных преобразователей термометров сопротивления или термоэлектрических преобразователей), а также других физических параметров, значение которых первичными преобразователями (датчиками) может быть преобразовано в напряжение постоянного тока или унифицированный электрический сигнал постоянного тока. Информация о любом из измеренных физических параметров может отображаться в цифровом виде на встроенном индикаторе.

Основные технические характеристики представлены в таблице 6.

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата

Таблица 6 – Характеристики ТРМ101 [62]

Входной сигнал	4...20 мА
Выходные сигналы	4...20 мА
Предел допускаемой основной погрешности показаний, %	±0,5
Предел допускаемой основной погрешности регистрации и сигнализации, %	±1,0

#### 4.3.4 Выбор оборудования функциональной схемы

В качестве источника постоянного тока 5 (ИПТ) выберем выпрямительно-инверторный сварочный трансформатор марки Colt Condor 200 с диапазоном рабочих токов 20-200А.

Таблица 7 – Характеристики трансформатора марки Colt Condor 200 [63]

Входной ток	(20-200) А
Напряжение	220 В
Мощность	7500Вт

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№зак.		

## 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является расчет стоимости газификации графита и синтеза карбида циркония, а также оценка перспективности данного метода и самой экспериментальной установки для исследования газификации графита и синтеза карбида циркония, также целью является провести анализ конкурирующих разработок.

В атомной энергетической отрасли остро стоит вопрос по обращению с РАО, в частности с отработавшим радиоактивным графитом. Обращение с РАО является очень важной проблемой в данный момент, так как РАО внушают страх и недоверие к атомной энергетике, что в свою очередь затормаживает развитие технологий в данной сфере. Это означает, что методика по сокращению массы и объема радиоактивного графита является востребованной. Поэтому наиболее перспективным решением проблемы, связанной с радиоактивным графитом, является его газификация и так же непосредственное направление части отходов на вторичное использование.

### 5.1 Планирование работ

Данный проект выполнялся кафедрой АТЭС. Руководителем проекта является доцент кафедры АТЭС. Ассистент выполняет основные расчетные, подготовительные и экспериментальные работы. Рабочий день составляет 6 часов.

Оклад, который получает доцента кафедры АТЭС составляет 27600 рублей в месяц, а ассистента 17850 рублей в месяц.

Данные по продолжительности каждой работы внесены в таблицу в приложении А. Таким образом, на выполнение всех работ потрачено 33 рабочих дня.

Инв. № табл.	Взам инв. №
Подп. и дата	
Инв. № табл.	

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата



## 5.2 Затраты на проект

Затраты на проект состоят из стоимости материально-технических ресурсов, амортизации оборудования, затрат на заработную плату сотрудников и социальные отчисления.

### 5.2.1 Смета на комплектующие для экспериментальной установки и необходимые материалы

На основании цен из каталогов предприятий-изготовителей (поставщиков) таких как ООО “БВБ-Альянс-Новосибирск” и СНАБТЕХМЕТ, а также мониторинга рыночных цен, составлена смета на материалы для нашей экспериментальной установки. Данная смета представлена в виде таблицы в приложении А.

Основываясь на исходные данные таблицы в приложении Б, стоимость необходимых материалов для проведения эксперимента составила 20060 рублей. Далее вычислим расходы с учетом транспортных и заготовительных работ. Для этого мы будем использовать коэффициент транспортно-заготовительных расходов  $K_3=1,15$ .

Расходы с учетом транспортных и заготовительных работ:

$$M = K_3 \cdot I, \text{ руб} \quad (4)$$

Где  $I$  – стоимость необходимых материалов, руб.

$$M = 1,15 \cdot 20060 = 23069 \text{ руб.} \quad (5)$$

### 5.2.2 Затраты на заработную плату

В Вычислим основные расходы на з.п. работников проекта с учетом районного коэффициента, который равен 1,3:

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№Экз.		

$$ЗП_{рук} = 27600 \cdot 1,3 \cdot \frac{9}{6 \cdot 26} = 2070 \text{ руб.} \quad (6)$$

$$ЗП_{ас} = 17850 \cdot 1,3 \cdot \frac{193}{6 \cdot 26} = 28708,7 \text{ руб.} \quad (7)$$

Итоги фонда основной заработной платы:

$$ЗП_{осн} = ЗП_{рук} + ЗП_{ас} = 2070 + 28708,7 = 30778,7 \text{ руб.} \quad (8)$$

Вычислим полные расходы, идущие на оплату труда, включающие дополнительные затраты, которые составляют 12% от фонда основной заработной платы:

$$ЗП_{п} = 1,12 \cdot ЗП_{осн} = 1,12 \cdot 30778,7 = 34472,2 \text{ руб.} \quad (9)$$

### 5.2.3 Затраты на социальные отчисления

В Вычислим размер начислений по оплате труда

$$ВнФ = (ФСС + ПФР + ФФОМС) \cdot ЗП_{п} = 0,3 \cdot 34472,2 = 10341,6 \text{ руб.} \quad (10)$$

где взносы:

- В фонд социального страхования (ФСС=2,9%);
- В фонд пенсионного страхования (ПФР=22%);
- В фонд обязательного медицинского страхования (ФФОМС=5,1%).

Оплата труда с начислениями:

$$ЗП_{н} = ЗП_{п} + ВнФ = 34472,2 + 10341,6 = 44813,8. \quad (11)$$

### 5.2.4 Итоговая стоимость проекта

Накладные расходы принимаем в размере 16% от суммарных расходов.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№зак.		
							58	

Таблица 8 – Смета итоговых расходов

Статья расхода	Стоимость, руб.	%
Необходимые материалы	20060	26,6
Заработная плата	34472,2	45,8
Отчисления на социальные цели	10341,6	13,7
Накладные расходы	10379,8	13,8
Итого	75253,6	100

Таким образом, итоговая стоимость проекта составляет 75253,6 руб. Наиболее затратными являются следующие статьи расходов:

- Необходимые материалы;
- Заработная плата.

## 5.2 SWOT – анализ

В данном подразделе произведен комплексный анализ экспериментальной установки с помощью SWOT-анализа.

Результаты SWOT-анализа представлены в виде таблицы в приложении В.

По результатам проведенной в данном разделе работы можно сделать вывод:

Ввиду сравнительно небольшой итоговой стоимости процесса газификации и отсутствия подобных установок на рынке, данная установка является достаточно конкурентоспособной. Но в ходе SWOT-анализа выявлены некоторые проблемы. По этой причине предлагаются следующие решения для повышения конкурентоспособности спроектированной экспериментальной установки:

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№зак.		

1. Повысить уровень автоматизации и предусмотреть подключение установки к ПК.
2. Снизить стоимость установки и повысить ремонтпригодность постепенным исключением из нее деталей, выполненных на заказ, на имеющиеся номенклатурные изделия.

При внедрении на рынок, данная установка внесет вклад в решение проблем, связанных с обращением с РАО, а также даст толчок к решению проблемы утилизации радиоактивного графита.

Инв. № подл.						ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
							60
Взам. инв. №							
Подп. и дата							
	Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата	

## 6. Социальная ответственность

Целью данной ВКР является проведение экспериментов на установке для изучения процессов газификации графита. Данная экспериментальная установка позволяет наблюдать за процессом газификации графита, получать необходимые данные, исследовать особенности газификации и окисления. Установка представляет собой камеру газификатора работающая под давлением в различных средах, баллоны с газом и нагревательный элемент. Конструкцией установки предусмотрена возможность как газификации, так и процессов окисления. Также в состав оборудования входят: манометр, газоанализатор, компрессор, термопара и мультиметр. Экспериментальная установка находится в лаборатории в 8 корпусе ТПУ.

### 6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Эффективность и безопасность труда возможна только в случае, если производственные условия рабочего места всем требованиям международных стандартов в области охраны труда.

Главная задача по обеспечению безопасных условий трудовой деятельности ложится на администрацию и инженерные кадры предприятий, в обязанности которых входят: выявление, предупреждение, ограничение и устранение опасных и вредных факторов производства; решение вопросов гуманизации оборудования, технологии производства и организация труда; нормализация санитарно-гигиенических норм; улучшение эргономики рабочего места сотрудника и помещений и их санитарно-бытовое обслуживание.

В данной ВКР основным атрибутом рабочего места человека, который проводит эксперимент, является экспериментальный стенд, которые состоит из камеры газификатора, газоанализатора, баллонов с газом и нагревательного оборудования. Основная часть работы проходит в положении стоя.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					Лист
			ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ				
Изм.	Коллч.	Лист	№Экз.	Подп.	Дата	61	

Эффективное выполнение задачи требует соответствующую организацию рабочего места. По данным [75] она включает три основных направления: оснащение, обслуживание и планировка рабочего места.

К оснащению рабочего места относится его укомплектование основным технологическим и вспомогательным оборудованием, технологической и организационной оснасткой в количестве, которое необходимо и достаточно для эффективного и качественного решения поставленной задачи.

К обслуживанию рабочего места относится его регламентированное обеспечение рабочим инструментом и предметом труда, всеми необходимыми видами услуг, в том числе и электрической энергией, в количестве, которое необходимо и достаточно для поддержания непрерывной и заданной интенсивности процесса труда.

К планировке рабочего места относится такое размещение оборудования, элементов оснастки, предметов труда, при котором достигается их оптимальное расположение и досягаемость при выполнении работ.

Удобство рабочей позы, предотвращение лишних движений, исключение ненужных перемещений, снижение утомляемости, а, следовательно, сокращение потерь рабочего времени достигается за счет рациональной планировки и эргономичности рабочего места.

Организация рабочих мест в лабораторных помещениях требует выполнения следующих условий:

1. Обеспечение свободного и достаточного для необходимых движений и перемещений пространства;
2. Эффективность естественного и искусственного освещения;
3. Сохранение нормированного микроклимата;
4. Соблюдение норм акустического шума.

Каждый работник имеет право на [76]:

Инв. № подл.  
Подп. и дата  
Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата
------	--------	------	--------	-------	------

1. Рабочее место, которое соответствует всем необходимым требованиям охраны труда;
2. Обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
3. Отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
4. Обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
5. Профессиональную переподготовку за счет средств работодателя в случае ликвидации рабочего места вследствие нарушения требований охраны труда;
6. Внеочередной медицинский осмотр (обследование) в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра (обследования);
7. Компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на тяжелых работах, работах с вредными и (или) опасными условиями труда;

На работах с особо вредными условиями труда предоставляется бесплатно по установленным нормам лечебно-профилактическое питание.

Инв. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	

Изм.	Коллч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

## 6.2 Производственная безопасность

Экспериментальная установка ввиду своей конструкции и специфики использования является объектом, вызывающим вредное или опасное воздействие на человека.

Вредными считаются факторы, оказывающие негативное влияние на самочувствие и работоспособность человека, вызывающие заболевания. Опасными считаются факторы, вызывающие травмы. Факторы по своей природе делятся на четыре группы: физические, химические, биологические и психофизиологические.

Между вредными и опасными производственными факторами наблюдается определенная взаимосвязь. Во многих случаях наличие вредных факторов способствует проявлению опасных факторов — например, чрезмерная влажность в производственном помещении и наличие токопроводящей пыли (вредные факторы) повышают опасность поражения человека электрическим током (опасный фактор).

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №							Лист
			ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ						
Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата				64



## 6.3 Анализ вредных факторов

### 6.3.1 Повышенный уровень шума

Шум является беспорядочным смешением различных по силе и частоте звуков и оказывает негативное влияние на здоровье и психику человека. Длительное воздействие шума может привести к тугоухости или к глухоте, негативно влияет на нервную систему. Невнимательность, подавленное состояние, заторможенность интеллектуальных процессов являются результатом воздействия шума на психику человека. Все это в совокупности влечет за собой снижение производительности труда и работоспособности.

Источниками шума на месте проведения эксперимента является компрессор.

По данным [64] максимально допустимый уровень шума в лабораторных помещениях 75 дБА

Таблица 9 – Допустимый уровень шума в лабораторных помещениях [64]

	Среднегеометрическая частота октавных полос, Гц									Уровень звука, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Лабораторное помещение	103	91	83	77	73	70	68	66	64	75

При разработке установки необходимо принимать меры по снижению шума еще на стадии проектирования, сборки, монтажа и организации рабочего места.

Это достигается за счет:

- Применения средств и методов коллективной защиты [64];
- Применения средств индивидуальной защиты [65].

Коллективная защита осуществляется за счет:

Инв. № подл.  
Подп. и дата  
Взам. инв. №

Изм. Коллч. Лист № Эок. Подп. Дата

ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ

Лист  
65

- Применения звуковой изоляции;
- Совершенствования оборудования для снижения шума;
- Изменения направления шума;
- Планировки помещений и зданий.

Индивидуальная защита осуществляется за счет:

- Использование наушников;
- Использование вкладышей;
- Использование шлемов и заглушек.

### 6.3.2 Повышенный уровень вибрации

Вибрация – колебательное движение поверхности твердого тела, которое возникает при переменном давлении какого-либо механического источника. Как и любое механическое колебание, вибрацию можно охарактеризовать следующими параметрами: амплитуда, частота, колебательное ускорение и т.д.

Вибрация негативно сказывается на здоровье человека и его производительности. Негативное влияние на здоровье заключается в ряде нарушений функций человеческого организма и различных заболеваниях: нарушение функций сердечно-сосудистой системы, опорно-двигательного аппарата, болезни костно-мышечной системы и т.д. Все это приводит к возникновению вибрационной болезни.

Источниками вибрации в данной экспериментальной установке для исследования процессов газификации графита является компрессор.

По данным [66] вибрация классифицируется по:

1. Способу передачи на человека:
  - Общая;
  - Локальная.

Инв. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата

Общая вибрация передается через какие-либо опорные поверхности (пол, стол и т.п.). Локальная вибрация передается в результате касания человека с вибрирующей поверхностью.

2. Источнику возникновения:

- Локальная;
- Три категории общей (при проведении исследования в данной ВКР возможна вибрация третьей категории типа С, т.к. вибрация передается на рабочее место, не имеющее источников вибрации).

3. Временным характеристикам:

- Постоянные;
- Непостоянные (колеблющиеся во времени, прерывистые, импульсные).

Устройства, способные вызвать вибрацию, работают только во время проведения эксперимента, т.о. вибрация носит непостоянный характер.

Вибрация на рабочем месте нормируется для установления ограничения уровня вибрации, при котором систематическое воздействие в течение многих лет каждый рабочий день не приведет к развитию каких-либо нарушений функций организма и не повлияет на нормальную трудовую деятельность.

В [67] приводятся предельно допустимые значения виброскорости и ускорения для вибрации категории три типа «в».

Инв. № подл.
Подп. и дата
Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Таблица 10 – Предельно допустимые значения вибрации в лабораторных помещениях [67]

Среднегеометрические частоты полос, Гц	Предельно допустимые значения по осям $X_o, Y_o, Z_o$							
	виброускорения				виброскорости			
	м/с <sup>2</sup>		дБ		м/с 10 <sup>-2</sup>		дБ	
	1/3 окт	1/1 окт	1/3 окт	1/1 окт	1/3 окт	1/1 окт	1/3 окт	1/1 окт
1,6	0,0130		82		0,130		88	
2,0	0,0110	0,020	81	86	0,089	0,180	85	91
2,5	0,0100		80		0,063		82	
3,15	0,0089		79		0,045		79	
4,0	0,0079	0,014	78	83	0,032	0,063	76	82
5,0	0,0079		78		0,025		74	
6,3	0,0079		78		0,020		72	
8,0	0,0079	0,014	78	83	0,016	0,032	70	76
10,0	0,0100		80		0,016		70	
12,5	0,0130		82		0,016		70	
16,0	0,0160	0,028	84	89	0,016	0,028	70	75
20,0	0,0200		86		0,016		70	
25,0	0,0250		88		0,016		70	
31,5	0,0320	0,056	90	95	0,016	0,028	70	75
40,0	0,0400		92		0,016		70	
50,0	0,0500		94		0,016		70	
63,0	0,0630	0,110	96	101	0,016	0,028	70	75
80,0	0,0790		98		0,016		70	
Корректированные и эквивалентные корректированные значения и их уровни		0,014		83		0,028		75

Организационные, медико-профилактические и технические мероприятия помогают устранить или снизить уровень вибрации.

Суть организационных мероприятий заключается в ограничении времени воздействия вибрации на человека.

Технические меры заключаются в использовании защитных устройств, которые гасят вибрации, и принятии защитных мер на стадии проектирования:

1. Виброизоляция – использование технических устройств, которые гасят вибрации (резиновые, пружинные и пр. виброподставки);
2. Вибродемпфирование – использование конструкционных материалов с большим коэффициентом внутреннего трения;

Инв. № подл. Подп. и дата. Взам. инв. №

3. Виброгашение – монтаж оборудования к фундаменту для увеличения эффективной массы;
4. Снижение колебаний в источнике вибрации путем улучшения конструкции устройств и балансировка их вращающихся частей;
5. Индивидуальные средства защиты – виброзащитная одежда (обувь или перчатки с упругими демпфирующими элементами, гасящими вибрацию).

### 6.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Важно правильно организовать освещение на рабочем месте, так как это влияет на работоспособность и эффективность труда, снижает травматизм и утомление, повышает безопасность рабочего места. Слабое освещение приводит к преждевременному утомлению, ослаблению внимания и перенапряжению зрительных органов. Повышенный уровень освещения ведет к рези в глазах и слепоте. Дезориентацию вызывает неправильное направление света на рабочем месте.

Нормы освещенности рабочего места и основные требования даны в [69].

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №							ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист 69
			Изм.	Коллч.	Лист	№Эок.	Подп.	Дата		

Таблица 11 – Норма освещенности на рабочем месте производственных помещений при искусственных источниках света [69]

Характеристика зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Искусственное освещение		
						Освещенность, лк		
						При системе комбинированного освещения		При системе общего
						всего	общее число	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Высокой точности	0,30	III	б	малый	средний	1000	200	300
				средний	темный	50	200	200

Два основных типа искусственных источников света:

- Лампы накаливания;
- Люминесцентные лампы.

Люминесцентные лампы имеют следующие преимущества:

- По электромагнитному спектру близки к солнечному свету;
- Значение светотдачи превышает светотдачу ламп накаливания в 3-4 раза;
- КПД выше в 1-2 раза, чем у ламп накаливания;
- Более длительный срок службы.

Лампы делятся по составу видимого спектра на лампы:

1. Белого света (ЛБ);
2. Холодного белого света (ЛХБ);
3. Теплого белого света (ЛТБ);
4. Дневного света (ЛД);
5. Дневного света с улучшенной цветопередачей (ЛДЦ).

Инв. № подл.	Взам инв. №
Подп. и дата	

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата

Лампы белого света получили наибольшее распространение. Самыми распространенными светильниками с люминесцентными лампами являются открытые двухламповые светильники типа ОД, ОДОР, ШОД, ОДО.

Таким образом, для поддержания необходимого уровня освещенности требуется грамотный выбор типа ламп и светильников, а также их правильное расположение.

Расчет освещения для лаборатории, в которой проводились эксперименты, на экспериментальной установке по газификации графита, приведен в приложении Г.

## 6.4 Анализ опасных факторов

### 6.4.1 Электрический ток

При использовании электрических приборов возникает вероятность получения травм от воздействия электрического тока на организм человека. Поэтому мероприятия по обеспечению электробезопасности имеют большое значение.

Несчастные случаи при воздействии электрического тока случаются по следующим причинам:

1. Возникающие шаговые напряжения на поверхности земли в результате замыкания электрического провода на землю;
2. Появление напряжения в результате случайного или ошибочного включения электроустановки во время проводимых технических работ на ее токопроводящих частях.

Помещение лаборатории относится к особо опасным помещениям, так как характеризуется наличием одновременно двух или более условий повышенной опасности [70]. Условия, создающие условия особой опасности в лабораторном помещении:

Инв. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата

- Наличие токопроводящей пыли в виде ультрадисперсной углеродной пыли (сажи);
- Одновременное прикосновение человека к корпусам электрического оборудования или их токопроводящим частям и к каким-либо токопроводящим конструкциям, имеющим заземление.

Для обеспечения безопасности работы на электрических установках проводятся следующие организационные мероприятия, прописанные в [71]:

- К работе на электрических установках допускается привлекать лиц не моложе 18 лет, которые прошли инструктаж и обучение безопасным методам труда и не имеют медицинских противопоказаний;
- Обязательное назначение лиц, которые несут ответственность за организацию и проведение работ;
- Создание организации по надзору за проведением работ.

К техническим способам обеспечения электробезопасности относят:

- Использование изоляции токопроводящих частей установок;
- Наличие защитного заземление;
- Предусмотренное защитное отключение питания электроустановок.

#### 6.4.2 Тепловая изоляция

Непосредственным источником термической опасности является электродуговой разряд. Также вследствие высокой температуры нагреваются и остальные технические элементы экспериментальной установки, поэтому возникает потребность в использовании тепловой изоляции.

Тепловая изоляция – материал или конструкция, которая уменьшает коэффициент теплопередачи от горячей поверхности к более холодной, тем самым увеличивая термическое сопротивление конструкции в целом.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №
--------------	--------------	--------------

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата
------	--------	------	--------	-------	------



Классификация тепловой изоляции:

- Строительная – изолирует ограждающие конструкции (крыши, полы, стены);
- Техническая – изолирует оборудование и трубопроводы;
- Специальная – изолирует вакуумные установки.

Согласно [72] во избежание возникновения тепловых травм температура наружных поверхностей находящегося в помещении теплообменного оборудования, температура теплоносителя которого не превышает 150°C, не должна превышать 40°C.

Температуры наружных поверхностей установки, используемой в данной ВКР, не превышают 120°C. Поэтому принято решение использовать в качестве тепловой изоляции керамическую сверхтонкую теплоизоляцию «КО-РУНД».

### 6.4.3 Механические опасности

Механические опасности – нежелательные воздействия на человека, образовавшиеся в результате сил гравитации или кинетической энергии тел.

К источникам механических опасностей в помещении лаборатории относятся:

- Части механизмов оборудования, находящиеся в движении;
- Незакрепленное оборудование (материалы, инструменты и т.д.);
- Острые углы столов;
- Острые кромки, заусенцы и шероховатости на поверхности заготовки, инструмента или оборудования;
- Расположение рабочего места на значительной высоте относительно поверхности земли;

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №
--------------	--------------	--------------

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата
------	--------	------	--------	-------	------

- Поверхности установки, находящиеся под высоким напряжением или температурой.

Существует два основных способа защиты персонала от механической опасности [65]:

1. Ограничение доступа к частям оборудования, которые представляют опасность;
2. Применение средств индивидуальной защиты (перчатки, каски, защитные очки, обувь).

#### 6.4.4 Пожарная опасность

Основной целью пожарной безопасности является поиск и модернизация обладающих наибольшей эффективностью с экономической и технической точки зрения способов и средств предупреждения возникновения очагов возгорания, а также их ликвидация с наименьшим ущербом и наиболее рациональным использованием сил и технических средств тушения пожаров.

Также причинами пожара могут стать замыкания проводов, перегруженные сети и т.д., а также возгорающиеся предметы (изоляция проводов) [73].

Лабораторные помещения по пожарной опасности относятся к категории В [74], т.к. для них характерно наличие горючих и трудногорючих жидкостей, твердых горючих и трудногорючих веществ и материалов (в том числе пыли и волокон), веществ и материалов, которые при взаимодействии с водой, кислородом или друг с другом могут воспламеняться, при условии, что помещения, в которых они имеются в наличии или обращаются, не относятся к категориям А или Б.

Мероприятия по предотвращению возникновения очагов возгорания:

- Организационные;

Инв. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	

Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата

- Технические;
- Строительно-планировочные.

Целью строительно-планировочных мероприятий является повышение огнестойкости и предела огнестойкости зданий: замена сгораемых материалов на несгораемые или трудно сгораемые.

Целью технических мероприятий является соблюдение противопожарных норм систем вентиляции, отопления, освещения, электрического обеспечения при эвакуации, а также наличие противопожарных защитных систем и соблюдение проектных режимов работы оборудования.

Целью организационных мер является обучение персонала соблюдению мер пожарной безопасности.

Одним из средств пожаротушения являются огнетушители. Выбор их типа и количества зависит от огнетушащей способности, класса возгорания горючих веществ, материалов и предельной площади. Исходя из [74], принято решение установить два углекислотных огнетушителя марки ОУ-5, т.к. напряжение электроустановок не превышает 1000 В.

## 6.5 Экологическая безопасность

Экологическая безопасность - приемлемый уровень деструктивного влияния природных и антропогенных факторов экологических опасностей, которые представляют угрозу для окружающей среды.

Установка в данной ВКР не имеет производственных масштабов, ее производство и эксплуатация не оказывает заметного влияния на окружающую среду. Возникающие в процессе производства деталей установки твердые бытовые отходы идут на хранение и утилизацию на специальных мусорных полигонах.

Инв. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата

## 6.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Комплекс государственных стандартов безопасности в ЧС – совокупность стандартов, связанных между собой и устанавливающих требования, нормы и правила, способы и методы, направленные на обеспечение безопасного функционирования населения и объектов народного хозяйства и окружающей природной среды в ЧС.

Задача обеспечения безопасности людей в ЧС, вызываемых природными стихийными бедствиями, техногенными катастрофами и применением оружия (ЧС военного характера) является общегосударственной, которая обязательна для разрешения всеми органами управления и регулирования, службами и различными формированиями, а также подсистемами, входящими в Российскую систему предупреждения и действий в чрезвычайных ситуациях.

В процессе эксплуатации установки возможно возникновение следующих ЧС:

- Пожары;
- Землетрясения;
- Обрушения зданий.

Для повышения устойчивости работы экспериментальной установки в ЧС предусмотрена установка источника бесперебойного питания, которое обеспечивает безопасную остановку работы установки в условиях нарушения электро- и водоснабжения. Также предусматривается формирование запасов медицинских и прочих санитарных средств.

### Выводы по разделу

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					Лист
			ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ				
Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата	76	

Таким образом в данном разделе были рассмотрены вопросы выполнения требований к безопасности и гигиене труда, к промышленной безопасности, охране окружающей среды и ресурсосбережению. В соответствии со стандартом были приняты решения, исключая несчастные случаи в производстве и направленные на снижение вредных воздействий на окружающую среду.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№зак.		Подп.

## Заключение

В ходе данной дипломной работы был собран и проанализирован материал по способам и принципам реализации процессов утилизации радиоактивного графита, после нахождения в активной зоне реактора.

В данной дипломной работе было произведено исследование технологических аспектов процессов утилизации радиоактивного графита путем высокотемпературной термической газификации отработавшего реакторного графита на экспериментальной установке путем электродуговой плазменной обработки реакторного графита в экспериментальном плазмохимическом реакторе постоянного тока. Для более эффективного процесса утилизации отработавшего реакторного графита было принято решение использовать графит для процесса синтеза карбида циркония тем самым уменьшая долю не переработанных отходов. Также высокая температура плавления и малое поперечное сечение захвата нейтронов карбида циркония позволяет применять его как защитное покрытие на графитовых матрицах в твэлах. Поэтому карбид циркония является высоко востребованным материалом. Для определения успешного проведения процесса синтеза карбида циркония был произведен анализ полученных образцов на рентгеновском дифрактометре shimadzu xrd-7000s.

В ходе проведения эксперимента по высокотемпературной утилизации отработавшего реакторного графита и синтеза карбида циркония путем электродуговой плазменной обработки были выявлены соотношения масс компонентов для успешного протекания реакции, также была выявлена и подтверждена необходимая температура нагрева шихты. Далее был успешно получен карбид циркония под воздействием электродугового разряда в открытой воздушной среде, чистота которого была проверена при помощи анализа на рентгеновском дифрактометре. По итогам можно сказать, что данный способ имеет большой потенциал в сфере утилизации отходов.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №							Лист
			ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ						
Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата				78

В рамках дипломной работы была разработана схема автоматического регулирования температуры нагрева для высокотемпературной утилизации реакторного графита. Было уделено внимание процессам безопасности, таким как пожарная, электробезопасность и т.д. Так же в данной работе рассчитана экономическая составляющая для проведения эксперимента по высокотемпературной утилизации реакторного графита.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№зак.		

## Список использованных источников

1. Audi G. и др. The NUBASE2016 evaluation of nuclear properties // Chinese Phys. C. 2017. Т. 41, № 3. С. 030001.
2. Абрамов А.А. и др. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. ЭНЕРГОПРОМАНАЛИТИКА, 2015.
3. IAEA. Progress in Radioactive Graphite Waste Management // Tecdoc 1647. 2010. № July. С. 20
4. IAEA. Processing of Irradiated Graphite to Meet Acceptance Criteria for Waste Disposal // T21026. 2010. Т. ACTIVE.
5. Fachinger J., von Lensa W., Podruhzina T. Decontamination of nuclear graphite // Nucl. Eng. Des. 2008. Т. 238, № 11. С. 3086–3091.
6. IAEA. Progress in Radioactive Graphite Waste Management // Tecdoc 1647. 2010. № July. С. 20.
7. W. Delle; K. Koizlik; H. Nickel, Graphitische Werkstoffe für den Einsatz in Kernreaktoren. Teil 2: Polykristalliner Graphit und Brennelementmatrix, München, Karl Thiernig AG 1983.
8. W. Delle; K. Koizlik; H. Nickel, Graphitische Werkstoffe für den Einsatz in Kernreaktoren. Teil 1: Pyrolytisch abgeschiedener Kohlenstoff, München, Karl Thiernig AG 1978.
9. Von I Ebel; B. Findeisen; K. Grasmе; P. Olschinka, Eigenschaften und Nutzung natürlicher und künstlicher Graphite, Mitteilung aus dem Direktorat Forschung und Entwicklung des VEB Elektrokohle Lichtenberg, Berlin 1975. S. G. Maischak, Probenaufschluss und Festphasenextraktion zur Anreicherung und Trennung von Actinoiden und radioaktiven Abfällen (Diss. RWTH Aachen 2000), Berichte des Forschungszentrum Jülich 3760.
10. E. Ziermann, G. Ivens, Abschlußbericht über den Leistungsbetrieb des AVR-Versuchskernkraftwerkes, Technische Infrastruktur und Anlageplanung, Berichte des Forschungszentrum Jülich, Jül.-3448, Okt. 1997.

Инв. № подл.	Подл. и дата	Взам. инв. №						Лист
						ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	80	
Изм.	Коллч.	Лист	№ Эак.	Подл.	Дата			



- 11.P. C. Schmidt, Alternativen zur Verminderung der C-14- Emission bei der Wiederaufbereitung von HTR- Brennelementen (Diss. RWTH Aachen D82)
- 12.R. P. Bush, G. M. Smith, I. F. White, Nuclear Science and Technology, Carbon-14 waste management. Commission of the European Communities. Final Report EUR 8749 EN, 1994.
- 13.E. L. Cussler, Diffusion – Mass Transfer in Fluid Systems, Second Edition Cambridge University Press 123, 1997.
- 14.Monika W. Florjan – Dekontamination von Nukleargraphit durch thermische Behandlung, Diss., RWTH Aachen, Univ., 2009.
- 15.Hesbol & Mason, “Method for the Volume Reduction and Processing of Nuclear Waste”, US Patent 5,909,654, June 1999.
- 16.Fachinger J., von Lensa W., Podruhzina T. Decontamination of nuclear graphite // Nucl. Eng. Des. 2008. Т. 238, № 11. С. 3086–3091.
- 17.Dunzik-Gougar M. Lou, Smith T.E. Removal of carbon-14 from irradiated graphite // J. Nucl. Mater. 2014. Т. 451, № 1–3. С. 328–335.
- 18.Kearsey H.A., Page R.J. Product evaluation phase 1 report. 1984.
- 19.IAEA. Characterization, treatment and conditioning of radioactive graphite from decommissioning of nuclear reactors // Tecdoc 1521. 2006. № September.
- 20.Costes J.R., de Tassigny C., Vidal H. Conditioning of graphite bricks from dismantled gas-cooled reactors for disposal // Waste Manag. 1990. Т. 10, № 4. С. 297–302.
- 21.Бодров О.В. и др. Обращение с графитом при выводе из эксплуатации реакторов РБМК. Санкт-Петербург, 2019. 34 с.
- 22.Mason J.B., Bradbury D. Pyrolysis and its potential use in nuclear graphite disposal // Nucl. Energy. 2000. Т. 39, № 5. С. 305–310.
- 23.Tian L. и др. Disintegration of graphite matrix from the simulative high temperature gas-cooled reactor fuel element by electrochemical method // Electrochim. Acta. 2009. Т. 54, № 28. С. 7313–7317.
- 24.Павлюк А.О. и др. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Инв. № подл. Подп. и дата. Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эок.	Подп.	Дата

ОБЛУЧЕННОГО ГРАФИТА УРАН-ГРАФИТОВЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ // Izv. Tomsk. Politekh. Univ. Inzining Georesursov. 2018. Т. 329, № 12. С. 30–38.

25. Liu J. и др. Study on the Recycling of Nuclear Graphite after Micro-Oxidation // Nucl. Eng. Technol. 2016. Т. 48, № 1. С. 182–188.
26. Von Lensa W. и др. Treatment and Disposal of irradiated Graphite and other Carbonaceous Waste // ATW - Int. Zeitschrift fur Kernenergie. 2011. Т. 56, № 4–5. С. 263–269.
27. SMITH T.E., MCCRORY S., DUNZIK-GOUGAR M. LOU. LIMITED OXIDATION OF IRRADIATED GRAPHITE WASTE TO REMOVE SURFACE CARBON-14 // Nucl. Eng. Technol. 2013. Т. 45, № 2. С. 211–218.
28. Podrzhina T. Graphite as radioactive waste corrosion behaviour under final repository conditions and thermal treatment. // FZJ Report. 2004.
29. Snead L., Burchell T. Oxidation of high-quality graphite for IFE // Proceedings of the DOE/NE High Average Power Laser Program Workshop, Pleasanton, CA. 2002. С. 25–26.
30. Wen K.Y., Marrow T.J., Marsden B.J. The microstructure of nuclear graphite binders // Carbon N. Y. 2008. Т. 46, № 1. С. 62–71.
31. El-Genk M.S., Tournier J.-M.P. Development and validation of a model for the chemical kinetics of graphite oxidation // J. Nucl. Mater. 2011. Т. 411, № 1–3. С. 193–207.
32. Barbin N.M. и др. Thermodynamic Analysis of the Oxidation of Radioactive Graphite in a Multicomponent Melt in an Inert Atmosphere // Russ. Metall. 2018.
33. Барбин Н.М. и др. Термодинамический Анализ Окисления Радиоактивного Графита В Расплаве  $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-K}_2\text{CO}_3\text{-Sb}_2\text{O}_3$  В Атмосфере Аргона, «Расплавы» // Расплавы. 2018. № 3. С. 261–270.
34. Беспала Е.В. и др. Термообработка Облученного Графита В

Инв. № подл.	Лист и дата	Взам инв. №							ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата		

- Окислительной Среде // Химия Твердого Топлива. 2018. № 5. С. 54–62.
35. Yang H.C., Kim J.H., 2004. Characteristics of dioxins and metals emission from radwaste plasma arc melter system. Chemosphere 57 (5). 421-428.
36. Du Changming, Shang Chao, Xiangjie Gong, 2018. Plasma methods for metals recovery from metal-containing waste. Guangzhou 510275, China.
37. Патент РФ № 2686897, 24.08.2018. устройство для получения порошка на основе карбида титана / Пак А.Я.
38. Пак А.Я. Письма в ЖТФ// Безвакуумный метод получения кубического карбида титана в плазме низковольтного дугового разряда постоянного тока – 2018. – том 45.
39. E.K. Storms, The refractory carbides, 18–27, Academic Press, New York and London, 1967.
40. M.M. Opeka, I.G. Talmy, E.J. Wuchina, J.A. Zaykosi, S.J. Causey, Mechanical, thermal, and oxidation properties of refractory hafnium and zirconium compounds, J. Eur. Ceram. Soc. 19 (1999) 2405–2414.
41. A.J. Perry, The refractories HfC and HfN—a survey I, Powder Metall. Int. 19 (1987) 32–36.
42. K. Minato, T. Ogawa, K. Sawa, A. Ishikawa, T. Tomita, S. Iida, H. Sekino, Irradiation experiment on ZrC-coated fuel particles for high-temperature gas-cooled reactors, Nucl. Technol. 130 (2000) 272–281.
43. T. Tsuchida, M. Kawaguchi, K. Kodaira, Synthesis of ZrC and ZrN in air from mechanically activated ZrC and powder mixtures, Solid State Ion. 102–103 (1997) 149–154.
44. A.A. Mahday, EI-Eskandarany MS, H.A. Ahmed, A.A. Amer, Mechanically induced solid state carburization for fabrication of nanocrystalline ZrC refractory material powders, J. Alloys Compd. 299 (2000) 244–253.
45. A. Maitre, P. Lefort, Solid state reaction of zirconia with carbon, Solid State Ion. 104 (1997) 109–122.
46. M.N. Seo, S.H. Kang, Y.M. Kim, S.S. Ryu, Preparation of highly dispersed ultra-fine ZrC by combination of carbothermal reduction of ball-milled ZrO<sub>2</sub>

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.		

- and C mixture and bead milling, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 41 (2013) 345–350.
47. J.J. Xie, Z.Y. Fu, Y.C. Wang, S.W. Lee, K. Niihara, Synthesis of nanosized zirconium carbide powders by a combinational method of sol-gel and pulse current heating, *J. Eur. Ceram. Soc.* 34 (13) (2014), e1–13.e7.
48. M.D. Sacks, C.A. Wang, Z.H. Yang, A. Jain, Carbothermal reduction synthesis of nanocrystalline zirconium carbide and hafnium carbide powders using solution-derived precursors, *J. Mater. Sci.* 39 (2004) 6057–6066.
49. Y.J. Yan, Z.R. Huang, X.J. Liu, D.L. Jiang, Carbothermal synthesis of ultra-fine zirconium carbide powders using inorganic precursors via sol-gel method, *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 44 (2007) 81–85.
50. C. Ang, T. Williams, A. Seeber, H.T. Wang, Y.B. Cheng, Synthesis and evolution of zirconium carbide via sol-gel route: features of nanoparticle oxide-carbon reactions, *J. Am. Ceram. Soc.* 96 (2013) 1099–1106.
51. E.M. Passmore, R.M. Spriggs, T. Vasilos, Strength-grain size-porosity relations in alumina, *J. Am. Ceram. Soc.* 48 (1965) 1–7.
52. Z.A. Munir, D.V. Quach, M. Ohyanagi, Electric current activation of sintering: review of the pulse electric current sintering process, *J. Am. Ceram. Soc.* 94 (2011) 1–19.
53. S.H. Lee, S.Y. Choi, H.D. Kim, ZrB<sub>2</sub>-SiC nano-powder mixture prepared using ZrSi<sub>2</sub> and modified spark plasma sintering, *J. Am. Ceram. Soc.* 96 (2013) 1051–1054.
54. H.L. Wang, S.H. Lee, H.D. Kim, Nano-hafnium diboride powders synthesized using a spark plasma sintering apparatus, *J. Am. Ceram. Soc.* 95 (2012) 1493–1496.
55. L. Feng, S.H. Lee, H.L. Wang, H.S. Lee, Synthesis and densification of nanocrystalline hafnium carbide powder, *J. Eur. Ceram. Soc.* 35 (2015) 4073–4081.
56. Кириллов П.Л. и др. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). 2015. С. 129–

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам инв. №							ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата		

130.

57.Дубровский Л.Б. и др. Карбиды и нитриды переходных материалов. 1974. С. 20.

58.Сайт компании MARKMET [Электронный ресурс] / URL: markmet.ru/diagrammy-splavov/diagramma-sostoyaniya-sistemy-uglerod-tsirkonii-c-zr/, свободный. – Загл. С экрана. – Яз.рус. Дата обращения 11.11.2020.

59.Руководство по эксплуатации. Рентгеновский дифрактометр shimadzu xrd-7000s. С. 3.

60.Волошенко В.А., Горбунов Д.Б. Проектирование систем автоматического контроля и регулирования. Томск.-Изд. ТПУ, 2011. – 108 с.

61.Operation manual. Infrared thermometer. Version: 1800/2200-EN-00. – 12 с.

62.Руководство по эксплуатации. Измеритель-регулятор микропроцессорный ТРМ101. – 9 с.

63.Operation manual. MMA welding inverter. – 3 с.

64.СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.

65.ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. «Средства защиты работающих. Общие требования и классификация».

66.ГОСТ 12.1.012-2004 ССБТ. «Вибрационная безопасность. Общие требования».

67.СН 2.2.4/2.1.8.566. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. М.: Минздрав России, 1997.

68.СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

69.СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278 – 03. «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий» М.: Минздрав России, 2003.

70.Правила устройства электроустановок: Приказ Минэнерго России от 08.07.2002 № 204.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам инв. №							Лист
			ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ						
Изм.	Коллч.	Лист	№Экз.	Подп.	Дата				85

- 71.ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ. «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».
- 72.СП 61.13330.2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов».
- 73.СНиП 21-01-97 «Пожарная безопасность зданий и сооружений».
- 74.НПБ 105-03 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».
- 75.ГОСТ 12.2.032-78 «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования».
- 76.«Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. от 03.07.2016).

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата

## Приложение А

Таблица А1 – Наименование работ и их длительность

Шифр	Наименование	Работник	Дли- тель- ность, ч.
1	Выдача задания	Руководитель, ассистент	6
2	Обзор литературы	Ассистент	25
3	Изучение методов газификации графита и синтеза карбида циркония	Ассистент	35
4	Написание обзора литературы	Ассистент	35
5	Изучение экспериментальной установки	Ассистент	6
6	Создание чертежа схемы установки	Ассистент	6
7	Согласование принципиальной схемы	Руководитель, ассистент	1
14	Покупка и доставка необходимых мате- риалов	Ассистент	10
15	Проведение эксперимента	Ассистент	16
16	Обработка результатов эксперимента	Ассистент	8
17	Оформление основной части поясни- тельной записки	Ассистент	17
18	Согласование основной части поясни- тельной записки	Руководитель, ассистент	2
19	Исправление ошибок в пояснительной записке и ее итоговое оформление	Ассистент	18
	Итого	Руководитель	9
	Итого	Ассистент	193

## Приложение Б

Инв. № подл. Подп. и дата. Взам инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата

ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ

Лист

87

Таблица Б1 – Стоимость материалов

Наименование	Цена, руб.	Количество, шт (м).	Стоимость, руб.
Электрод 8x100	120	10	1200
Тигель	300	1	300
Порошок графита ГЛ-1, до 10 мкм, 500 гр.	4300	1	4300
Порошок циркония ПЦрК-1, до 10мкм, 100 гр	14260	1	14260
Итого			20060

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
			Изм.	Коллч.	Лист	№зак.		



## Приложение В

Таблица В1 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С.1. Наглядность эксперимента;</p> <p>С.2. Актуальность исследования;</p> <p>С.3. Надежность;</p> <p>С.4. Низкая стоимость большей части деталей;</p> <p>С.5. Быстрота проведения эксперимента</p> <p>С.6. Быстрое достижение необходимых температур.</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл.1. Отсутствие большей части автоматики;</p> <p>Сл.2. Трудоемкость проведения экспериментов;</p> <p>Сл.3. Большой срок поставок материалов и компонентов, используемых при проведении научного исследования.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В.1 Возможность исследования газификации графита.</p> <p>В.2 Возможность проводить исследования газификации других материалов.</p> <p>В.3 Возможность исследовать процесса синтеза в дуговой плазме.</p>	<p>1. Возможность изучения газификации при различных начальных условиях.</p> <p>2. Быстрота проведения эксперимента позволяет оперативно получать данные.</p> <p>3. Конструкция установки позволяет изучать процессы газификации.</p>	<p>1. Отсутствие автоматизированных систем управления, это увеличивает длительность проведения эксперимента, имеются ограничения по возможности проведения исследований.</p>

Инв. № подл. Подп. и дата. Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата

Продолжение таблицы В1

<p>Угрозы:</p> <p>У1. Сложность в проведении ремонтных работ, т.к. часть деталей выполняется на заказ;</p> <p>У2. Создание нового, более совершенного экспериментального стенда, который будет снабжен автоматикой с возможностью проводить более точные и менее трудоемкие эксперименты.</p>	<p>1. Надежность, отсутствие каких-либо вращающихся деталей во время проведения эксперимента увеличивает срок службы механизмов и самой установки.</p> <p>2. Легкая замена электродов и работа установки в атмосферном воздухе делает данную экспериментальную установку конкурентоспособной.</p>	<p>3. Отсутствие прямого подключения к ПК и отсутствие полной автоматизации снижает конкурентоспособность</p> <p>4. Наличие деталей, которые не соответствуют ГОСТ, значительно повышают стоимость ремонтных работ.</p> <p>5. Низкий уровень автоматизации</p> <p>6. Взаимодействие с электричеством и высокие температуры вызывают повышенную пожароопасность.</p>
---	---	---

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№зак.	Подп.	Дата

## Приложение Г

Произведем расчет освещения в лаборатории необходимого для проведения экспериментов на установке.

Расположение светильников в помещении определяется следующими размерами:

$H = 3$  м – высота помещения;

$h_p = 0,75$  м – высота рабочей поверхности над полом;

$h = h_{\text{п}} - h_p = 2,8 - 0,75 = 2,05$  м – высота светильника над рабочей поверхностью.

$h_c = 0,2$  м – расстояние светильников от перекрытия (свес);

$h_{\text{п}} = H - h_c = 3 - 0,2 = 2,8$  м – высота светильника над полом, высота подвеса;

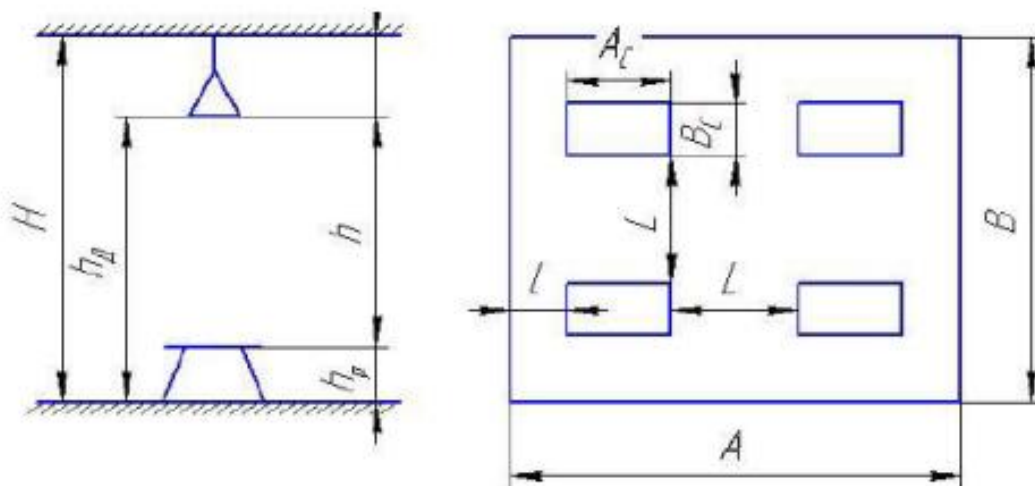


Рисунок Г1 – Основные параметры для расчета освещения

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №
Изм.	Коллч.	Лист
№ док.	Подп.	Дата

Оптимальное расстояние от крайнего ряда светильников до стены рекомендуется принимать:

$$l = \frac{l}{3} \quad (\Gamma 1)$$

При равномерном размещении люминесцентных светильников последние располагаются обычно рядами – параллельно рядам оборудования.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda = \frac{L}{h}$ . Уменьшение этого критерия приводит к удорожанию обустройства и обслуживания освещения, а чрезмерное увеличение ведёт к неравномерности освещённости.

Для светильников люминесцентными лампами без защитной решетки типов ОД, ОДО  $\lambda=1,4$  [25].

Расстояние между светильниками  $L$  определяется как:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,05 = 2,87\text{м}; \quad (\Gamma 2)$$

Тогда расстояния от крайнего ряда до стены будет равно:

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2,87}{3} = 0,957 \text{ м}. \quad (\Gamma 3)$$

Расчет освещения производится для лаборатории длина которой – 12500 мм, ширина – 6000 мм.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока. Это коэффициент, который учитывает световой поток, отражённый от потолка и стен. Световой поток группы люминесцентных ламп определяется по формуле [25]:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K \cdot Z}{N \cdot \eta}, \quad (\Gamma 4)$$

Инв. № подл.
Подп. и дата
Взам. инв. №

Изм.	Коллч.	Лист	№ Эск.	Подп.	Дата
------	--------	------	--------	-------	------

где  $E_n = 300 \text{лк}$  – нормируемая минимальная освещенность по СП 52.13330.2011;

$S = A \cdot B = 12,5 \cdot 6 = 75 \text{ м}^2$  – площадь освещаемого помещения;

$K$  – коэффициент запаса. Для помещения с малым выделением пыли  $K = 1,5$ ;

$Z$  – коэффициент неравномерности, отношение  $\frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{min}}}$ . Для люминесцентных ламп  $Z = 1,1$ ;

$N$  – число ламп. Примем  $N=12$ ;

$\eta$  – коэффициент использования светового потока.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения  $i$ , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью  $h$  и коэффициентов отражения стен  $p_c$  и потолка  $p_{\text{п}}$ .

Для лаборатории:  $p_c = 30\%$  – стены оклеены светлыми обоями;  $p_{\text{п}} = 50\%$  – потолок чистый бетонный.

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{75}{2,05 \cdot (10 + 7)} = 2,15. \quad (\Gamma 5)$$

Коэффициент использования светового потока светильника  $\eta=55\%$ .

Световой поток ламп в каждом из рядов:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 75 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,55} = 5625 \text{ люмен.} \quad (\Gamma 6)$$

Выбираем светильник ОД – 2 – 80 с лампой ЛБ 80 [25]:

- Световой поток лампы – 5200 лм;

Инв. № подл.	Взам. инв. №
Лист	Дата
Изм.	Кол.ч.
Лист	№ док.
Подп.	Дата

- Количество ламп – 2;
- Мощность – 80 Вт;
- Габариты светильника:
  - Длина – 1531 мм;
  - Ширина – 266 мм;
  - Высота – 198 мм.

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{станд}} - \Phi_{\text{расч}}}{\Phi_{\text{расч}}} \cdot 100\% \leq 20\%; \quad (\Gamma 7)$$

$$\frac{5200 - 5625}{5625} \cdot 100\% = -7,5\%; \quad (\Gamma 8)$$

$-10 \leq -7,5\% \leq 20\%$  – условие выполняется.

Определяем электрическую мощность осветительной установки:

$$P = P_0 \cdot N = 80 \cdot 12 = 960 \text{ Вт}. \quad (\Gamma 9)$$

Изобразим план размещения светильников на рисунке Д2.

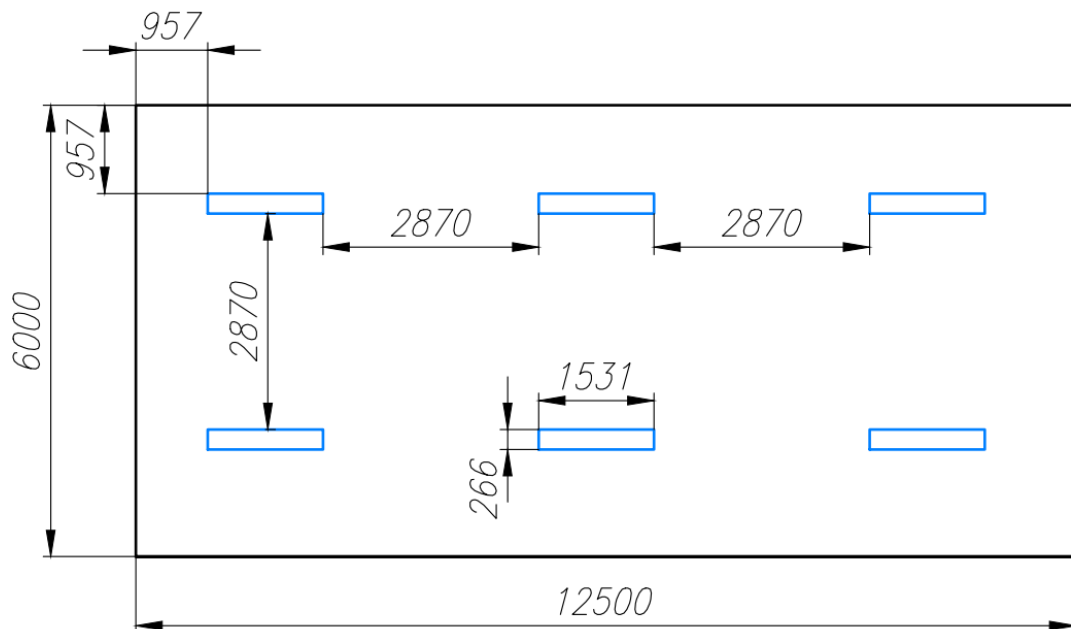


Рисунок Г2 – Размещения светильников с люминесцентными лампами

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №
--------------	--------------	--------------

Изм.	Коллч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
------	--------	------	--------	-------	------