



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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (специальность) 14.04.02 Ядерная физика и технологии
(Изотопные технологии и материалы)
Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерного топливного цикла

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Теплофизические характеристики высокочастотного факельного разряда, горящего в смеси атомарного и молекулярного газов

УДК 537.5:533.9:536.45

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Семенцов Валерий Игоревич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ю.Ю. Луценко	д.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кашук И.В.	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дорофеева Л.И.	к.ф.-м.н.		

Томск – 2020 г.

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области технологий ядерно-топливного цикла, физики кинетических явлений, методов разделения жидких и газовых смесей, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области изотопных технологий и материалов, получения высокочистых веществ, переработки, утилизации и обезвреживания промышленных отходов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие явления и закономерности в области изотопных технологий и материалов, проводить исследования в области разделения молекулярных и изотопных смесей, получения высокочистых веществ.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы расчета каскадов для разделения молекулярных и изотопных смесей, эксплуатировать, проводить испытания, монтаж и настройку современных физических установок и устройств.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение
P6	Разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, проектировать и организовывать инновационный бизнес, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности, использовать современные достижения и передовые технологии получения и применения изотопно-модифицированных материалов в профессиональной деятельности
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (специальность) 14.04.02 Ядерные физика и технологии
(Изотопные технологии и материалы)
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерного топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0AM81	Семенцову Валерию Игоревичу

Тема работы:

Теплофизические характеристики высокочастотного факельного разряда, горящего в смеси атомарного и молекулярного газов

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 62-51/с от 02.03.2020
---	-------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.2020
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><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>Объект исследования: высокочастотный факельный разряд.</p> <p>Плазмообразующим газом является смесь аргона с воздухом.</p> <p>Частота электромагнитного поля составляла 37 МГц.</p>
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <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"> 1. Расчет газовой и электронной температур. 2. Определение тепловой мощности, теряемой на электроде. 3. Расчет тепловой мощности разряда 4. Сопоставление расчетной и экспериментальной части
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	И.В. Кашук
Социальная ответственность	Т.С. Гоголева
Иностранный язык	У.А. Смирнова

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

Литературный обзор

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	12.03.2020
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ю.Ю. Луценко	д.ф.-м.н		12.03.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	В.И.Семенцов		12.03.2020

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM81	Семенцов Валерий Игоревич

Школа	ИЯТШ	Отделение школы	
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 «Ядерные физика и технологии»/ «Изотопные технологии и материалы»

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

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Портрет потребителя
2. Оценка конкурентоспособности НИ
3. Матрица SWOT
4. График разработки и внедрения НИ
5. Бюджет НИ
6. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

12.03.2020

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук Ирина Вадимовна	к.т.н, доцент		12.03.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Семенцов Валерий Игоревич		12.03.2020

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM81	Семенцов Валерий Игоревич

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 «Ядерные физика и технологии»/ «Изотопные технологии и материалы»

Тема ВКР:

Моделирование процесса синтеза в воздушной плазме оксидных композиций для дисперсионного плутоний-ториевого топлива	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Расчет теплофизических характеристик высокочастотного факельного разряда, горящего в смеси атомарного и молекулярного газов.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018) – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
2. Профессиональная социальная безопасность: <ul style="list-style-type: none"> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия 	Вредные и опасные факторы: <ul style="list-style-type: none"> – отклонение показателей микроклимата; – превышение уровня шума; – повышенный уровень электромагнитного излучения; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – повышенная загазованность рабочей зоны; – поражение электрическим током.
3. Экологическая безопасность:	<ul style="list-style-type: none"> – анализ влияния объекта и процесса исследования на окружающую среду; – разработка организационных и технических мероприятий по защите окружающей среды.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> – описание типичной ЧС – пожар на рабочем месте; – превентивные меры и порядок действий во время ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	12.03.2020
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Татьяна Сергеевна	к.ф.-м.н.		12.03.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ81	Семенцов Валерий Игоревич		12.03.2020

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (специальность) 14.04.02 Ядерные физика и технологии
 (Изотопные технологии и материалы)
 Уровень образования Магистратура
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерного топливного цикла
 Период выполнения (весенний семестр 2019 /20120 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.2020 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
12.03.2020	Разработка ТЗ на ВКР	20
17.03.2020	Составление и утверждение технического задания	10
31.03.2020	Сбор и изучение научно-технической литературы	10
10.04.2020	Сбор лабораторной установки	10
17.04.2020	Проведение экспериментов по определению газовой и электронной температур	5
24.04.2020	Проведение экспериментов по измерению тепловой мощности разряда	5
1.05.2020	Расчет тепловой мощности разряда	10
15.05.2020	Анализ и обработка полученных результатов	15
20.05.2020	Оформление пояснительной записки	15

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Луценко Ю.Ю.	д.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

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

Оглавление

Реферат.....	11
Введение	12
1. Свойства и особенности высокочастотного факельного разряда.....	13
2. Определение характеристик плазмы факельного разряда	27
2.1 Определение электронной температуры.....	27
2.1.1 Схема экспериментальной установки	27
2.1.2 Результаты измерений.....	29
2.2 Определение газовой температуры	33
2.2.1 Методика измерения газовой температуры	33
2.2.2 Результаты измерений.....	35
2.3 Определение удельной электропроводности плазмы разряда	40
2.4 Определение напряженности электрического поля	41
2.4.1 Схема экспериментальной установки	41
2.4.2 Результаты измерений.....	42
3. Экспериментальное определение тепловых потерь	45
3.1.1 Схема экспериментальной установки	45
3.1.2 Результаты измерений.....	46
3.2 Расчет тепловых потерь в плазме разряда	48
4. Финансовый менеджмент	52
Введение	52
4.1 Анализ конкурентных технических решений.....	52
4.2 SWOT-анализ.....	54
4.3 Планирование научно-исследовательских работ	56

4.4 Бюджет научного исследования	61
4.5 Определение финансовой, бюджетной и экономической эффективности исследования	68
5. Социальная ответственность	72
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	73
5.2 Профессиональная социальная безопасность	75
5.3 Экологическая безопасность.....	87
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	89
Выводы	92
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	93
Приложение А	99

Реферат

Выпускная квалификационная работа объемом 111 с., 39 рисунков, 26 таблиц, 55 источников, 33 формул.

Ключевые слова: плазма, тепловая мощность, высокочастотный факельный разряд, электронная температура, газовая температура.

Объектом исследования является высокочастотный факельный разряд.

Цель работы: Определение теплофизических характеристик высокочастотного факельного разряда, горящего в смеси аргон – воздух, в зависимости от соотношения атомарной и молекулярной компоненты в плазмообразующем газе.

В процессе исследования проводились:

Измерения электронной и газовой температур ВЧФР, горящего в смеси аргон воздух;

Измерения тепловой мощности высокочастотного факельного разряда в зависимости от концентрации воздуха в смеси;

Расчет тепловой мощности разряда;

Экономический расчет затрат на проведение выпускной квалификационной работы, составлен план-график работ.

В результате исследований

Измерены электронные и газовые температуры ВЧФР, горящего в смеси аргон – воздух;

Экспериментально и теоретически определены тепловые потери ВЧФР;

Сопоставлены теоретические и экспериментальные значения тепловых потерь ВЧФР.

Область применения: оптимизация режимов работы высокочастотных факельных разрядов.

Введение

Высокочастотный факельный разряд является перспективным источником плазмы при проведении различных плазмохимических процессов. Он имеет ряд преимуществ по сравнению с другими разновидностями высокочастотных разрядов. Факельный разряд легко возбуждается в любых средах, включая водород, устойчив к запылению, имеет большой объём плазмы при малой величине подводимой мощности.

При проведении некоторых плазмохимических процессов, например при получении карбидов металлов, а также при восстановлении хлоридов металлов, наряду с молекулярным газом – восстановителем в плазмообразующий газ добавляется одноатомный инертный газ.

Заметим, что при разработке факельных плазмотронов необходимо знать взаимосвязь между тепловой мощностью разряда и длиной его канала. Однако до настоящего времени определение тепловой мощности факельного разряда, горящего в смеси молекулярного и атомарного газов не проводилось.

В настоящей работе проведены измерения удельной тепловой мощности факельного разряда в зависимости от соотношения концентрации молекулярного и атомарного газов. В качестве атомарного газа использовался аргон, а в качестве молекулярного газа – воздух. Измерения проводились методом калориметрирования.

Наряду с измерениями удельной мощности разряда проводились измерения электронной и газовой температуры разряда. На основе проведённых измерений была рассчитана величина удельной электропроводности плазмы разряда. Также проведено определение напряжённости электрического поля в разрядном канале. По полученным значениям напряжённости электрического поля и величины удельной электропроводности проведён расчет тепловой мощности разряда. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

1. Свойства и особенности высокочастотного факельного разряда

При изучении ВЧ генераторов в 1928 году Зилитинкевич С.И. открыл существование высокочастотного факельного (одноэлектронного) разряда [1] (ВЧФР). Однако до 60-х годов одноэлектродные разряды исследовались с мощностью не более 200 Вт.

Чешские авторы [3-9] достаточно обширно исследовали одноэлектродный разряд, возбуждаемый синусоидальным ВЧ напряжением мощностью до 200 Вт.

Высокочастотный факельный разряд (рисунок 1.1) имеет три структурных [2] элемента: электрод 1, канал 2 и диффузионную оболочку 3. Канал разряда представляет собой яркосветящееся образование цилиндрической формы, диаметр которого постепенно уменьшается вдоль оси разряда. В канале разряда протекает высокочастотный ток и происходит преимущественная диссипация энергии электромагнитной волны. Канал разряда окружён слабосветящейся диффузионной оболочкой, диаметр которой в 3-10 раз больше диаметра канала. В диффузионной оболочке происходит рекомбинация ионов, образовавшихся в результате термической ионизации в зоне канала разряда. Приэлектродный слой расположен между разрядной плазмой и поверхностью электрода. Он характеризуется высокими значениями напряжённости электрического поля. В этой зоне происходит ускорение электронов до энергий достаточных для ионизации молекул газа. Механизм горения ВЧФР обусловлен [2] процессами термической ионизации.

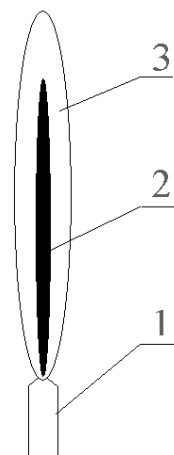


Рисунок 1.1 – ВЧ факельный разряд 1 – электрод; 2 – канал; 3 – диффузионная оболочка

При мощностях $W > 70$ Вт в случае возбуждения разряда с охлаждаемого электрода можно наблюдать, как правило, только ВЧФР. Поэтому при работе с достаточно мощными разрядами, используемых в прикладных и исследовательских целях, возбуждаемых при частоте $\nu > 10$ МГц, одноэлектродный разряд можно отождествить с ВЧФР.

Высокочастотный факельный разряд с момента его открытия и до настоящего времени исследовался преимущественно в следующих направлениях:

1. исследование влияния различных факторов (формы, материала электрода, рода плазмообразующего газа, величины подводимой мощности) на свойства высокочастотного факельного разряда [2-6, 9, 11, 12];
2. исследование характеристик плазмы ВЧФР (температуры тяжелых частиц, температуры и концентрации электронов, степени неравновесности плазмы разряда) [3, 9,10,11,13,14];
3. теоретические и экспериментальные исследования вопросов тепломассопереноса в плазме ВЧФР [4,12,15];

4. исследование амплитудно-модулированной плазмы ВЧФР [16-18];
5. изучение влияния внешних электрических полей на свойства и поведение ВЧФР [19-22];
6. исследование вопроса согласования ВЧФР с ВЧ генератором [24,25];
7. исследование электрических характеристик ВЧФР (напряжение горения, полный ток, емкость разряд-земля) [2, 14].

ВЧФР легко возбуждается в любой газовой среде (воздух, инертные газы, водород и т.д.) при давлениях $10^1 \div 5 \cdot 10^5$ Па. При давлениях более $3,3 \cdot 10^4$ Па разряд обычно имеет контрагированную форму, однако, при горении в газах с высокой теплопроводностью, его форма становится диффузной. Подобный режим горения разряда наблюдается при его возбуждении в среде водорода.

Контракция факельного разряда связана с его спектральными характеристиками. В частности, установлена корреляция между диаметрами областей излучения полос молекул NO и OH и диаметрами канала и диффузионной оболочки разряда, горящего в воздухе при атмосферном давлении. На рисунке 1.2 приведены зависимости диаметра областей излучения полос NO в зависимости от диаметра канала разряда и диаметра области излучения полос OH в зависимости от диаметра диффузионной оболочки. Как видно из рисунка излучение полос NO происходит в канале разряда, а излучение полос OH происходит как в канале, так и в диффузионной оболочке разряда.

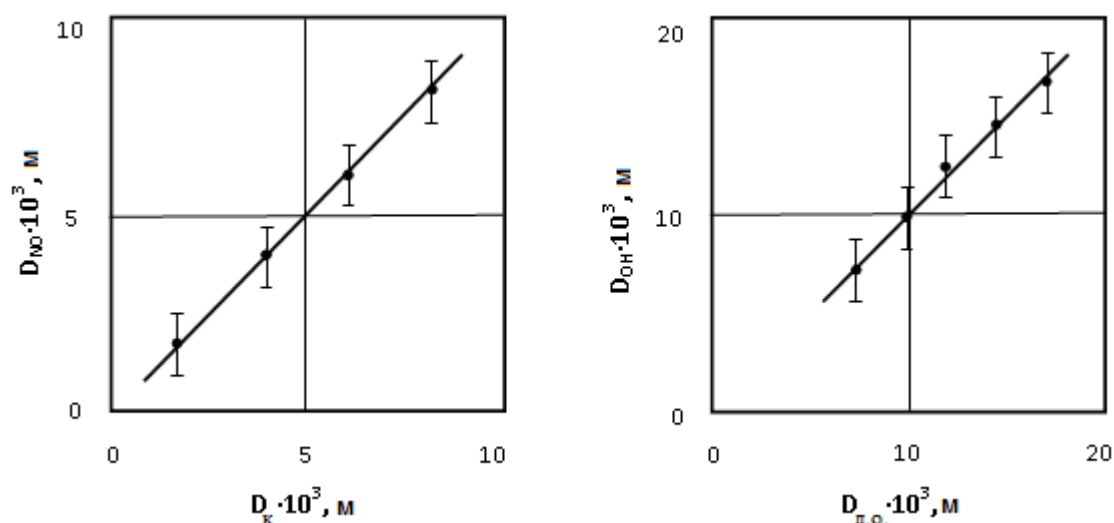


Рисунок 1.2 – Зависимости диаметров областей излучения молекул OH и NO от диаметров канала и диффузионной оболочки разряда соответственно

Таким образом, учитывая, что скорость ионизации зависит от энергии ионизации по экспоненциальному закону, можно предположить, что вклад молекул NO в баланс образования электронов в плазме разряда, является определяющим.

Из ранее проведённых экспериментальных исследований следует, что структура ВЧФР и его размеры определяются свойствами плазмообразующего газа, характером и уровнем вводимой в разряд мощности.

В таблице 1.1 и на рисунках 1.3 и 1.4 представлены основные результаты экспериментальных исследований свойств и особенностей ВЧФР, горящего в воздухе при атмосферном давлении.

В работе [11] показано, что с уменьшением частоты (при заданной мощности) увеличивается длина канала разряда и уменьшается температура плазмы.

Таблица 1.1

500-600	воздух	6-20	-	15-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20-200	воздух	12-100	0,25-0,35	0,3-3,6,6	-	3,3-4,3	-	0,01-0,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	воздух	31	-	-	-	3,8-4,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	азот	31	-	-	-	3,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	$10^{11}-10^{12}$
15-308	воздух	8,3	-	-	-	-	-	$4 \cdot 10^{-3}-3 \cdot 10^{-2}$	3,6-4,4	-	-	-	-	-	-	-	-
-	воздух	42	-	-	-	3,5	7,1	1,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-
500-600		35	-	-	-	0,9	7,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	$3,2 \cdot 10^{13}-1,5 \cdot 10^{14}$
500-600		35	-	-	-	-	7,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	$0,7 \cdot 10^{14}-1,9 \cdot 10^{14}$
100	гелий	24	-	-	-	0,9	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	$1,2 \cdot 10^{15}-3,0 \cdot 10^{15}$
-	воздух	-	-	-	-	3,8-4,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	азот	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	аргон	-	-	-	-	1,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	воздух	-	-	-	-	3,0-5,0	6,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	аргон	-	-	-	-	1,4-2,0	6,0-7,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	аргон	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
920	воздух	36	1,18	-	-	3,8	-	-	-	-	-	510	-	-	-	-	$7 \cdot 10^{11}$
1020	воздух	36	0,27	-	-	4,2	-	-	-	-	-	420	-	-	-	-	$5 \cdot 10^{12}$
800	CO ₂	36	0,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	$3 \cdot 10^{11}$
670	CO	36	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	$1,2 \cdot 10^{12}$
750	O ₂	36	0,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	$1,2 \cdot 10^{12}$
200-800	воздух	41	-	-	-	3,5-3,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	воздух	41	-	5,22	-	-	-	0,8-1,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
150-1000	воздух	-	0,06-0,18	3,1-2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16000	воздух	0,75	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

На рисунке 1.4 представлена зависимость длины канала разряда от частоты электромагнитного поля.

Из работы [11] следует, что вышеуказанная зависимость имеет логарифмический характер. В работе [26] предлагается использовать зависимость вида $L \sim \omega^{1/2}$, где L - длина канала разряда, ω - частота электромагнитного поля.

На сегодняшний день большое количество работ посвящено измерению температуры факельного разряда. В таблице 1.1 приведены значения температур канала ВЧФР, горящего в различных газах. Из данной таблицы видно, что род плазмообразующего газа и частота питающего разряда электромагнитного поля в значительной степени определяют газовую температуру ВЧФР. Газовая температура зависит также [11, 27] от мощности, вкладываемой в разряд и от частоты (рисунок 1.5 и рисунок 1.6). При горении в молекулярных газах температура ВЧФР составляет $(3...4,5) \cdot 10^3$ К. Электронная температура в этом случае незначительно отличается от температуры тяжёлых частиц. В случае же горения разряда в одноатомных газах его газовая температура составляет $(0,8...2,0) \cdot 10^3$ К. Электронная температура при этом значительно превышает газовую температуру. Так например, для аргона разница между электронной и газовой температурами составляет 5000...6000 К, а для гелия - десятки тысяч градусов.

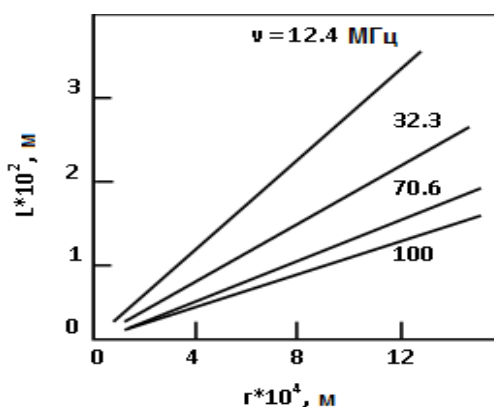


Рисунок 1.3 – Зависимость длины канала ВЧФР от радиуса разряда

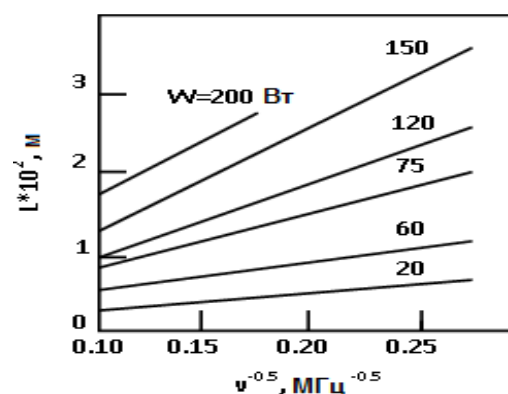


Рисунок 1.4 – Зависимость длины канала ВЧФР от частоты

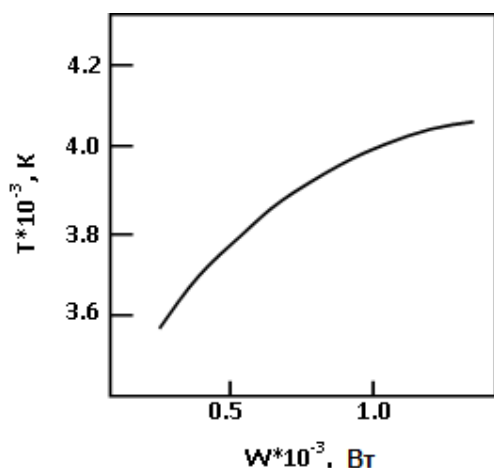


Рисунок 1.5 – Зависимость температуры в канале ВЧФР от мощности

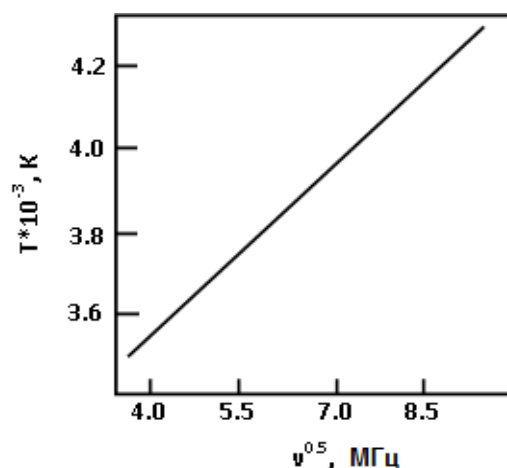


Рисунок 1.6 – Зависимость температуры ВЧФР от частоты поля ν

Такой разрыв температурных характеристик плазмы ВЧФР объясняется большой эффективностью передачи энергии от электронов к тяжелым частицам в молекулярных газах по сравнению с атомарными. Однако если добавить к атомарному газу небольшую часть молекулярного газа, то температура ВЧФР горящего в этой смеси значительно увеличится [4,6]. В работе [28] проводились измерения температуры диффузионной оболочки ВЧФР, горящего в атмосферном воздухе, значения температуры составили 2200-2500К.

В молекулярных газах увеличение мощности разряда приводит к уменьшению разрыва между электронной и газовой температурами [29]. На рисунке 1.7 представлена зависимость электронной и газовой температур ФР, горящего в воздухе, от давления. Из рисунка видно, что с ростом давления, а следовательно и частоты столкновений электронов с молекулами воздуха, изотермия плазмы уменьшается.

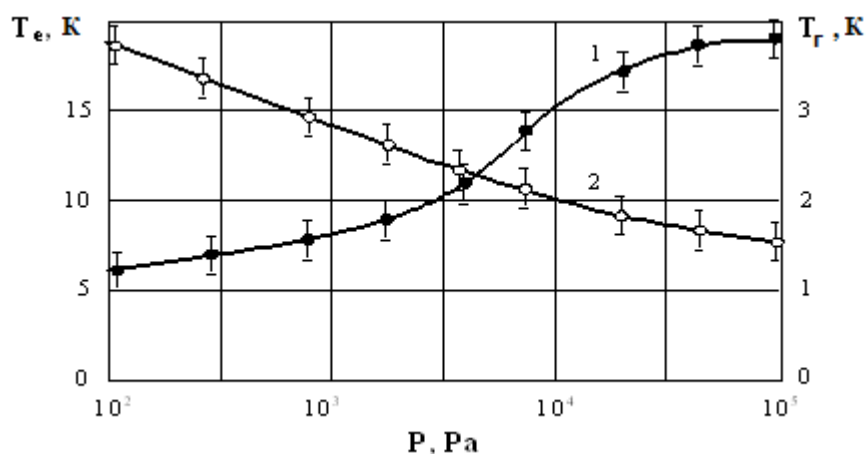


Рисунок 1.7 – Зависимость электронной и газовой температур ВЧФР от давления [29]

Приведённые в таблице 1.1 значения электронных и газовых температур были получены различными авторами на различных расстояниях от высокочастотного электрода. Плазма же ВЧФР неоднородна, как в радиальном, так и в осевом направлениях. Поэтому результаты различных авторов могут довольно значительно отличаться друг от друга.

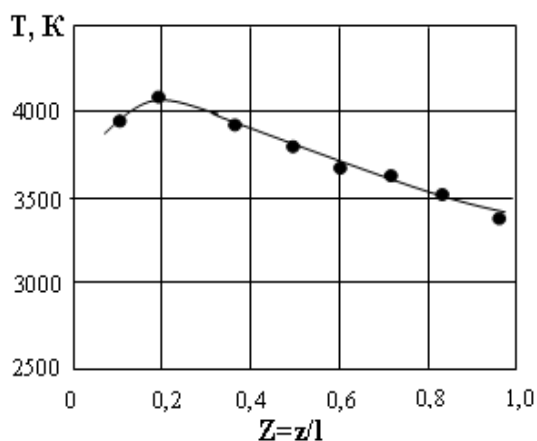


Рисунок 1.8 – Осевое распределение газовой температуры ВЧФР в воздухе [27]

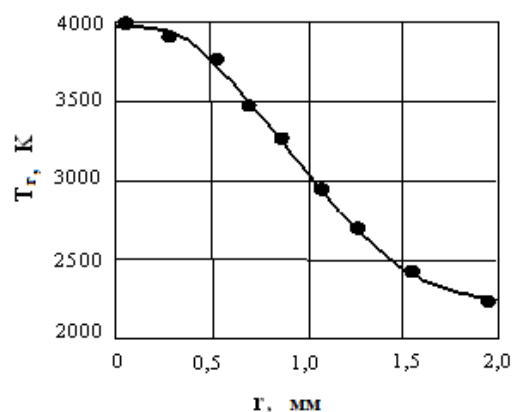


Рисунок 1.9 – Радиальное распределение газовой температуры ВЧФР в воздухе [27]

Измерения осевого и радиального распределения температур факельного разряда проводились лишь в небольшом количестве работ. В

работах [27, 30] показано, что изменение газовой температуры вдоль оси факельного разряда, горящего в воздухе, незначительно, и составляет 300...500К. Типичное осевое распределение газовой температуры ВЧФР представлено на рисунке 1.8. На этом рисунке осевая координата приведена в единицах длины канала 1 ВЧФР. Радиальное же изменение температур воздушной плазмы разряда, напротив, является довольно существенным (рисунок 1.9)

Распределение электронной температуры разряда аналогично распределению газовой температуры. На рисунке 1.10 приведено радиальное распределение электронной температуры в воздушной (кривая 1) и азотной (кривая 2) плазме [29], откуда видно, что воздушная плазма факельного разряда более контрагирована, что по-видимому обусловлено наличием плазмохимических реакций, связанных с образованием молекул NO, а также присутствием молекул O₂, обладающих значительным сечением захвата электронов. Присутствие молекул электроотрицательных газов существенно увеличивает контракцию разряда.

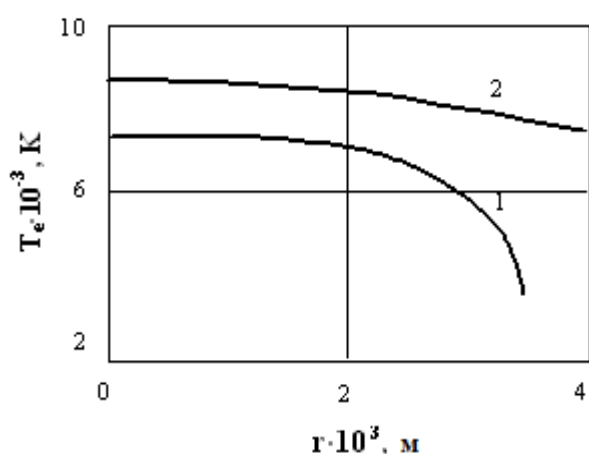


Рисунок 1.10 – Радиальное распределение электронной температуры ВЧФР.

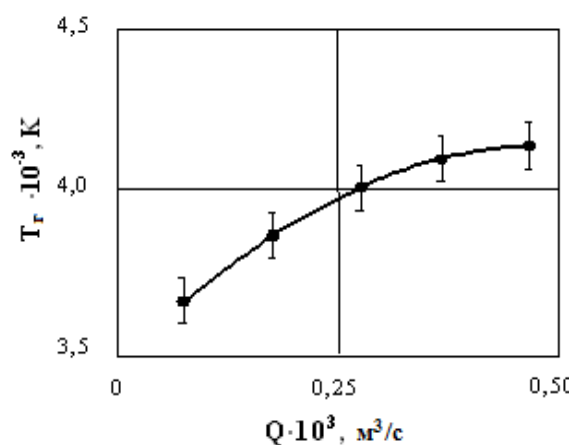


Рисунок 1.11 – Зависимость газовой температуры ВЧФР в воздухе от скорости прокачки газа

Заметим, что рассмотренные выше физические особенности высокочастотного факельного разряда относятся преимущественно к

разрядам малой мощности, с длиной канала не более нескольких сантиметров. В частности, это относится к определению ёмкости и активного сопротивления, а также к осевому распределению температуры разряда.

Впервые исследование электродинамики факельного разряда провел Mollwo [33], на основе уравнений Максвелла. ФР возбуждался на частоте гигагерца и имел мощность 50-100 Вт. Mollwo использовал результаты работы [34], в которой анализируется процесс распространения электромагнитной волны вдоль однородного проводящего цилиндра бесконечной длины. Впоследствии Качанов [8] использовал подход Mollwo для описания электрофизических особенностей ВЧФР, горящего на частоте десятки мегагерц и имеющего мощность 0,1 – 1,0 кВт. Согласно данной модели ВЧФР канал разряда рассматривается в виде однородного проводящего цилиндра вдоль которого распространяется поперечно-магнитная (ТМ) волна. Амплитуда этой волны затухает вдоль оси разряда по экспоненциальному закону:

$$U = U_0(r)e^{j(hz - \omega t)} \quad (1.1)$$

Здесь U – амплитуда электромагнитной волны; h – волновое число; ω – угловая частота; t – время; z и r – соответственно осевая и радиальная координаты.

При анализе процесса распространения электромагнитной волны вдоль ВЧФР наибольшее значение имеет определение волнового числа $h = \alpha j + \beta$, где α – коэффициент, характеризующий затухание электромагнитной волны в плазме разряда, β – коэффициент фазы ($2\pi\beta^{-1} = \lambda$ – длина электромагнитной волны в плазме разряда). В работе [26] величина волнового числа определена следующим образом:

$$h_0^2 \approx -\frac{2}{5a^2\epsilon_1}; \quad \alpha = -\beta \quad (1.2)$$

Здесь: a - радиус канала ВЧФР, ε_1 - комплексная диэлектрическая проницаемость плазмы разряда ($\varepsilon_1 \approx j\sigma/\omega$).

Конечная величина проводимости канала разряда обуславливает не только затухание, но и замедление электромагнитной волны. При замедлении электромагнитной волны ее длина становится сопоставимой с длиной канала разряда. Этот факт является основным положением, обуславливающим использование точного электродинамического анализа при описании ВЧФР.

Модель высокочастотного факельного разряда, предложенная авторами работ [8, 33] была экспериментально проверена [26] путем измерения распределения амплитуды и фазового сдвига высокочастотного тока вдоль оси разряда. ВЧФР возбуждался внутри цилиндрического блока, собранного из поясов Роговского (рисунок 1.12), причем корпуса поясов Роговского заземлялись. Таким образом, в работе [26] рассматривалось горение экранированного факельного разряда. Для экранированного ВЧФР теми же авторами получено следующее выражение для волнового числа, которое, как показывают расчеты [35] незначительно отличается от волнового числа, соответствующему случаю свободного горения разряда.

$$h^2 \approx -\frac{2}{a_1^2 \varepsilon_1 \ln a_2/a_1}, \quad (1.3)$$

где a_2/a_1 - отношение радиуса разрядной камеры к радиусу канала разряда.

При этом: $\text{Re } h/\text{Re } h_0 \approx 1-1,3$; $\text{Im } h/\text{Im } h_0 \approx 1,2-1,5$. Результаты измерений распределения амплитуды и фазового сдвига высокочастотного тока вдоль оси ВЧФР представлены на рисунках 1.13 и 1.14. Как видно из представленных рисунков амплитуда высокочастотного тока затухает вдоль канала разряда по закону близкому к экспоненциальному. Фазовый сдвиг изменяется по линейному закону почти по всей длине канала

разряда, за исключением зоны, где канал разряда заканчивается. Следовательно, результаты данных измерений подтвердили предположение, высказанное в работах [8,33], о поддержании процесса горения высокочастотного факельного разряда плоской, неоднородной электромагнитной волной, амплитуда которой описывается выражением (1.1).

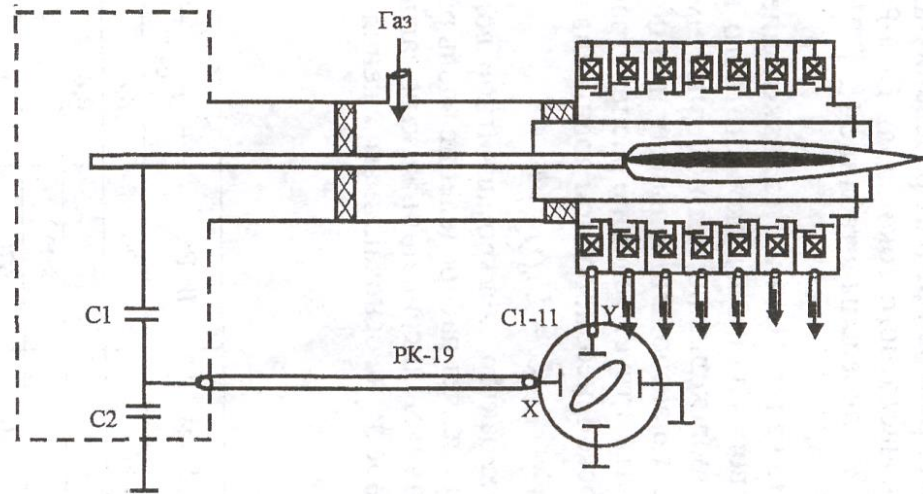


Рисунок 1.12 – Схема экспериментальной установки

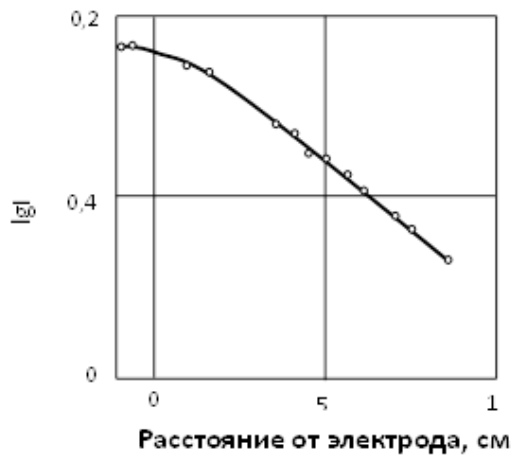


Рисунок 1.13 – Осевое распределение амплитуды высокочастотного тока ВЧФР



Рисунок 1.14 – Осевое изменение фазового сдвига ВЧФР

Более позднее моделирование характеристик факельного разряда на основе вышеуказанной электродинамической модели проведено в работе [9]. В этой работе были рассчитаны различные характеристики разряда в широком частотном диапазоне с учётом отклонения состояния разрядной плазмы от состояния термодинамического равновесия. В частности, была определена длина канала разряда в зависимости от его мощности, и распределение газовой температуры вдоль оси разряда. Результаты расчётов для случая факельного разряда, горящего в воздухе на частоте $\nu = 22,8$ МГц в разрядной камере радиусом 1,6 см, представлены [частное сообщение] на рисунках 1.15 и 1.16.

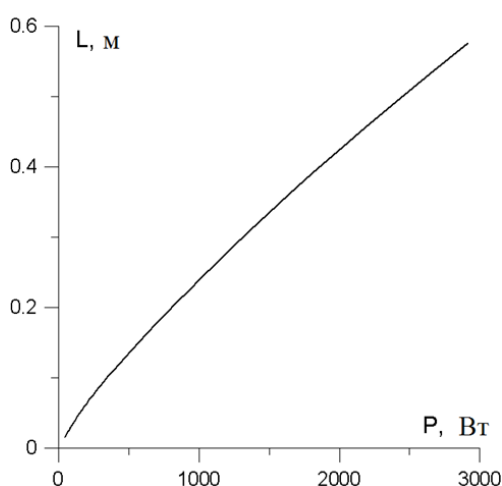


Рисунок 1.15 – Зависимость длины канала ВЧФР от мощности

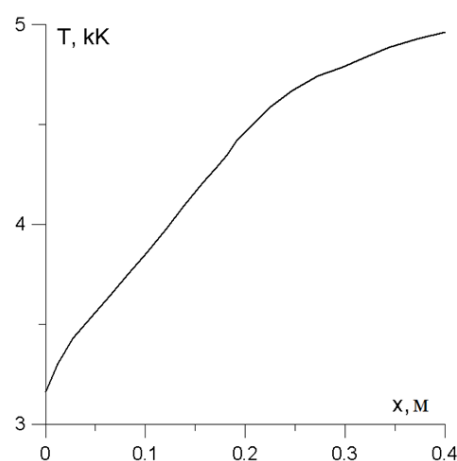


Рисунок 1.16 – Рассчитанное осевое распределение газовой температуры ВЧФР

Заметим, что в соответствии с результатами этих расчётов длина канала линейно зависит от мощности разряда. При этом наблюдается существенное изменение концентрации электронов и газовой температуры разряда вдоль его оси. Если результаты по определению длины канала разряда хорошо согласуются с экспериментальными данными, то полученный при моделировании существенный осевой градиент температуры не соответствует действительности. В соответствии с

экспериментальными результатами [27] изменение температуры вдоль оси разряда не превышает 10...15% от максимального значения температуры.

Итак, проведенный нами анализ показывает, что существующая на настоящее время электродинамическая модель ВЧФР имеет существенные расхождения с экспериментом и, вследствие этого, может быть использована лишь при оценочных расчетах.

На сегодняшний день теплофизические характеристики высокочастотного факельного разряда, горящего в молекулярном и атомарном газах изучены достаточно широко. Однако разряд, горящий в смеси атомарного и молекулярного газов не был изучен в достаточной мере. В литературе представлены различные результаты на тему влияния концентрации молекулярного газа в смеси с атомарным на характеристики разрядной плазмы. В связи с этим невозможно проводить достаточно обоснованный расчёт конструкций высокочастотных факельных плазмотронов, использующих смесь аргона с воздухом в качестве плазмообразующего газа.

Глава 2. Определение характеристик плазмы факельного разряда, горящего в смеси атомарного и молекулярного газов

2.1 Определение электронной температуры высокочастотного факельного разряда, горящего в смеси атомарного и молекулярного газов

2.1.1 Схема экспериментальной установки

При измерении электронной и газовой температуры высокочастотного факельного разряда использовалась лабораторная установка, представленная ниже.

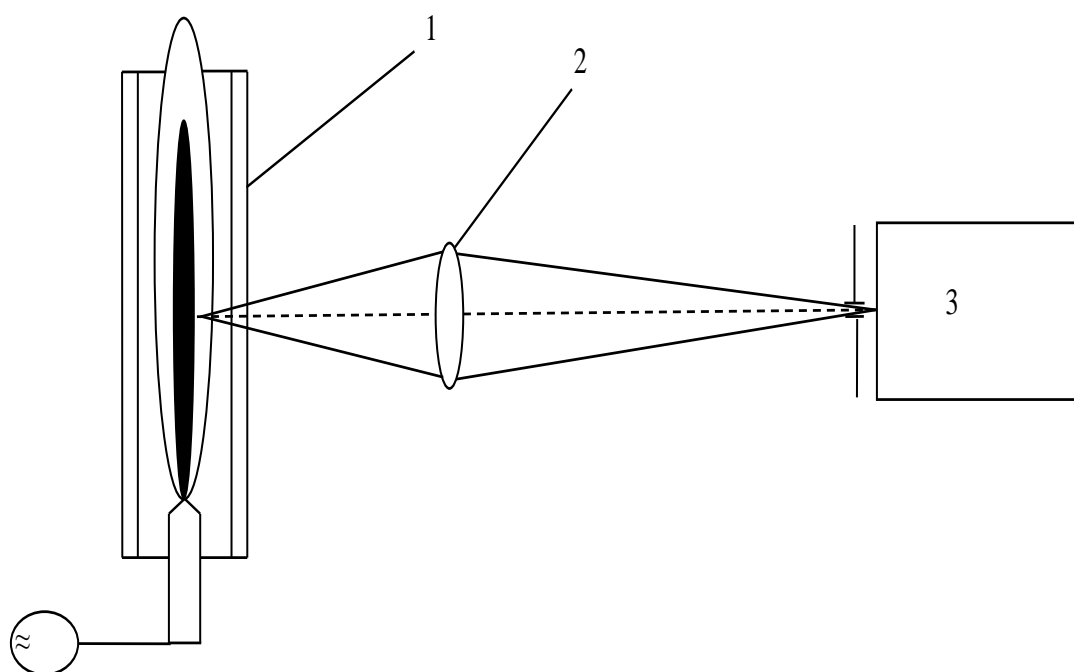


Рисунок 2.1.1 – Схема экспериментальной установки

1 – ВЧ факельный разряд; 2 – линза; 3 – спектрограф Shamrock 303i

На данной установке исследовался высокочастотный факельный разряд, мощность которого варьировалась от 0,6 до 1,6 кВт. Разряд возбуждался в кварцевой трубке длиной 50 см и диаметром 28 мм на частоте 37 МГц и горел в смеси молекулярного и атомарного газов. В качестве одноатомного газа использовался аргон, а в качестве молекулярного газа – воздух. Измерения температурных характеристик

производилось для смесей с различным содержанием воздуха (10%, 20% и 30%). Посредством линзы, излучение изучаемого разряда проецировалось на щель спектрографа Shamrock 303i.

На экран компьютера выводился полученный спектр. Время экспозиции спектра варьировалось от 0,5 до 1,5 секунды. Ширина щели используемого спектрографа составляла 0,3 мм. Для того чтобы снизить влияние собственных шумов ПЗС камера охлаждалась до температуры -50 °С. Перед каждым измерением проводилось измерение фона, который позже вычитался из полученных результатов. Величина фона составляла 3..5% от величины полезного сигнала.

Для проведения измерения температурных характеристик факельного разряда, горящего в смеси аргон - воздух, предварительно была проведена градуировка ротаметров. Результаты градуировки ротаметра марки РМ – 0,63 для воздуха и аргона приведены на рисунках 2.1.2. и 2.1.3. Калибровка проводилась с использованием газовых часов.

Как видно из рисунков наибольший расход газа происходит при использовании аргона. Наименьший расход газа – при использовании воздуха.

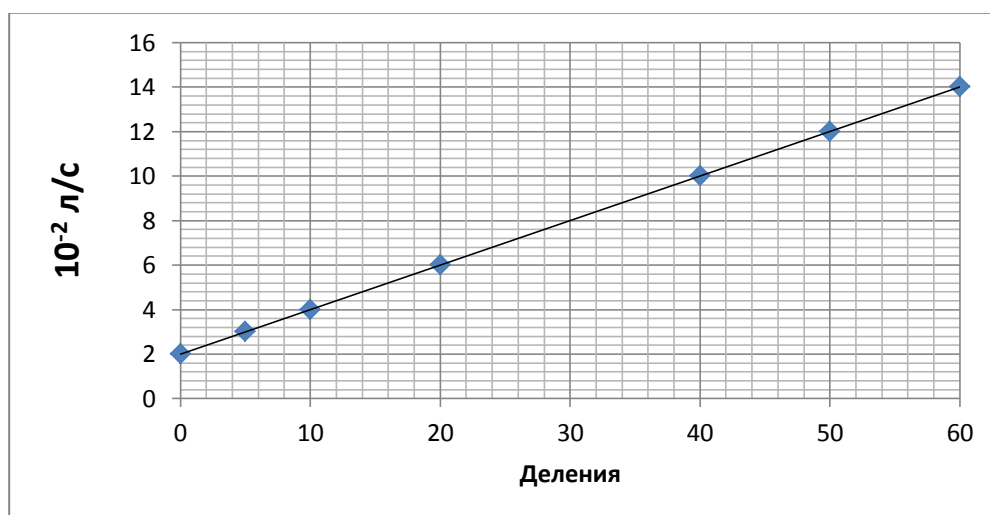


Рисунок 2.1.2 – Калибровочный график ротаметра РМ – 0,63 для воздуха

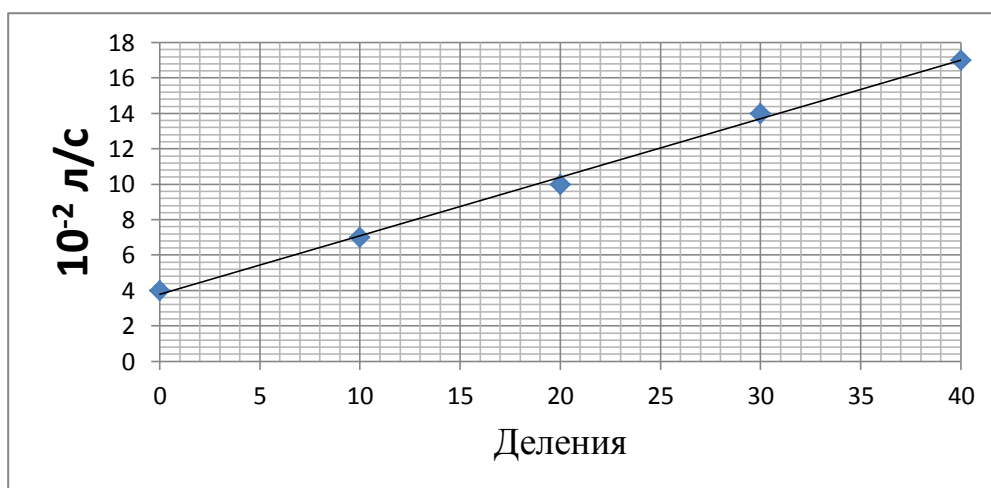


Рисунок 2.1.3 – Калибровочный график ротаметра РМ – 0,63 для аргона

2.1.2 Результаты измерений

Измерение электронной температуры проводилось спектральным методом по относительной интенсивности линий меди. Обеспечение паров меди в плазме разряда происходило путем испарения материала поверхности медного электрода. Были выбраны следующие линии меди: 5106Å, 5153Å и 5218 Å.

Согласно [39] электронная температура определяется по формуле:

$$T_e = \frac{5040(E_l - E_k)}{\left[\lg\left(\frac{J_{ki}}{J_{lm}}\right) + \lg\left(\frac{P_{lm}}{P_{ki}}\right) \right]} = 5040(E_l - E_k) / \left[\lg\left(\frac{J_{ki}}{J_{lm}}\right) + \lg\left[\frac{A_{lm}g_m\lambda_{ki}}{A_{ki}g_k\lambda_{lm}}\right] \right] \quad (2.1.1)$$

В таблице 2.1.1 представлены характеристики линий меди, наблюдаемые в диапазоне от 5000 до 5300Å, где λ – длина волны, E – энергия возбужденного состояния, $(Agv)_i$ – произведение относительной вероятности перехода, частоты спектральной линии и статистического веса возбужденного состояния.

Таблица 2.1.1

Линия меди	λ , Å	E , эВ	$(Agv)_i$
1	5106	3,8	36,7
2	5153	6,16	1164
3	5218	6,16	2080

Расчет электронной температуры производился на основе полученных спектров, с помощью формулы:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{(Agv)_1}{(Agv)_2} \cdot e^{-\frac{E_1-E_2}{kT}} \quad (2.1.2)$$

В нашем случае формула (2.2.6) примет вид:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{(Agv)_1}{(Agv)_2} \cdot e^{-\frac{E_1-E_2}{kT}} \quad (2.1.3)$$

Прологарифмировав формулу, получили:

$$T = \frac{E_1-E_2}{k \cdot \ln \frac{I_1(Agv)_2}{I_2(Agv)_1}} \quad (2.1.4)$$

где k – постоянная Больцмана; E_1, E_2 – энергетические уровни; A – вероятность спонтанных переходов; ν – частота.

Электронная температура определялась для 3х смесей аргон – воздух с 10, 20 и 30 процентным содержанием воздуха. На рисунках 2.1.4, 2.1.5, 2.1.6 представлены спектры для соответствующих смесей.

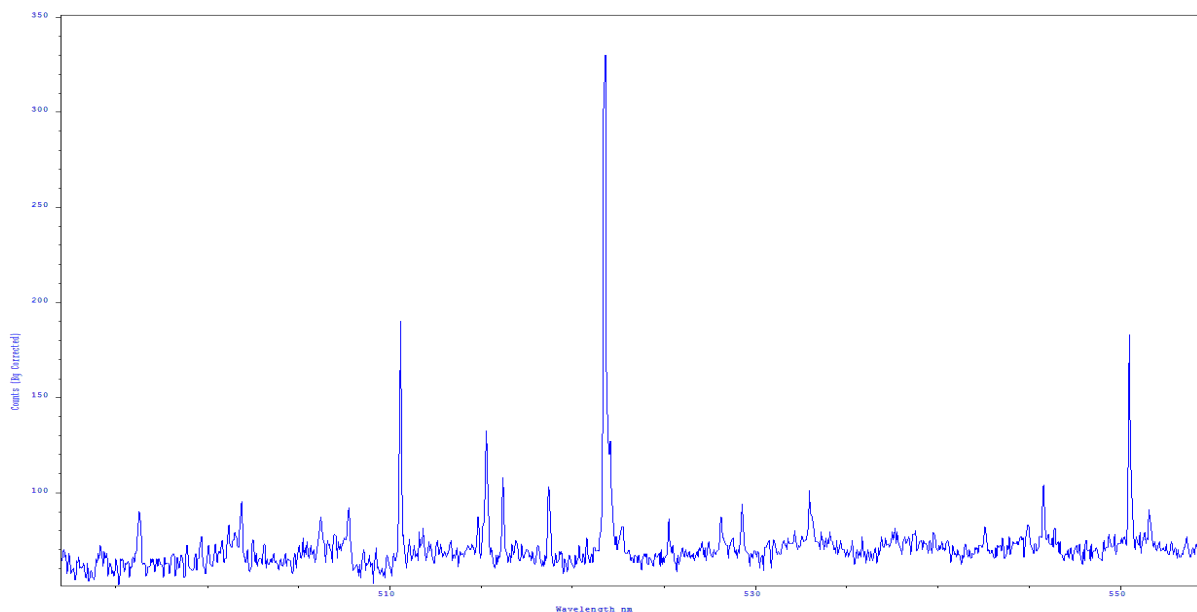


Рисунок 2.1.4 – Спектр аргон - воздушной плазмы с 10% содержанием воздуха

Для определения электронной температуры плазмы, горящей в заданной смеси, из данного спектра выбираем пики с длинами волн 5106 и

5153, а также соответствующие значения констант из таблицы 2.1.1 и подставляем значения в формулу 2.1.4.

$$T_e = \frac{E_1 - E_2}{k \cdot \ln \frac{I_1(Agv)_2}{I_2(Agv)_1}} = \frac{(6,16 - 3,18) * 1,6^{-19}}{1,38 * 10^{-23} \cdot \ln 0 \frac{195}{115} * \frac{36,7}{1164}} = 6866 \text{ K}.$$

Для смесей с 20% и 30% содержанием воздуха аналогично рассчитываем T_e .

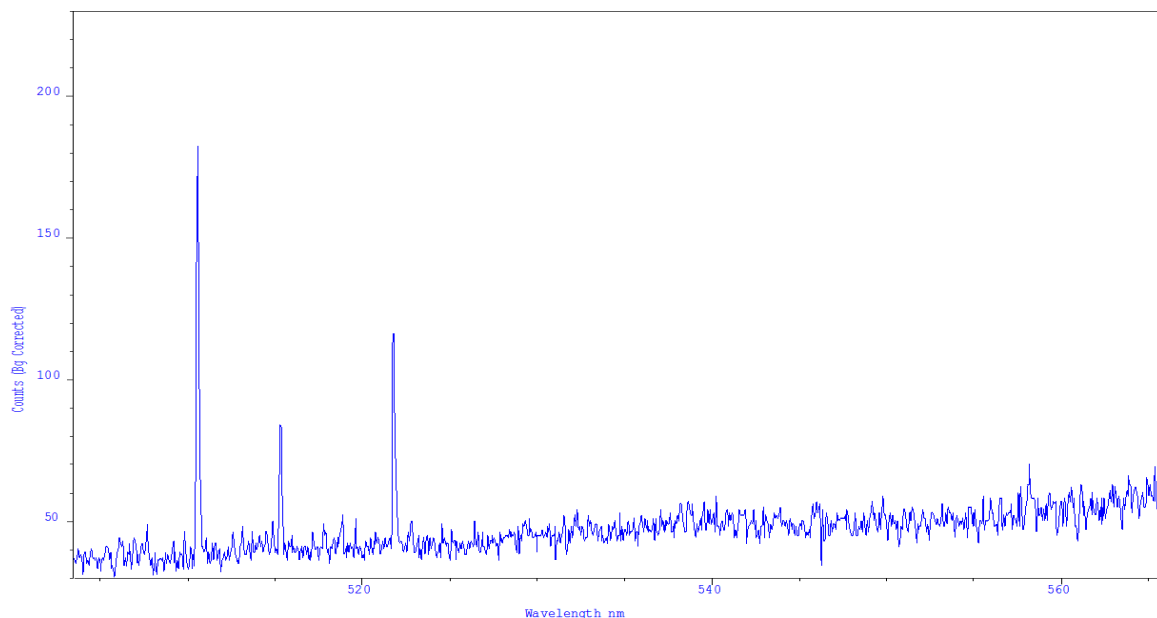


Рисунок 2.1.5 – Спектр аргон - воздушной плазмы с 20% содержанием воздуха

$$T_e = \frac{E_1 - E_2}{k \cdot \ln \frac{I_1(Agv)_2}{I_2(Agv)_1}} = \frac{(6,16 - 3,18) * 1,6^{-19}}{1,38 * 10^{-23} \cdot \ln 0 \frac{182}{81} * \frac{36,7}{1164}} = 6413 \text{ K}.$$

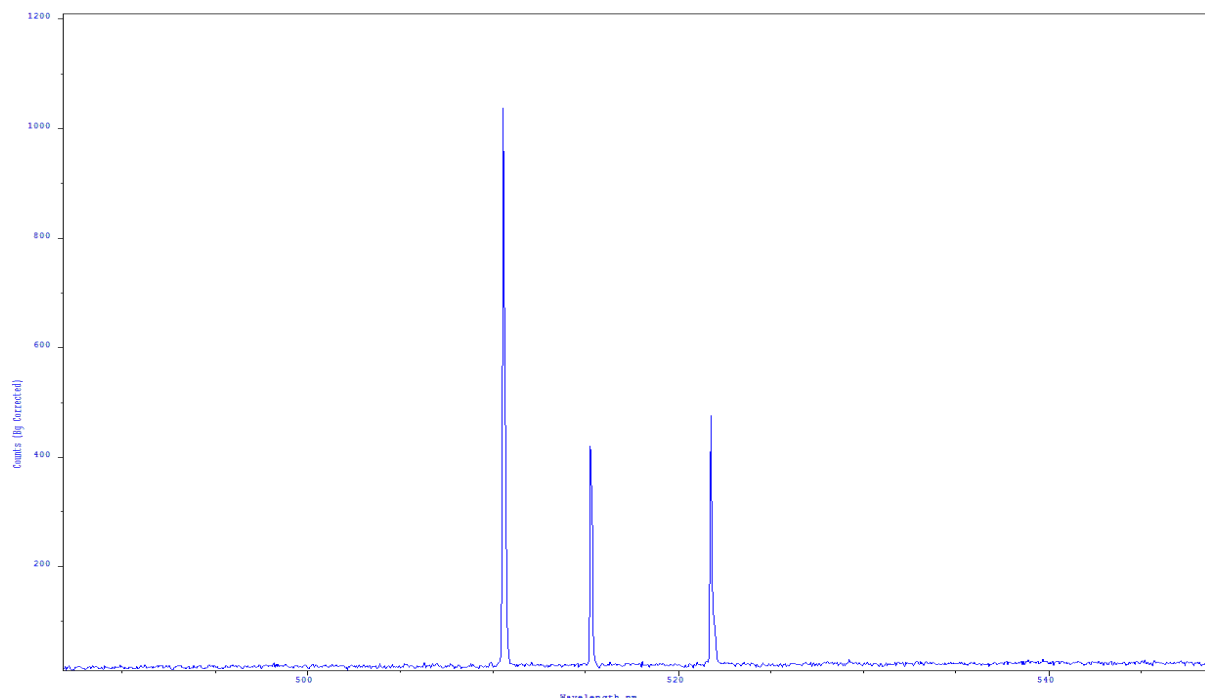


Рисунок 2.1.6 – Спектр аргон - воздушной плазмы с 30% содержанием воздуха

$$T_e = \frac{E_1 - E_2}{k \cdot \ln \frac{I_1(AgV)_2}{I_2(AgV)_1}} = \frac{(6,16 - 3,18) \cdot 1,6^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot \ln 0 \frac{1038}{415} \frac{36,7}{1164}} = 6256 \text{ K.}$$

Полученные данные объединили в таблицу 2.1.2.

Таблица 2.1.2

Содержание воздуха, %	10	20	30
T_e , К	6866,486	6413,447	6256,227

Также были определены значения электронной температуры в промежуточных точках с 5%, 15% и 25% содержанием воздуха в смеси.

На основе рассчитанных данных было получено распределение электронной температуры аргон – воздушной плазмы в зависимости от содержания воздуха. Зависимость представлена на рисунке 2.1.7.

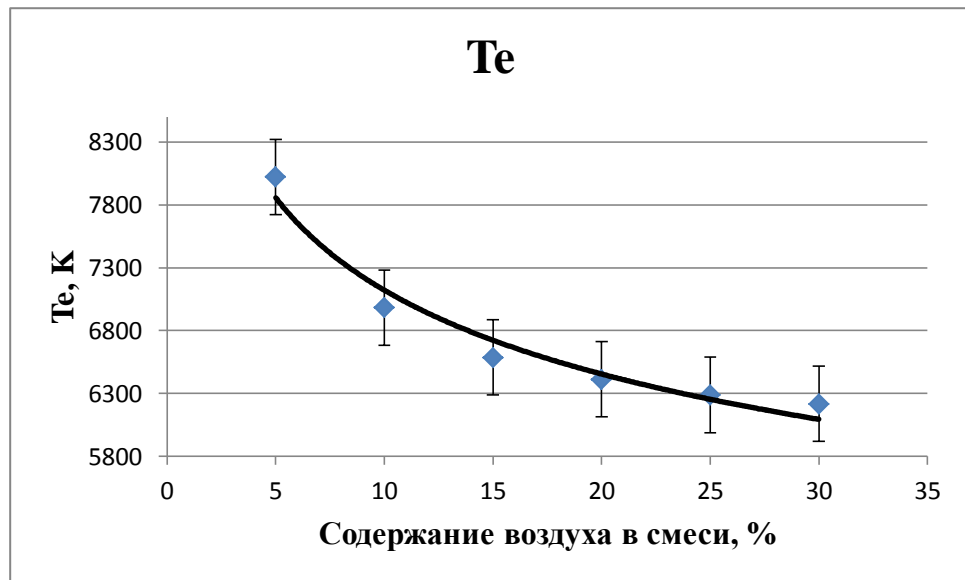


Рисунок 2.1.7 – Зависимость электронной температуры в смеси аргон – воздух при различных концентрациях воздуха в плазме

Из рисунка 2.1.7 следует, что при увеличении доли молекулярного газа в атомарном газе электронная температура нелинейно уменьшается. Однако при достижении концентрации воздуха в смеси 20% резкий спад прекращается. Дальнейшее увеличение доли молекулярной компоненты можно описать монотонным и линейным уменьшением электронной температуры.

2.2 Определение газовой температуры высокочастотного факельного разряда, горящего в смеси атомарного и молекулярного газов

2.2.1 Методика измерения газовой температуры

Измерение газовой температуры проводилось по относительной интенсивности вращательных переходов молекулярной полосы гидроксила 3064 \AA . Использовались линии колебательной ветви Q_1 . Выбирались линии свободные от наложения других линий – Q_{14} , Q_{16} , Q_{19} , Q_{10} . Излучение от исследуемого объема разряда посредством линзы проецировалось на щель спектрографа MSDD с более высокой разрешающей способностью. На

экран компьютера выводился полученный спектр. Время экспозиции спектра варьировалось от 0,5 до 1,5 секунды. Ширина щели используемого спектрографа составляла 0,3 мм. Для того чтобы снизить влияние собственных шумов ПЗС камера охлаждалась до температуры -50 °С. Перед каждым измерением проводилось измерение фона, который позже вычитался из полученных результатов.

Газовая температура разряда соответствует распределению интенсивностей в молекулярной полосе [38]. Для вращательных термов молекул ОН в возбужденном состоянии ${}^2\Sigma$ интенсивности I_n определяются как:

$$0,095 \lg \frac{I_n}{i} = 0,095 \lg a - K(K + 1) \frac{1}{T} \quad (2.2.1)$$

$$K = 0,1,2, \dots, J = K \pm 1/2$$

где, J – вращательное квантовое число возбужденного состояния, i – фактор интенсивности вращательной линии, a – постоянная величина.

В нашем случае для вычисления газовой температуры удобное принять выражение вида:

$$0,1 \lg \frac{I_n}{i} = 0,1 \lg a - K(K + 1) \frac{1}{T} \quad (2.2.2)$$

Если зависимость $\lg - f[K(K + 1)]$ представляет собой прямую линию, то система находится в термодинамическом равновесии (больцмановское распределение) и тангенс угла наклона этой линии будет равен $1/T$.

Экспериментально было установлено, что при большом числе линий на узком участке спектра в полосе λ 3064 Å наиболее удобна для работы ветвь Q_1 . В таблице 2.2.1 приведены квантовые числа K , факторы интенсивности i и длины волн линий ветви Q_1 [37].

В таблице 2.2.1 приведены длины волн линий ветви Q_1 , факторы интенсивности i и квантовые числа K .

Таблица 2.2.1. Факторы интенсивностей полосы ОН λ 3064 Å [56]

K	J	K(K+1)	λ	i
4	9/2	20	3083,262	2,100
6	13/2	42	3087,326	3,16
9	19/2	90	3095,329	4,73
10	21/2	110	3098,575	5,16

2.2.2 Результаты измерений

В результате проведенных экспериментов были получены молекулярные спектры полос гидроксила 3064Å для смесей аргон – воздух с различной концентрацией воздуха в плазмообразующем газе. Спектры представлены на рисунках 2.2.1, 2.2.3 и 2.2.5. На основе данных спектров рассчитана газовая температура и построен график зависимости газовой температуры от содержания воздуха в плазмообразующем газе.

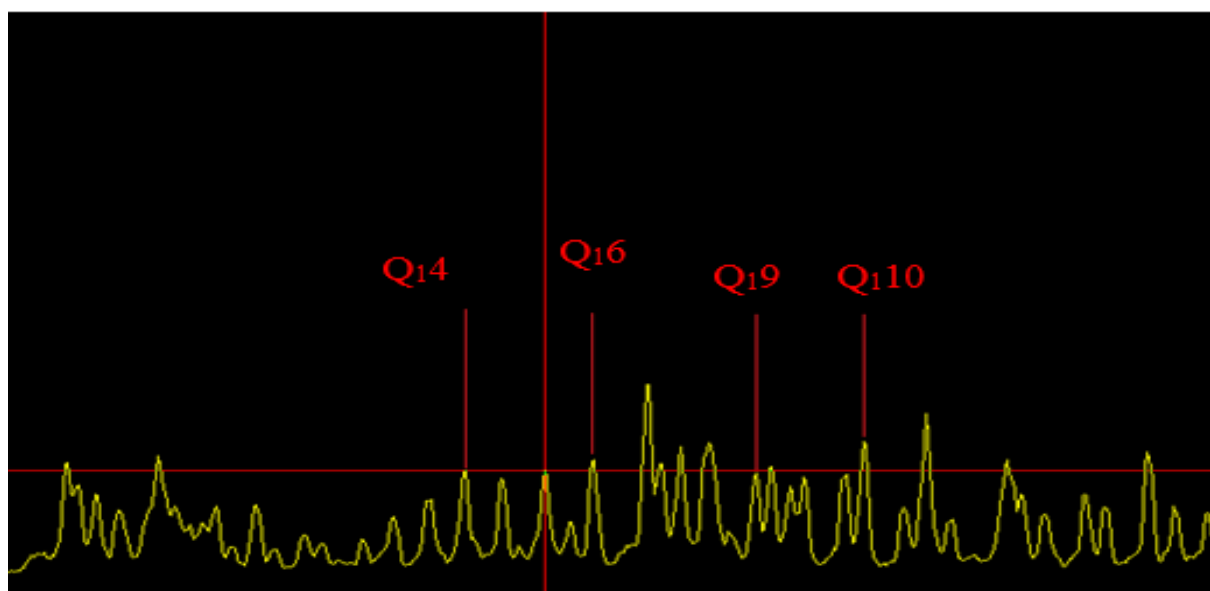


Рисунок 2.2.1 – Спектр полос гидроксила в плазме аргон – воздух с 10% содержанием воздуха

Таблица 2.2.2 Экспериментальные данные для плазмы с 10% содержанием воздуха

Линии гидроксила	K(K+1)	0,1lg(I/i)
Q14	20	0,231
Q16	42	0,221
Q19	90	0,211
Q110	110	0,191

По данным из таблицы 2.2.2 строим кривую. По тангенсу угла наклона данной кривой определяем газовую температуру.

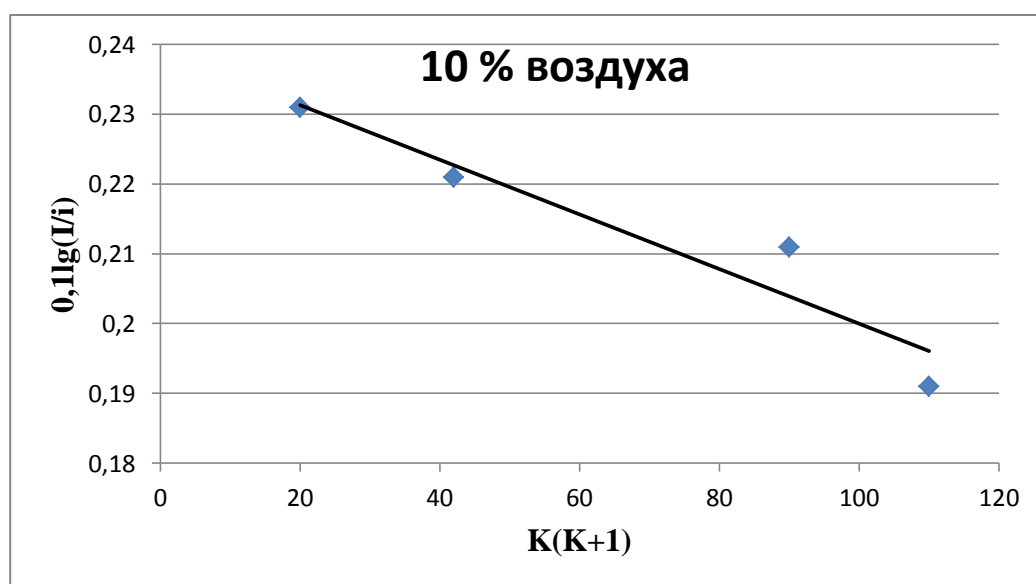


Рисунок 2.2.2 – Графическое определение газовой температуры факельного разряда для смеси аргон – воздух с 10% содержанием воздуха

$$T_{\Gamma} = \frac{110 - 20}{0,231 - 0,191} = 2250 \text{ K}$$

Аналогичным образом была определена газовая температура для смесей с 20% и 30% содержанием воздуха в плазмообразующем газе.

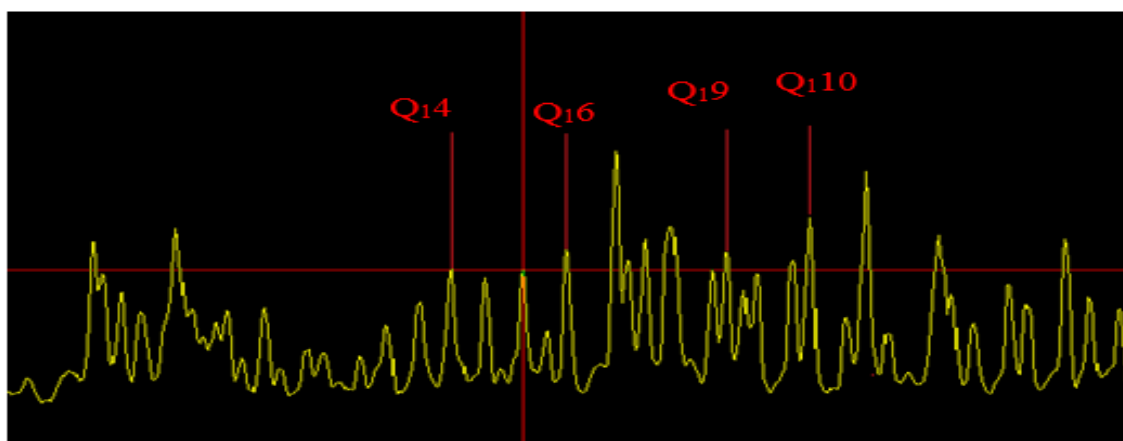


Рисунок 2.2.3 – Спектр полос гидроксила в плазме аргон – воздух с 20% содержанием воздуха

Таблица 2.2.3 Экспериментальные данные плазмы с 20% содержанием воздуха

Линии гидроксила	$K(K+1)$	$0,1lg(I/i)$
Q14	20	0,217
Q16	42	0,206
Q19	90	0,199
Q110	110	0,181

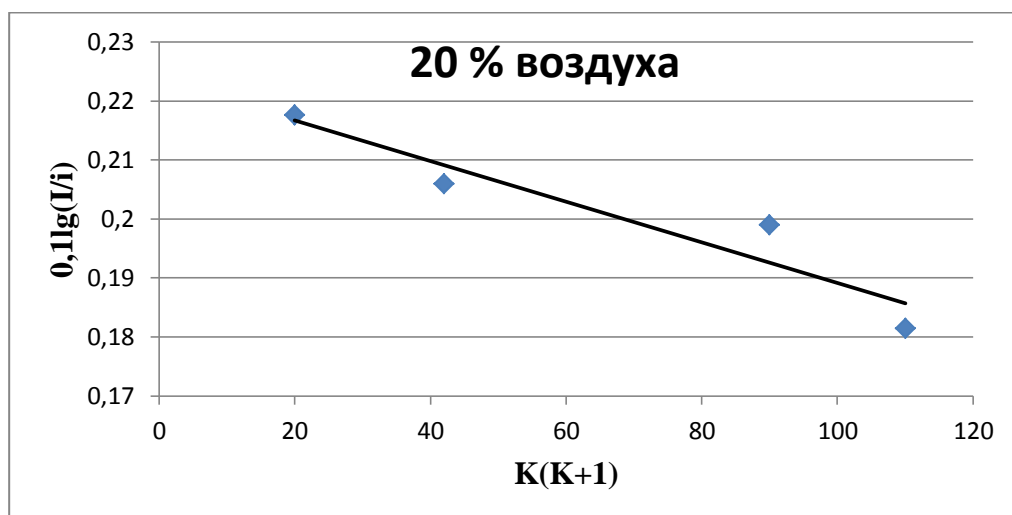


Рисунок 2.2.4 – Графическое определение газовой температуры факельного разряда для смеси аргон – воздух с 20% содержанием воздуха

$$T_r = \frac{110 - 20}{0,217 - 0,181} = 2493 \text{ K}$$

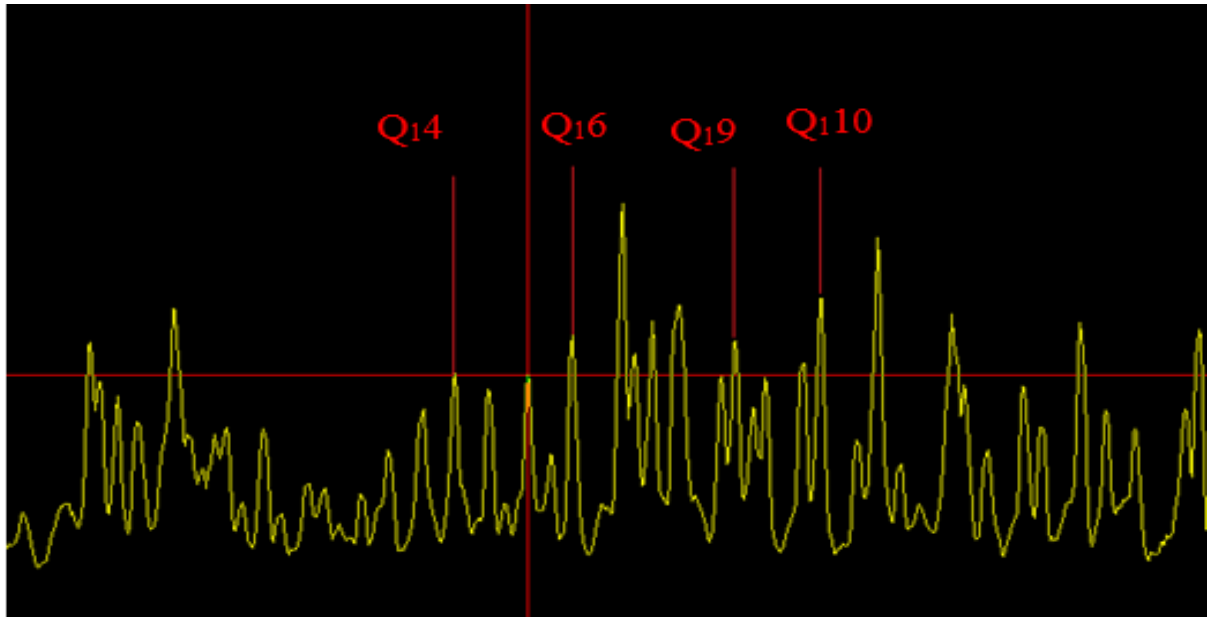


Рисунок 2.2.5 – Спектр полос гидроксила в плазме аргон – воздух с 30% содержанием воздуха

Таблица 2.2.4 Экспериментальные данные плазмы с 30% содержанием воздуха

Линии гидроксила	$K(K+1)$	$0,11g(I/i)$
Q14	20	0,246
Q16	42	0,233
Q19	90	0,221
Q110	110	0,211

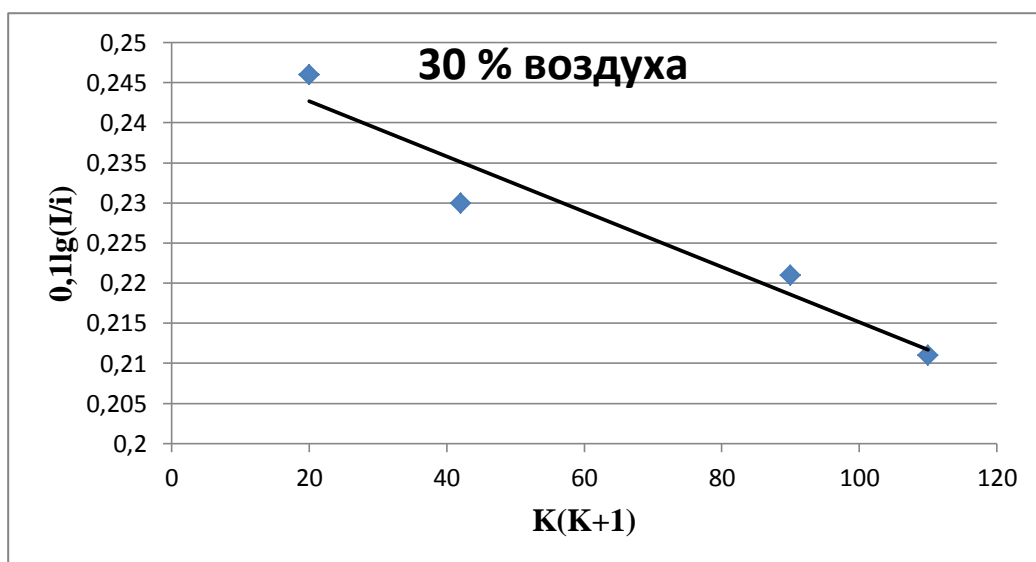


Рисунок 2.2.6 – Графическое определение газовой температуры факельного разряда для смеси аргон – воздух с 30% содержанием воздуха

$$T_{\Gamma} = \frac{110 - 20}{0,246 - 0,211} = 2571 \text{ K}$$

Также были рассчитаны значения с промежуточными значениями концентрации воздуха (5%, 15% и 25%) в смеси.

По рассчитанным значениям газовой температуры получили ее зависимость от концентрации воздуха в плазмообразующем газе.

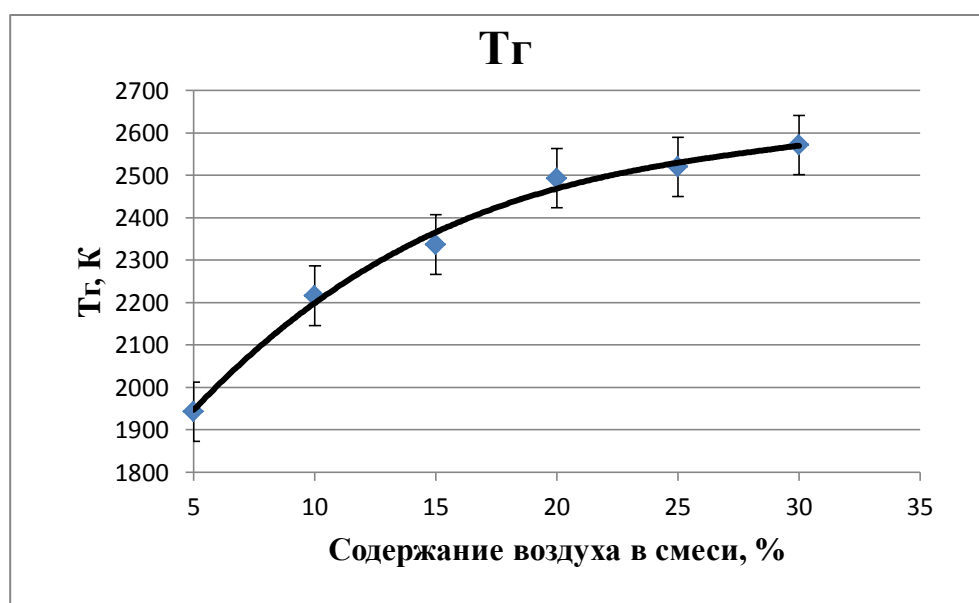


Рисунок 2.2.7 – Зависимость газовой температуры в смеси аргон – воздух при различных концентрациях воздуха в плазме

Из данного графика можно сделать вывод, что газовая температура факельного разряда при увеличении концентрации молекулярного газа (воздуха) в смеси с атомарным газом (аргоном) монотонно возрастает. При этом, как следует из рисунков 2.2.7 и 2.1.7 разрыв между электронной и газовой температурами уменьшается, и можно сделать вывод что, плазма разряда становится более равновесной.

2.3 Определение удельной электропроводности плазмы разряда

Для определения удельной электропроводности используются ранее измеренные нами значения газовой и электронной температур. Согласно результатам работы [36] удельная электропроводность определяется с помощью отношения электронной к газовой температуре:

$$\theta = \frac{T_e}{T_r} \quad (2.3.1)$$

Так для смеси с 10% содержанием воздуха $\theta = 3,1$.

После нахождения θ определяется кривая (рисунок 2.3.1) по которой находится значение удельной электропроводности. Так как содержание воздуха в смеси незначительное, его влиянием на электропроводность смеси пренебрегаем. Нахождение θ определяется как для плазмы с чистым аргоном.

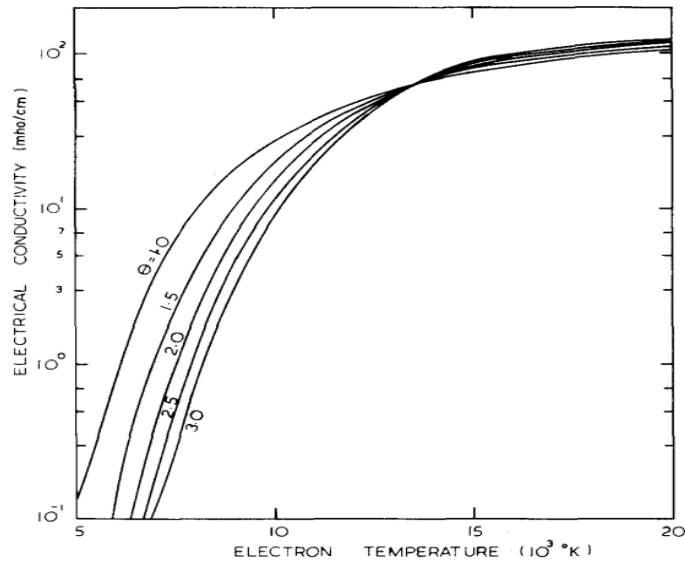


Рисунок 2.3.1 – Зависимость удельной электропроводности от электронной температуры в аргоне

По графику 2.3.1 определили, что для смеси аргон – воздух с 10% содержанием воздуха $\sigma=10 \text{ ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$.

2.4 Определение напряженности электрического поля

2.4.1 Схема экспериментальной установки

Для измерения напряженности электрического поля использовалась экспериментальная установка, изображенная на рисунке 2.4.1.

Факельный разряд возбуждался в кварцевой камере (1). Длина камеры составляла 500 мм, диаметр 32 мм. Питание разряда высокочастотным напряжением осуществлялось от ВЧ-генератора типа ЛСП-ГМ с частотой генерации 37 МГц и колебательной мощностью $W=4$ кВт. Мощность, реализуемая в разряде, варьировалась от 0,6 до 1,6 кВт. Длина канала разряда составляла 20 см. Измерения радиальных и осевых распределений компонент поля проводились посредством перемещения зондов (2) соответственно в радиальном и осевом направлениях относительно плазмоида разряда.

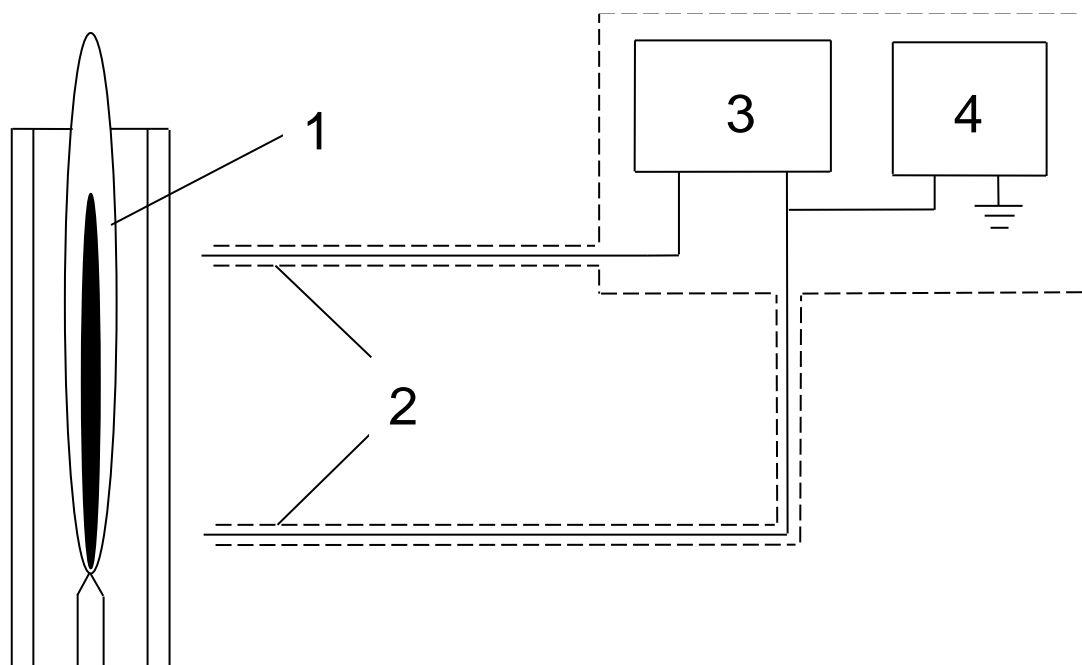


Рисунок 2.4.1 – Схема экспериментальной установки. 1 – ВЧ факельный разряд; 2 – емкостные и индуктивные зонды; 3 – измерительный прибор; 4 – генератор «опорного» сигнала

2.4.2 Результаты измерений

С помощью осциллографа были получены значения относительной напряженности электрического поля на различном расстоянии от оси факельного разряда, горящего в смеси аргон – воздух (рисунок 2.4.2). Измерения проводились в 10 точках.

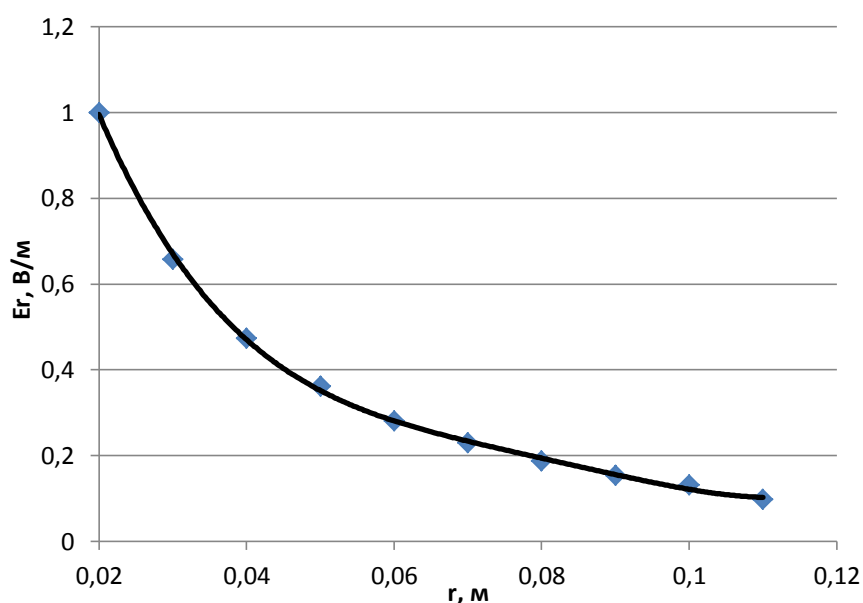


Рисунок 2.4.2 – Радиальное распределение относительной напряженности электрического поля факельного разряда, горящего в смеси аргон – воздух

По результатам измерений можно сделать вывод, что напряженность электрического поля факельного разряда, горящего в смеси аргон – воздух нелинейно уменьшается при отдалении от оси разряда.

Также были получены значения напряженности электрического поля вдоль оси факельного разряда, горящего в смеси аргон – воздух в 10-ти точках с шагом 2 см.

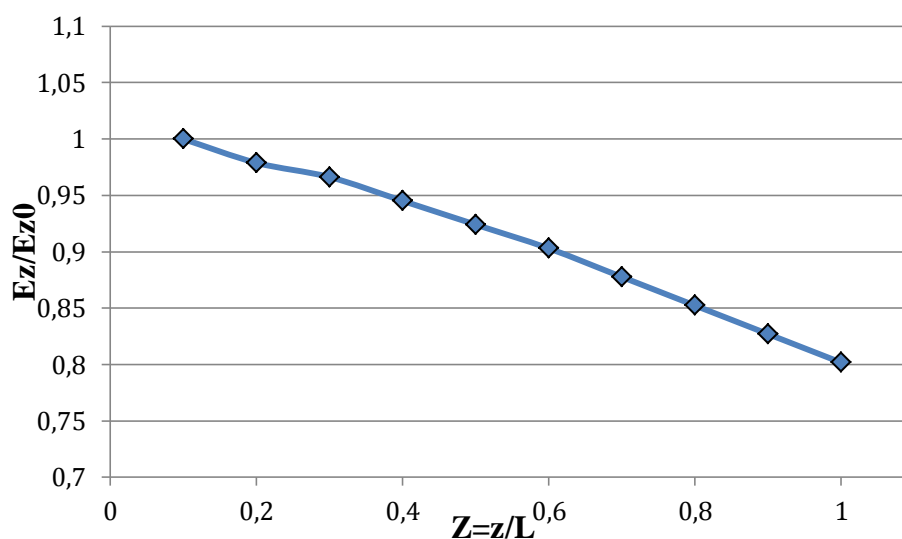


Рисунок 2.4.3 – Осевое распределение напряжённости электрического поля факельного разряда, горящего в смеси аргон – воздух

На рисунке 2.4.3 осевая координата представлена в единицах длины канала ВЧФР. Из рисунка 2.4.3 видно, что затухание напряженности электрического поля вдоль канала факельного разряда, горящего в смеси аргон – воздух практически линейно, и в крайних точках разряда составляет 20%.

Глава 3. Экспериментальное определение тепловых потерь в плазме разряда в зависимости от соотношения атомарной и молекулярной компоненты в плазмообразующем газе

3.1.1 Схема экспериментальной установки

Измерения тепловых потерь в плазме разряда проводились на экспериментальной установке, изображенной на рисунке 3.1.1.

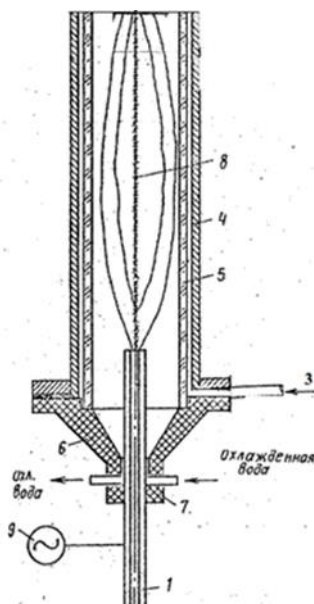


Рисунок 3.1.1 – Экспериментальная установка:

1-высоковольтный электрод; 3-вода для кожуха; 4,5- кварцевый кожух;6- корпус;7-подача воды на электрод;8-ВЧ факельный разряд;9- ВЧ генератор.

Экспериментальная установка представляла собой коаксиально расположенный высоковольтный электрод 1, вокруг которого находился кожух из кварцевого стекла 4-5, заполняемый водой на время горения разряда. Установка устанавливалась на корпус с изоляцией 6. Отвод тепла осуществлялся за счет циркуляции воды в кожухе и в электроде.

3.1.2 Результаты измерений

Измерения проводились для смесей аргон – воздух с различной концентрацией воздуха (5%-50%). Значение тепловых потерь рассчитывалось по формуле:

$$P = cm\Delta T/t \quad (3.1.1)$$

где P – отводимая мощность;

c – теплоемкость;

ΔT – изменение температуры воды;

t – время нагрева.

Результаты расчетов представлены в таблице 3.1.1.

Таблица 3.1.1 Тепловые потери в зависимости от концентрации воздуха

% воздуха	Длина канала, см	T1, °C	T2, °C	Время горения, сек	Масса воды, г	Р потери, Вт	Р удель, Вт/см
5	20	23	29	30	409	343,56	17,178
10	20	23	29	30	408	342,72	17,136
15	20	25	32	30	406	397,88	19,894
20	20	24	32	30	409	458,08	22,904
25	20	19,5	29	30	408	542,64	27,132
30	20	22	32	30	407	569,8	28,49
50	13	25,4	31,9	30	409	372,19	28,63

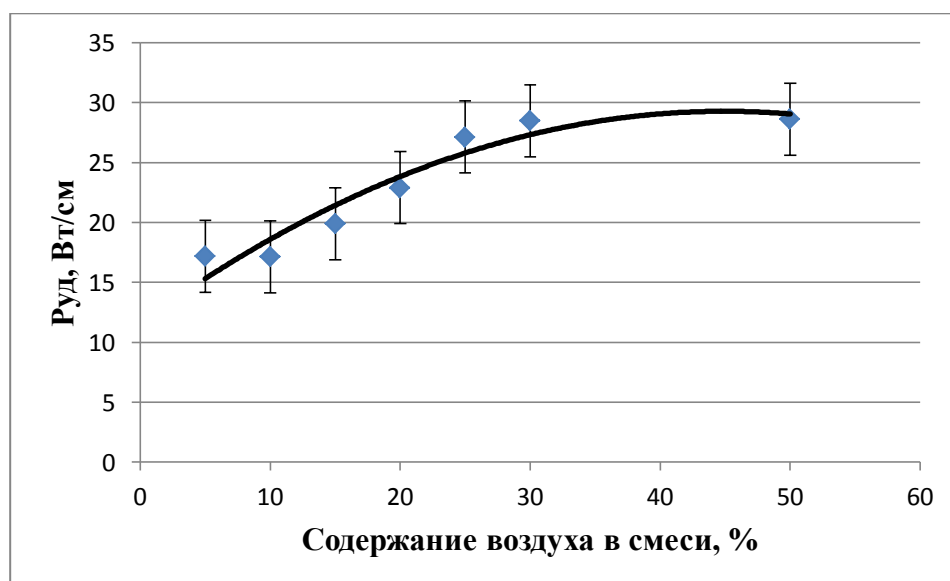


Рисунок 3.1.2 – Зависимость удельных тепловых потерь в плазме разряда от концентрации воздуха в смеси плазмообразующего газа

Из данного графика можно сделать вывод, что удельные тепловые потери в плазме разряда нелинейно увеличиваются при увеличении концентрации воздуха в смеси с аргоном. Однако при 25% содержании воздуха рост прекращается, и в дальнейшем увеличение концентрации воздуха в смеси никак не влияет на тепловые потери в плазме разряда.

Также были рассчитаны тепловые потери в зависимости от длины канала разряда для смеси аргон – воздух. Результаты измерений и расчетов представлены в таблице 3.1.2.

Таблица 3.1.2 Тепловые потери в зависимости от длины канала

Длина канала, см	T1, °C	T2, °C	Время горения, с	Масса воды, г	Р потери, Вт
8	22	24	30	408	114,24
11	23	26	30	406	170,52
13	24	28	30	409	229,04
16	25	30	30	408	285,6
19	26	32	30	407	341,88
22	24	31	30	409	400,82

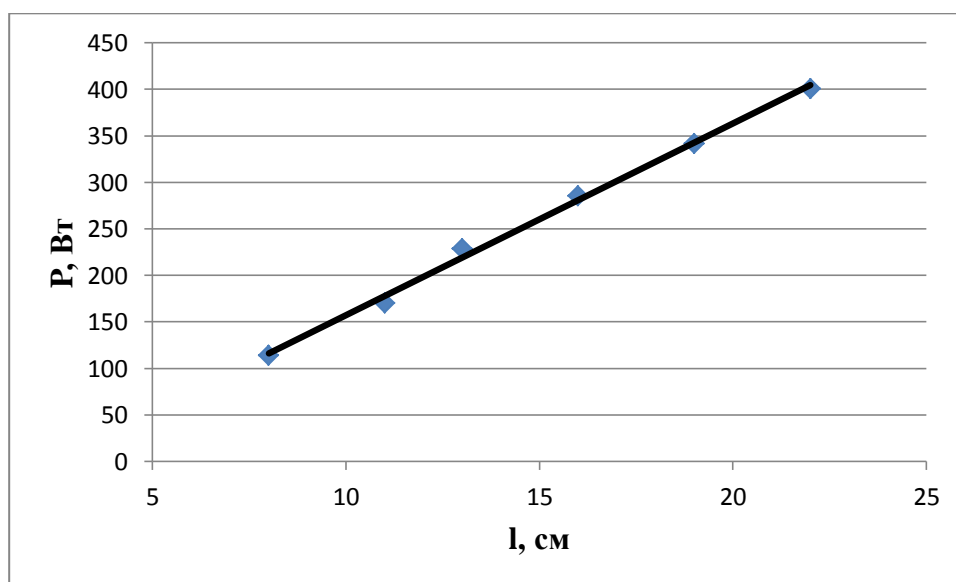


Рисунок 3.1.3 – Зависимость тепловых потерь разряда от длины его канала

Из данного графика можно сделать вывод, что тепловые потери линейно зависят от длины канала разряда.

3.2 Расчет тепловых потерь в плазме разряда в зависимости от соотношения атомарной и молекулярной компоненты в плазмообразующем газе

Так как электромагнитная волна распространяется вдоль проводящего цилиндра, то радиальное распределение радиальной компоненты электрического поля E_r будет определяться функцией Ханкеля 1 – го рода 1 – порядка:

$$E_r = AH_1^{(1)}(\sqrt{k^2 - h^2}r) \quad (3.2.1)$$
$$k^2 \ll h^2$$

Где, r – радиальная координата; A – константа; k – коэффициент распространения электромагнитной волны, h – волновое число.

k – коэффициент распространения электромагнитной волны, определяющийся по формуле:

$$k = \varepsilon_0 \mu \omega^2 \quad (3.2.2)$$

где, ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость; ω – частота электромагнитного поля.

h – волновое число, определяется по формуле:

$$h = \frac{1+i}{a\sqrt{5}} \sqrt{\frac{\omega\varepsilon_0}{\sigma}} \quad (3.2.3)$$

где, i – мнимая a – радиус канала; σ – удельная электропроводность единица.

Вычислим волновое число h для разряда с длиной канала 20 см, удельной электропроводностью $10 \text{ Ом}^{-1}/\text{м}$ и радиусом канала 2мм:

$$h = \frac{1+i}{a\sqrt{5}} \sqrt{\frac{\omega\varepsilon_0}{\sigma}} = \frac{1+i}{2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{5}} \sqrt{\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 37 \cdot 10^6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{10}} \approx (1+i) \cdot 3,2 \text{ м}^{-1}$$

Значение напряженности в канале разряда можно определить путём экстраполяции экспериментальной кривой величины напряжённости электрического поля.

Напряженность в канале разряда будет определяться следующим выражением:

$$E_r|_{2mm} = \frac{1}{\zeta} E_r|_{50mm} \quad (3.2.4)$$

$$\text{где } \zeta = \frac{E_r|_{50mm}}{E_r|_{2mm}} = \frac{AH_1^{(1)}(\sqrt{k^2 - h^2} \cdot 0,05)}{AH_1^{(1)}(\sqrt{k^2 - h^2} \cdot 0,002)} \quad (3.2.5)$$

С помощью осциллографа определили значения напряженности поля на расстоянии 50 мм от оси разряда. При частоте 37МГц, длине канала 20 см и концентрацией воздуха в смеси 10%.

$$E_r|_{50mm} = 290 \text{ В/м}$$

Рассчитаем данное соотношение в программе MatLab с учетом того, что длина канала приблизительно обратно пропорциональна модулю волнового числа.

```
>>z=0.16*(i-1);    y=0.0064*(i-1);x=besselh(1,z);    r=besselh(1,y);
abs(x)/abs(r)
ans = 0.0393
>>
```

В итоге получим:

$$\zeta = \frac{E_r|_{50mm}}{E_r|_{2mm}} = \frac{AH_1^{(1)}((i-1) \cdot 0,05)}{AH_1^{(1)}((i-1) \cdot 0,002)} = 0,0393$$

Подставляем полученное выше значение в формулу 3.2.4 и определяем напряженность в канале разряда учитывая, что экспериментальное значение напряженности электрического поля при длине канала 20 см на расстоянии 50 мм составило 290 В/м:

$$E_r|_{2mm} = \frac{1}{\zeta} E_r|_{50mm} = \frac{1}{0,0393} \cdot 290 \approx 7390 \text{ В/м}$$

Проведем оценочный расчет тепловыделения факельного разряда, горящего в смеси аргон - воздух с длиной канала 20 см.

Величина джоулевых потерь в плазме разряда определяется с помощью следующего выражения:

$$W = V_{\text{разряда}} \sigma |E|^2 \quad (3.2.6)$$

Где, $V_{\text{разряда}}$ – объем разряда; σ – удельная электропроводность плазмы разряда; $|E|$ – действующее значение напряжённости электрического поля.

Из полученных ранее значений электропроводности плазмы разряда и напряженности электрического поля определим величину тепловой мощности для ВЧФР с длиной канал 20 см:

$$W = V_{\text{разряда}} \sigma |E|^2 = 6,28 * 10^{-7} * 10 * 7390^2 = 343 \text{ Вт}$$

Определим удельную мощность:

$$w = \frac{W}{l} = \frac{343}{20} = 17,2 \text{ Вт/см}$$

Для других длин канала разряда расчет проводился аналогично. Полученная расчетная кривая тепловой мощности в зависимости от длины канала представлена на рисунке 3.2.1.

Также на рисунке представлены экспериментальные значения тепловых потерь в зависимости от длинны канала.

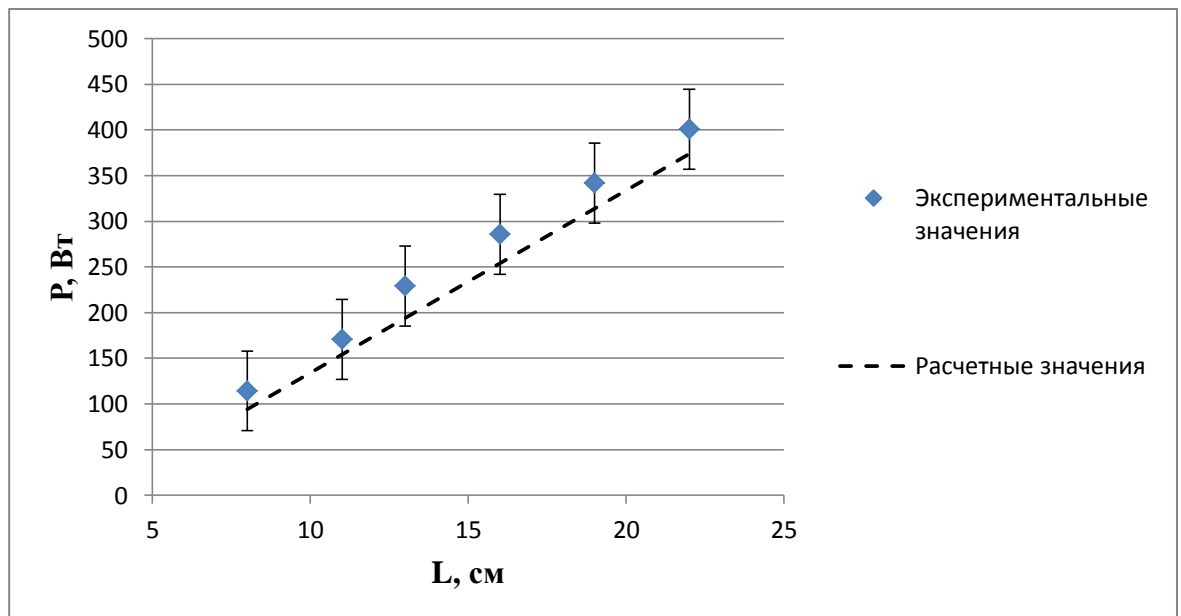


Рисунок 3.2.1 – Зависимость тепловой мощности факельного разряда, горящего в смеси аргон - воздух от длины его канала. 1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

Из данного графика видно, что расчетные и экспериментально определенные тепловые потери факельного разряда, горящего в смеси аргон – воздух, с 10% содержанием воздуха линейно зависят от длины канала данного разряда. Также можно говорить об адекватности проведенных измерений тепловой мощности, так как все значения находятся в зоне погрешности рассчитанной прямой.

4. Финансовый менеджмент

Введение

Основной задачей данного раздела является оценка перспективности разработки и планирование финансовой и коммерческой ценности конечного продукта, предлагаемого в рамках НИ. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на такие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, какой бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель работы – исследования теплофизических характеристик высокочастотного факельного разряда. До настоящего времени определение тепловой мощности факельного разряда, горящего в смеси молекулярного и атомарного газов не проводилось. В случае использования в качестве плазмообразующего газа молекулярного газа эффективность этого процесса значительно возрастает. Измерения проводились методом калориметрирования.

4.1 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим

соперникам. Важно реалистично оценивать сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Конкурент 1 – патент РФ 2149885, ООО «Плазмохим», Россия.

Конкурент 2 – патент РФ 2142845, АО «СХК», Россия.

Оценочная карта анализа представлена в таблице 4.1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,1 \cdot 3 = 0,3, \quad (4.1)$$

где K – конкурентоспособность проекта; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл показателя.

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

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Удобство в эксплуатации	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
Энергоэкономичность	0,9	5	3	3	0,9	0,54	0,54
Надежность	0,18	5	4	3	0,25	0,2	0,15
Простота эксплуатации	0,1	4	3	3	0,5	0,3	0,3
Экономические критерии оценки эффективности							
Конкурентоспособность продукта	0,07	4	4	3	0,25	0,28	0,21
Уровень проникновения на рынок	0,07	4	5	5	0,28	0,35	0,35
Цена	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	5	5	0,4	0,4	0,4
Послепродажное обслуживание	0,06	4	3	2	0,3	0,18	0,12
Финансирование научной разработки	0,03	4	5	4	0,12	0,15	0,12
Срок выхода на рынок	0,04	5	4	4	0,2	0,16	0,16
Наличие сертификации разработки	0,06	4	5	4	0,24	0,3	0,24
Итого	1	59	52	46	4,84	3,81	3,44

В результате можно увидеть, что предлагаемое исследование по уменьшению энергетических затрат при генерации плазменных струй способно составить конкуренцию существующим на этом рынке патентам.

4.2 SWOT-анализ

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

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей.

Таблица 4.2 – SWOT-анализ

	Strengths (сильные стороны)	Weaknesses (слабые стороны)
	<p>C1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии;</p> <p>C2. Компактность установки;</p> <p>C3. Техническая простота осуществления метода.</p>	<p>Сл1. Недостаток финансовых средств;</p> <p>Сл2. Отсутствие необходимого оборудования для проведения исследований;</p> <p>Сл3. Низкая актуальность исследований.</p>
Opportunities (возможности)	<p>Проведению дальнейших исследований и открытию новых перспектив, усовершенствованию установки и использование научно - исследовательских достижений ТПУ могут поспособствовать выше перечисленные сильные стороны НИП, такие как дешевизна, простота и компактность.</p>	<p>Научно-исследовательские достижения ТПУ могут быть использованы при отсутствии необходимого оборудования и недостатке финансирования. Однако низкая актуальность может отрицательно сказаться на перспективных возможностях проекта.</p>
<p>B1. Проведение дальнейших исследований и открытие новых перспектив;</p> <p>B2. Усовершенствование установки;</p> <p>B3. Использование научно-исследовательских достижений ТПУ.</p>		

Продолжение таблицы 4.2

<p>Threats (угрозы)</p> <p>У1. Появление более актуальных методик;</p> <p>У2. Малый спрос на установку.</p>	<p>Угрозы слабо влияют на сильные стороны проекта, так как присутствует возможность ее усовершенствования и проведения новых опытов.</p>	<p>Малый спрос и появление более актуальных методик могут отрицательно сказаться на реализации данной установки в научно-исследовательской деятельности.</p>
--	--	--

В рамках следующего этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Пример интерактивной матрицы проекта представлен в таблице 4.3

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта				
Возможности проекта		С1	С2	С3
	В1	+	0	+
	В2	0	+	+
	В3	+	+	+
Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл.1	Сл.2	Сл.3
	В1	+	+	-
	В2	+	-	-
	В3	-	-	+
Сильные стороны проекта				
Угрозы проекта		С1	С2	С3
	У1	+	-	-
	У2	-	-	-
Слабые стороны проекта				
Угрозы проекта		Сл.1	Сл.2	Сл.3
	У1	+	-	+
	У2	+	-	+

4.3 Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Комплекс предполагаемых работ включает в себя следующие задачи:

- определить структуру работ в рамках исследования;
- определить участников каждой работы;
- установить продолжительность работ;
- построить график проведения отдельных этапов исследования.

Для выполнения данного исследования (проекта) необходимо сформировать рабочую группу, в состав которой входят руководитель и магистр. Для каждой из запланированных работ, необходимо выбрать исполнителя этой работы.

Разработанный список задач и производимых работ, в рамках проектирования, а также распределение исполнителей по этим работам, представлен в виде таблицы 4.4

Таблица 4.4 – Список производимых задач и работ и их исполнители

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Руководитель, Инженер
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	4	Календарное планирование работ по проекту	Инженер
Теоретические и экспериментальное исследования	5	Разработка лабораторного макета	Инженер
	6	Экспериментальное исследование	

Обобщение и оценка результатов	7	Анализ и обработка полученных результатов	Руководитель Инженер
	8	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель Инженер
	9	Оформление пояснительной записки к ВКР	Инженер
	10	Подготовка к защите ВКР	Инженер
Контроль и координирование проекта	11	Контроль качества выполнения проекта и консультирование исполнителя	Руководитель

4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Основная часть стоимости разработки проекта составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников разработки проекта.

Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить экспертным путем, в «человеко-днях». Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости $t_{ожi}$ определяется по формуле:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (4.2)$$

где t_{mini} – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является оптимистичной оценкой: при удачном стечении обстоятельств), чел.-дн.; t_{maxi} – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является пессимистичной оценкой: при неудачном стечении обстоятельств, чел.-дн.

На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p :

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (4.3)$$

Где $Ч_i$ – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

По всем работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 4.5

4.3.3 Разработка графика проведения исследования

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ.

Диаграмма Ганта представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.4)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4.5)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

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

Все рассчитанные значения необходимо свести в таблицу (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ож}$, чел-дни			
Составление и утверждение технического задания	3	5	3,8	М, Р	3,8	5
Подбор и изучение материалов по теме	10	15	12	М	12	14
Анализ исходных данных	5	7	5,8	М	5,8	7
Выбор направления исследований	3	6	4,2	М, Р	2,1	3
Календарное планирование работ по теме	2	2,5	2,2	М	2,2	3
Разработка лабораторного макета	10	15	12	М	12	14
Экспериментальное исследование	4	6	4,8	М, Р	2,4	3
Оценка эффективности полученных результатов	5	7	5,8	М	5,8	7
Анализ и обработка полученных результатов	2	4	2,8	М, Р	1,4	2
Оформление пояснительной записки	6	10	7,6	М	7,6	9
Подготовка к защите	4	7	5,2	М	5,2	6
Итого:			66,2		60,3 Р/Б 9,7/56,5	73 Р/Б 13/68

График строится разбивкой по месяцам и декадам за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделены разными цветами, в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Календарный план-график выполнения дипломной работы представлен на рисунке 4.1.

№	Вид работ	Исполнитель	Тк, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Март			Апрель			Май			Июнь			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
1	Составление и утверждение технического задания	И,Р	5	■												
2	Подбор и изучение материалов по теме	И	14		■	■	■									
3	Анализ исходных данных	И	7		■	■	■									
4	Выбор направления исследований	И,Р	3				■	■	■							
5	Календарное планирование работ по теме	И	3				■	■	■							
6	Разработка лабораторного макета	И	14				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
7	Экспериментальное исследование	И,Р	3						■	■	■					
8	Оценка эффективности полученных результатов	И	7						■	■	■	■	■	■		
9	Анализ и обработка полученных результатов	И,Р	2								■	■				
10	Оформление пояснительной записки к ВКР	И	9								■	■	■	■	■	■
11	Подготовка к защите ВКР	И	6									■	■	■	■	■

Рисунок 4.1 – Календарный план-график проведения научного исследования.



инженер,



- руководитель.

Таблица 4.6 – Сводная таблица по календарным дням

	Количество дней
Общее количество календарных дней для выполнения работы	73
Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер	73
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	13

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и магистра, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей, а также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из исполнителей.

4.4 Бюджет научного исследования

4.4.1 Расчет материальных затрат научного исследования

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

приобретаемые со стороны сырье и материалы, необходимые для создания научно-технической продукции;

покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса и для упаковки продукции или расходуемых на другие производственные и хозяйственные нужды (проведение испытаний, контроль, содержание, ремонт и эксплуатация оборудования, зданий, сооружений, других основных средств и прочее), а также запасные части для ремонта оборудования, износа инструментов, приспособлений, инвентаря, приборов, лабораторного оборудования и других средств труда, не относимых к основным средствам, износ спецодежды и других малоценных и быстроизнашивающихся предметов;

покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;

сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований (испытаний) и для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделий – объектов испытаний (исследований).

В материальные затраты, помимо вышеуказанных, включаются дополнительно затраты на канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.п. Однако их учет ведется в данной статье только в том случае, если в научной организации их не включают в расходы на использование оборудования или накладные расходы. В первом случае на них определяются соответствующие нормы расхода от установленной базы. Во втором случае их величина учитывается как некая доля в коэффициенте накладных расходов.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх}i} = (1 + 0,3) * 1000 = 1300 \text{ руб.}$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх}i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы (в данной работе принимается равным 30%).

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на приобретение материалов необходимых для проведения исследования. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 4.7

Таблица 4.7 – Материальные затраты

Наименование	Цена за ед., руб.	Количество, ед.	Суммарная стоимость, руб.
Аргон	1000	1	1000
Всего за материалы, руб.			1000
Транспортно-заготовительные расходы, руб.			300
Итого по статье, руб.			1300

4.4.2 Расчет амортизация оборудования

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

Для практических измерений использовался контактный измеритель температуры.

Таблица 4.8 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Измеритель температуры	1	5	2	2
Итого		2 тыс. руб.			

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации определяется по следующей формуле:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.6)$$

где n – срок полезного использования в годах.

Амортизация определяется по следующей формуле:

$$A = \frac{N_A I}{12} \cdot m, \quad (4.7)$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.;

m – время использования, мес.

Рассчитаем норму амортизации для компрессора, с учётом того, что срок полезного использования составляет 5 лет:

$$N_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{5} = 0,2. \quad (4.8)$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

$$A = \frac{N_A I}{12} \cdot m = \frac{0,2 \cdot 2000}{12} = 33,3 \text{ руб.} \quad (4.9)$$

4.4.3 Основная заработная плата исполнителей научного исследования

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого, необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $Z_{\text{осн}}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (4.10)$$

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{51285 \cdot 9}{237} = 1947,5 \text{ руб.}, \quad (4.11)$$

где Z_m – должностной оклад работника за месяц;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

при отпуске в 28 раб. дня – $M=11$ месяцев, 5-дневная рабочая неделя;

при отпуске в 56 раб. дней – $M=10$ месяцев, 6-дневная рабочая неделя;

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{33150 \cdot 11}{207} = 1761,6 \text{ руб.} \quad (4.12)$$

Должностной оклад работника за месяц:

Для руководителя:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.,}$$

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

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

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок, принимается равным 0,2;

k_p – районный коэффициент, принимается равным 1,3 (для г.

Томска).

Таблица 4.9– Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	52/14	104/14
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	56/6	28/12
Действительный годовой фонд рабочего времени	237	207

Таблица 4.10 – Расчет основной заработной платы

Исполнители НИП	$Z_{тс}$, руб	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}$, руб	$Z_{дн}$, руб	$T_{р}$, раб.дн.	$Z_{осн}$, руб
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	1947,5	13	25317,5
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1761,6	73	128596,8
Итого:								153914,3

4.4.4 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{доп}^{рук} = 0,15 * 25317,5 = 3797,6 \text{ руб.} \quad (4.13)$$

Для инженер:

$$Z_{доп}^{маг} = 0,15 * 128596,8 = 19289,5 \text{ руб.} \quad (4.14)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15).

4.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{внеб}^{рук} = 0,302 \cdot (25317,5 + 3797,6) = 8792,8 \text{ руб.}, \quad (4.15)$$

Для инженера:

$$Z_{внеб}^{бак} = 0,302 \cdot (128596,8 + 19289,5) = 44661,6 \text{ руб.}, \quad (4.16)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование).

Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ):

22 % – на пенсионное страхование;

5,1 % – на медицинское страхование;

2,9 % – на социальное страхование.

4.4.6 Накладные расходы

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

Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{накл} = (231786,1) * 0,2 = 46357,2 \text{ руб.}, \quad (4.17)$$

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

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИП по форме, приведенной в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Группировка затрат по статьям

Статьи							
Материальные затраты	Амортизация	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
1300	33,3	153914,3	23087,1	53454,4	231786,1	46357,2	278143,3

4.5 Определение финансовой, бюджетной и экономической эффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносится финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги:

Патент РФ 2149885

Патент РФ 2142845

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{278143,3}{650000} = 0,43$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{278143,3}{650000} = 0,43$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{450000}{650000} = 0,69$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{650000}{650000} = 1.$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо

соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Далее необходимо произвести оценку ресурсоэффективности проекта, определяемую посредством расчета интегрального критерия, по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент проекта;

b_i – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 4.12.

Таблица 4.12 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка проекта	Патент РФ 2149885	Патент РФ 2142845
Количество потребляемой электроэнергии	0,22	4	4	5
Надежность	0,24	5	4	2
Возможность оптимизации процесса	0,2	5	1	1
Простота эксплуатации	0,14	3	1	4
Стабильность работы	0,2	3	5	2
Итого:	1	4,1	3,18	2,74

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя

ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{I_{\text{р-исп.1}}}{I_{\text{финр.1}}} = \frac{4,1}{0,43} = 9,5$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.2}}}{I_{\text{сип.1}}} = \frac{4,6}{9,5} = 0,5$$

Таблица 4.13 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,43	0,69	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,1	3,18	2,74
3	Интегральный показатель эффективности	9,5	4,6	2,74
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,48	0,28

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации устройства, как

наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с остальными;

При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы – 73 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 73 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель – 13;

Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 278143,3 руб;

По факту оценки эффективности научного исследования, можно сделать выводы:

Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,43, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной, по сравнению с аналогами;

Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,1, по сравнению с 3,18 и 2,74;

Значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 9,5, по сравнению с 4,6 и 2,74, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

5. Социальная ответственность

Целью выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР) является расчет теплофизических характеристик высокочастотного факельного разряда, горящего в смеси атомарного и молекулярного газов.

В экспериментальной части ВКР были проведены измерения электронной и газовой температуры высокочастотного факельного разряда, горящего в смеси молекулярного и атомарного газов. По результатам измерений были проведены оценки джоулевых потерь в плазме ВЧФ-разряда.

Выполнение ВКР проводилось в отделении ядерно-топливного цикла (ОЯТЦ) Инженерной школы ядерных технологий (ИЯТШ) Томского политехнического университета. Для выполнения экспериментальной части ВКР в качестве рабочего места использовалась лабораторная установка (высокочастотный факельный плазмотрон), а также компьютерный стол с ЭВМ, соответствующее периферийное оборудование (монитор, клавиатура, мышь) и программное обеспечение (Microsoft Word, Microsoft Excel). Потенциальными пользователями результатов исследования являются АО «Сибирский химический комбинат».

Сложность поставленных задач требует использования достижений многих научных дисциплин, прямо или косвенно связанных с задачами создания безопасных условий труда. При разработке требований производственной санитарии используются результаты исследований ряда медицинских и биологических дисциплин.

Успех в решении проблем охраны труда в большой степени зависит от качества подготовки специалистов в этой области, от их умения принимать правильные решения в сложных и изменчивых условиях современного производства.

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

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

Основные положения по охране труда изложены в Трудовом кодексе Российской Федерации [40]. В этом документе указано, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются одной из главных забот государства.

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации каждый работник имеет право на:

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

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

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

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

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

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рабочее место при работе с ПК должно составлять не менее чем 6 м² [41]. Выполнение экспериментальной части ВКР проводилось в аудитории 001В учебного корпуса № 10 ТПУ. Общая площадь аудитории 32,1 м², по 8 м² на одного оператора ЭВМ, что соответствует гигиеническим требованиям при работе с ЭВМ. Пространство для ног должно соответствовать следующим параметрам: высота пространства для ног не менее 600 мм, расстояние сиденья до нижнего края рабочей поверхности не менее 150мм, а высота сиденья 420 мм [42].

Так же предусмотрены следующие требования к организации рабочего места пользователя ПЭВМ: конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ позволять изменять позу с целью снижения статического

напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ. Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию [41].

5.2 Профессиональная социальная безопасность

5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования

Объект исследования представляет собой высокочастотный факельный разряд, горящий в смеси атомарного и молекулярного газов. При проведении исследований необходимо учитывать, что плазмохимическая установка создает ряд вредных и опасных факторов.

5.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Работа по выполнению экспериментальной части ВКР проводилась на лабораторной установке, а результаты экспериментов обрабатывались при помощи персонального компьютера. При его использовании могут возникнуть различные вредные и опасные факторы. Обеспечение комфортных условий труда в значительной степени оказывает влияние на производительность труда и снижение профессиональных заболеваний. К ним относятся меры, связанные с исключением травматизма, антисанитарии и возгораний [43]. Наиболее вероятные факторы воздействия представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Этапы работ			Нормативные документы
	Разраб отка	Изгото вление	Эксплу атация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение.
2.Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	
3.Превышение уровня шума			+	
4.Повышенный уровень электромагнитного излучения	+		+	
5.Поражение электрическим током	+		+	

При проведении работ, связанных с теоретическим исследованием, важную роль играет планировка рабочего места. Она должна соответствовать правилам охраны труда и удовлетворять требованиям удобства выполнения работы, экономии энергии и времени инженера.

Основным документом, определяющим условия труда при работе с ПЭВМ, является СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации

работы». В правилах указаны основные требования к помещениям, микроклимату, шуму и вибрации, освещению помещений и рабочих мест, организации и оборудованию рабочих мест.

Основным опасным фактором является опасность поражения электрическим током. Исходя из анализа состояния помещения, рабочее место инженера, занимающегося теоретическими исследованиями, по степени опасности поражения электрическим током можно отнести к классу помещений без повышенной опасности.

Работа на установке характеризуется следующими вредными и опасными факторами, воздействие которых на работников может привести к несчастному случаю:

- а) высокое напряжение;
- б) электромагнитное излучение;
- в) ультрафиолетовое излучение;
- г) световое излучение;
- д) повышенная загазованность рабочей зоны (аргон).

5.2.2.1 Отклонение показателей микроклимата

Значимым физическим фактором является микроклимат рабочей зоны (температура, влажность и скорость движения воздуха).

Температура, относительная влажность и скорость движения воздуха влияют на теплообмен и необходимо учитывать их комплексное воздействие. Нарушение теплообмена вызывает тепловую гипертермию, или перегрев.

Оптимальные нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха производственных помещений для работ, производимых сидя и не требующих систематического физического напряжения (категория Ia), приведены в таблице 5.2, в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и [44].

Таблица 5.2. Нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха

Период года	Категория тяжести работ	Температура, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, не более м/с
Холодный	Ia	22÷24	40÷60	0,1
Теплый	Ia	23÷25	40÷60	0,1

Допустимые микроклиматические условия установлены по критериям допустимого теплового и функционального состояния человека на период 8-часовой рабочей смены. Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3. Допустимые величины показателей микроклимата

Период года	Категория тяжести работ	Температура, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, не более м/с
Холодный	Ia	20÷25	15÷75	0,1
Теплый	Ia	21÷28	40÷75	0,1÷0,2

5.2.2.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Источниками света могут быть как естественные, так и искусственные объекты. Естественным источником в помещении служит солнце, искусственными являются электрические лампочки. При длительной работе в условиях недостаточной освещенности и при нарушении других параметров световой среды зрительное восприятие снижается, развивается близорукость, болезнь глаз, появляются головные боли.

По нормативу [41] освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50° до 90° с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м, защитный угол светильников должен быть не менее 40° . Коэффициент запаса (K_3) для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5%.

5.2.2.3 Повышенный уровень шума

Акустический шум является одним из раздражителей организма человека при длительном воздействии. При шумовом воздействии учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, возникают головные боли, ослабляется внимание и замедляются психические реакции, что в конечном итоге приводит к снижению работоспособности человека.

Источниками шума на рабочем месте могут быть различные двигатели и механизмы, используемые в офисной технике. Для категории тяжести работ Ia уровень шума на рабочем месте трудящегося не должен превышать 50 Дб [45].

5.2.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Основное рабочее оборудование – лабораторная установка и персональный компьютер, являются источниками электромагнитного излучения. Как и шум, электромагнитное поле своим воздействием может быть причиной учащенного пульса, дыхания, повышения артериального давления, возникновения головных болей, ослабления внимания и замедления реакции, что снижает общую работоспособность человека. Электромагнитное поле, создаваемое персональным компьютером, имеет сложный спектральный состав в диапазоне частот от 0 Гц до 1000 МГц, и в том числе мощность экспозиционной дозы мягкого рентгеновского

излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана при любых положениях ПК не должна превышать 100 мкР/ч [41].

5.2.2.5 Поражение электрическим током

Знание допустимых для человека значений тока и напряжения позволяет правильно оценить опасность поражения и определить требования к защитным мерам от поражения электрическим током.

ГОСТ 12.1.038-82 устанавливает предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека. Под напряжением прикосновения понимается напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек. Нормы предназначены для проектирования способов и средств защиты от поражения электрическим током людей при их взаимодействии с электроустановками. Они соответствуют прохождению тока через тело человека по пути рука-рука или рука-ноги [46].

Стандарт предусматривает нормы для электроустановок при нормальном (неаварийном) режиме их работы, а также при аварийных режимах производственных и бытовых электроустановок.

Значения напряжения прикосновения и силы тока, протекающего через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме работы электроустановки, не должны превышать значений, приведенных в таблице 5.4.

Таблица 5.4. Предельно допустимые значения напряжения соприкосновения и силы тока

Род и частота тока	Наибольшие допустимые значение	
	U_{np} , В	I_h , мА
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Переменный, 400 Гц	3	0,4
Постоянный	8	1,0

Для лиц, выполняющих работу в условиях высокой температуры и влажности (относительная влажность больше 75%), эти нормы должны быть уменьшены в три раза.

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

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

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

5.2.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

5.2.3.1 Требования к помещениям для работы с ПЭВМ

В соответствии с [41] помещения для эксплуатации ПЭВМ должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь одного рабочего места пользователя ПЭВМ с видеодисплейным терминалом (ВДТ) на базе электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) должна составлять не менее 6 м², а для ВДТ на базе плоского дискретного экрана (жидкокристаллический, плазменный) 4,5 м².

5.2.3.2 Микроклимат

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

применяют вентиляцию. Общеобменная вентиляция используется для обеспечения в помещениях соответствующего микроклимата. Периодически должен вестись контроль влажности воздуха. В летнее время при высокой уличной температуре должны использоваться системы кондиционирования.

Радиаторы должны устанавливаться в нишах, прикрытых деревянными или металлическими решетками. При этом температура на поверхности нагревательных приборов не должна превышать 95 °С, чтобы исключить пригорание пыли [49].

5.2.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы ВДТ были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева. Также как средство защиты для минимизации воздействия фактора следует установка местного освещения из-за недостаточной освещенности, оконные проемы должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа: жалюзи, занавесей, внешних козырьков.

Если помещение не соответствует вышеописанным нормам, то это влечет за собой ухудшение здоровья рабочих и как следствие ухудшение рабочего процесса.

5.2.3.4 Повышенный уровень шума

В исследовательских аудиториях имеют место шумы различного рода, которые генерируются как внутренними, так и внешними источниками шумов. В рассматриваемом случае внутренними источниками шумов являются рабочее оборудование, а именно генератор высокочастотного напряжения, рабочая камера, персональный компьютер, вентиляционная система, а также компьютерная техника других инженеров, находящихся в аудитории. При возможном превышении

предельно допустимого уровня (ПДУ) достаточно использовать в помещении звукопоглощающие материалы (звукопоглощающая облицовка стен и потолка, оконные шторы) [50]. Для уменьшения шума, проникающего снаружи помещения, следует установить уплотнения по периметру притворов дверей и окон.

5.2.3.5 Электромагнитные излучения (ЭМИ)

При возможном превышении ПДУ возможны следующие меры защиты: увеличение расстояния между источником ЭМИ и рабочей зоной, установка отражающих или поглощающих экранов, конструктивное совершенствование оборудования с целью снижения используемых уровней ЭМИ, общей потребляемой и излучаемой мощности оборудования.

5.2.3.6 Поражение электрическим током

Степень опасного воздействия на человека электрического тока зависит от рода и величины напряжения и тока, частоты электрического тока, пути прохождения тока через тело человека, продолжительности воздействия на организм человека, условий внешней среды.

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются:

обеспечение недоступности токоведущих частей путём использования изоляции в корпусах оборудования;

применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;

использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения;

использование устройств бесперебойного питания [51].

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

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

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

Допуск сотрудников к работе на плазмохимической установке. К работе на установке допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медосмотр, имеющие квалификационную группу допуска по электробезопасности не ниже 3 (выше 1000 В) и прошедшие инструктаж по технике безопасности на рабочем месте.

В установке имеется высокое напряжение – 7,9 кВ, подаваемое с повышающего трансформатора на анод генераторной лампы высокочастотного (ВЧ) генератора. Конструкция ВЧ генератора (наличие блокировок на дверцах генератора) обеспечивает безопасность работ при исправном состоянии электромеханических блокировок и надежном заземлении корпуса генератора.

На электрод плазмотрона подается высоковольтное (выше 1000 В) напряжение высокой частоты (40 МГц). Наличие металлического кожуха у плазмотрона исключает случайное прикосновение к электроду.

Инициирование разряда, требующее прикосновения проводником к электроду внутри плазмотрона, производится только изолирующей штангой.

Приступать к работе на установке разрешается только после осуществления заземления установки.

Перед началом каждого семестра производится осмотр генератора.

При осмотре должно обращать внимание на следующие моменты:

Безотказность работы всех блокирующих устройств, обеспечивающих опасные условия работы персонала и необходимую четкость, и очередность включения всех элементов генератора;

Надежность экранирования и заземления корпуса генератора;

Чистоту контактов пускорегулирующей аппаратуры;

Отсутствие пыли на токоведущих частях и изоляторах.

При обнаружении неисправностей блокировок до их устранения генератор включать категорически запрещается.

Осмотр ремонтные работы на генераторе производить при его полном отключении от источника питания. При этом необходимо:

- видимый разрыв в виде отключенного рубильника на питающем щите;

- установка изоляционной прокладки в разрыве рубашки контактов рубильника, если не предусмотрена специальная механическая блокировка.

5.2.3.7 Техника безопасности при эксплуатации газовых баллонов

Баллоны со сжатыми, сжиженными или растворенными газами требуют соблюдения особых мер безопасности при их транспортировке, хранении и эксплуатации. Эти меры необходимо соблюдать во избежание:

а) утечки газа через неплотные соединения и образования взрывоопасных смесей с воздухом, что опасно при наличии искры, например, при ударе баллона о твердый предмет;

б) тепловых воздействий на баллон, что вызывает повышение давления газа в нем;

в) механических ударов, могущих повредить стенки сосуда.

Транспортировать баллоны с газом необходимо с надетыми предохранительными колпаками, а баллоны с горючими газами - с колпаками и заглушками. Во время перевозки баллонов в автомобилях, автокарах и на других средствах рессорного транспорта в горизонтальном положении между баллонами устанавливается прокладка из деревянных брусков с вырезанными гнездами или на баллоны надевают резиновые кольца толщиной не менее 25 мм. При этом все баллоны укладываются вентилями в одну сторону. При перевозке баллонов в вертикальном положении в специальных контейнерах или без них должны быть установлены прокладки между баллонами и ограждения от возможного падения.

Во время погрузки и разгрузки бросать баллоны и ударять их о твердые предметы не допускается.

Не допускается совместное хранение баллонов с кислородом и горючими газами, так как это связано с возможностью образования взрывоопасных смесей.

Баллоны с ядовитыми газами хранят в специальных закрытых помещениях.

Хранение газовых баллонов на складе производится в вертикальном положении с установкой их в специально оборудованных гнездах, клетках или с ограждением их барьером.

Склады для хранения баллонов с газами должны быть одноэтажными, с покрытиями легкого типа и не иметь чердачных помещений. На складах для хранения баллонов с газами, сооружаемых из негорючих материалов, оконные и дверные стекла должны быть из матового или окрашенного белой краской стекла для рассеяния солнечного света. Вентиляция на складе обязательна. Электрооборудование в соответствии с ПУЭ выполняется взрывозащищенным. Во избежание искрообразования пол покрывается пластиком или асфальтом. Отопление допускается только водяное или паровое низкого давления.

В помещениях для хранения горючих газов ведется контроль концентрации газа в воздухе помещения. При возникновении опасной концентрации помещение немедленно вентилируется, а баллоны с утечкой газа удаляются со склада.

В процессе эксплуатации баллонов со сжатыми газами необходимо выполнять следующие правила:

а) не допускать к эксплуатации баллоны, для которых истек срок очередного испытания, отсутствуют установленные клейма, неисправен вентиль, повреждены корпус, окраска и др.;

б) запрещается производить какой-либо ремонт или окраску баллонов, или их арматуры;

в) запрещается отогревание редукторов, вентилях открытым огнем; отогревать их следует только горячей водой;

г) при перекачивании кислородных баллонов вручную нельзя брать руками за вентиль;

д) не допускается работа с кислородными баллонами в промасленной одежде и рукавицах.

Баллоны для сжатых газов должны иметь остаточное давление не менее $0,5 \cdot 10^5$ Па ($0,5$ кгс/см²), а для растворенного ацетилена - не более 10^5 Па.

Выпуск газов из баллонов в емкости с меньшим давлением должен производиться через специально предназначенный для данного газа редуктор.

5.3 Экологическая безопасность

В данном подразделе рассматривается характер воздействия ВЧФ-разряда, горящего в смеси воздуха и аргона на окружающую среду. Плазмотрон не оказывает воздействия на окружающую среду. Однако при расчетах и исследовании применялись ПЭВМ и периферийное оборудование. Для соблюдения экологической безопасности

использование указанных устройств должно соответствовать требованиям нормативных документов.

С другой стороны, необходимо также отметить, что после использования компьютерной техники, которая содержит бериллий, кадмий, мышьяк, поливинилхлорид, ртуть, свинец, фталаты, огнезащитные составы на основе брома и редкоземельные минералы, образуются токсичные отходы, которые не должны попадать на свалку после истечения срока использования, а должны правильно утилизироваться.

Утилизация компьютерного оборудования осуществляется по специально разработанной схеме, которая должна соблюдаться в организациях:

Создание комиссии, задача которой заключается в принятии решений по списанию морально устаревшей или не рабочей техники.

Разработка приказа о списании устройств. Для проведения экспертизы привлекается квалифицированное стороннее лицо или организация.

Составление акта утилизации, основанного на результатах технического анализа, который подтверждает негодность оборудования для дальнейшего применения.

Формирование приказа на утилизацию.

Утилизация оргтехники, осуществляемая специализированной фирмой.

После оформления всех необходимых документов, компьютерная техника вывозится со склада на перерабатывающую фабрику. Все полученные в ходе переработки материалы вторично используются в различных производственных процессах [54].

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Пожар, из-за непосредственной связи с техническими объектами, классифицируют как непреднамеренную чрезвычайную ситуацию техногенного характера [47].

Пожаробезопасность в производственном помещении направлена на сохранение материальных ценностей, жизни и здоровья людей от неконтролируемого процесса горения. Для определения способов осуществления пожаробезопасности необходимо определить категории помещений определяются, исходя из вида находящихся в помещениях горючих веществ и материалов, их количества и пожароопасных свойств, а также, исходя из объемно-планировочных решений и помещений и характеристик проводимых в них технологических процессов [48]. Аудитория 001В 10 корпуса относится к классу Д – пониженная пожароопасность, так как в помещении находятся негорючие вещества и материалы в холодном состоянии

Основную опасность представляет возгорание. Пожар в рабочем помещении может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера.

К причинам неэлектрического характера относятся халатное и неосторожное обращение с огнём. К причинам электрического характера относятся: короткое замыкание; перегрузка проводов; искрение; статическое электричество.

Режим короткого замыкания – появление в результате резкого возрастания силы тока, электрических искр, частиц расплавленного металла, электрической дуги, открытого огня, воспламенившейся изоляции. Причины возникновения короткого замыкания: ошибки при проектировании; старение изоляции; увлажнение изоляции; механические перегрузки.

Пожарная опасность при перегрузках – чрезмерное нагревание отдельных элементов, которое может происходить при ошибках проектирования в случае длительного прохождения тока, превышающего номинальное значение.

5.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Работник обязан:

- соблюдать требования охраны труда;
- правильно применять средства индивидуальной и коллективной защиты;
- проходить обучение безопасным методам и приемам выполнения работ, и оказанию первой помощи пострадавшим на производстве, инструктаж по охране труда, стажировку на рабочем месте, проверку знаний требований охраны труда;
- немедленно извещать своего непосредственного или вышестоящего руководителя о любой ситуации, угрожающей жизни и здоровью людей, о каждом несчастном случае, происшедшем на производстве, или об ухудшении состояния своего здоровья, в том числе о проявлении признаков острого профессионального заболевания (отравления);
- проходить обязательные предварительные (при поступлении на работу) и периодические (в течение трудовой деятельности) медицинские осмотры, другие обязательные медицинские осмотры, а также проходить внеочередные медицинские осмотры по направлению работодателя в случаях, предусмотренных настоящим Кодексом и иными федеральными законами.

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и

производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

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

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

Выводы по разделу

При выполнении раздела «Социальная ответственность» магистерской диссертации были рассмотрены специальные правовые нормы трудового законодательства и организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя, которые регулируются трудовым кодексом Российской Федерации и СанПиН 2.2.2/2.4.1.1340-03. Проведен анализ основных вредных и опасных факторов, среди которых: отклонение показателей микроклимата, превышение уровня шума, повышенный уровень электромагнитного излучения, недостаточная освещенность рабочей зоны, поражение электрическим током. Проведен анализ влияния процесса исследования на окружающую среду, а также рассмотрены мероприятия по предотвращению наиболее вероятной ЧС.

Выводы

1. Максимальное изменение температурных характеристик плазмы разряда наблюдается при малой концентрации молекулярного газа в плазмообразующей смеси. Так при изменении концентрации воздуха от 5% до 15% электронная температура меняется от 8021К до 6587К, а газовая температура от 1943К до 2337К.

2. Установлено, что напряжённость электрического поля разряда, горящего в смеси атомарного и молекулярного газа, уменьшается вдоль его оси на 20%. Отсутствие существенного затухания электромагнитного поля (в плазме разряда) позволяет высказать предположение о наличии отражения электромагнитной волны в конце канала разряда.

3. В ходе работы были измерены величины тепловых потерь в плазме разряда. Определено что тепловые потери нелинейно зависят от концентрации молекулярного газа в плазмообразующей смеси. Средняя величина удельной мощности разряда при этом варьируется от 17 до 28 Вт/см.

4. В работе наблюдается удовлетворительное согласие между расчётными и экспериментальными результатами при определении тепловой мощности разряда.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зилитинкевич С.И. Электрическое факельное истечение // Телеграфия и телефония без проводов. – 1928. - № 9. – с. 652-657.
2. Truneček V. Unipolar high – frequency discharge // Folia Fac. Sci. Nat. University. 1971, - vol. 12, - pp.3-13.
3. Truneček V. Unipolar and electrodeless capacitively coupled high-frequency discharges excited at atmospheric pressure and their applications // Acta physica slovacica. - 1979. – Bd 29. – pp.180-183.
4. Farský V., Janča J. Energetische Verhältnisse in Plasma empoligar // Beitr. Plasmaphysik. – 1968. - Bd.9. – s.129-142.
5. Капиčka V. Измерение концентрации заряженных частиц в факельном разряде // Ceskosl. casop. fus. – 1967. A17. - №1. – s.5-9
6. Janča J. Transmission and energy exchange in unipolar h. f. discharges // Folia prirodovedecke fac. U.J.E.P. Brno. – 1968. – Bd.9. - № 10. – p. 21-40.
7. Капиčka V. Corona and high – frequency discharge // Acta phys. Slov. – 1979. - Bd.29 - № 2 - pp.119-122.
8. Капиčka V., Kovar L., Lerka K. High – frequency discharges and some possible applications// Acta phys. Slov. – 1979. - Bd.29 - № 2, - pp.130-132.
9. Truneček V. Fackelentladung und Fackelboden // Beiträge aus der Plasmaphysik. – 1962. - Vol. 1. - № 2. – s.116-121.
10. El Gamal M. // Contr. Pap. of 8 Int. Conf. in Ioniz. Gases, Vienna. – 1967. – p.237.
11. Григорович Р., Кристеску Д. К теории высокочастотного факельного разряда // Оптика и спектроскопия. – 1959. - № 6. - Вып. 2. – с.129-136
12. Аппаратура и методы исследований плазмы ВЧ разрядов и их практическое применение / Под ред. Тихомирова И.А., - Томск: Изд-во ТГУ. - 1976, - 64 с.

13. Jecht U., Kessler W. Uber den Anregungsmechanismus einer HF-Fackelentladung bei 2400 MHz // Zeitschrift für Physik. – 1964. – Bd. 178. - №2. – s.133-145

14. Farský V., Janča J. Mutual relation among macro and microparameters in unipolar h.f.discharges // Scripta.Fac.Sci.U.J.E.P –1972. – Bd.2 – p.119-127

15. Ткаченко А.Г. Исследование теплофизических и газодинамических характеристик плазменной струи высокочастотного факельного разряда // Неравновесные процессы в разряженных средах. Новосибирск. – 1983. – с.28-

16. Марусин В.В., Тихомиров И.А. Получение амплитудно-модулированной плазмы // Генераторы низкотемпературной плазмы. М.: - 1969. – с.110-115.

17. Марусин В.В., Тихомиров И.А., Юрьев Ю.Г. Влияние амплитудной модуляции на свойства ВЧФ разряда // Генераторы низкотемпературной плазмы. М.: - 1969. – с.116-118.

18. Тихомиров И.А. Квеско С.Б. Плазма амплитудно-модулированного высокочастотного факельного разряда и перспективы ее использования//Физика и химия обработки материалов, - 1984. - №6. – с. 35-37.

19. Прокофьев А.М. Влияние постороннего постоянного электрического поля на факельное истечение // ЖЭТФ. - 1937. - №8. – с.987-989

20. Truneček V. Effects of superimposed d.c.field on temperature of torch discharge // 9th Internat. Conf. Phenomena Ioniz. Gases. – 1969. – Budapesht. –p.354

21. Truneček V., Talský A. Effects of superimposed d.c.field on h.f.unipolar discharges // 9th Internat. Conf. Phenomena Ioniz. Gases. – 1969. – Budapesht. –p.355.

22. Захаров В.К. Исследование влияния внешних электрических полей на высокочастотный факельный разряд // Теплофизика Высоких Температур. – 1972. – 10. - №3. – с.291-498.

23. Кузовников А.А., Цянь-Гао-Юнь. Исследование высокочастотного разряда в диапазоне от 1,5 до 15 МГц // Изв. Вузов. Физика. – 1960. - № 5. – с.55-59.

24. Тихомиров И.А., Тихомиров В.В., Левашов В.С. Факельный разряд, как линия с распределенными параметрами // Известия Томского Политехнического Института. – 1976. – т.276. – с.12-15.

25. Качанов А.В. и др. Некоторые вопросы согласования высокочастотных генераторов с нагрузкой в виде факельного разряда // Физика газоразрядной плазмы. М., 1968. – Вып.1. – с.68-74.

26. Качанов А.В., Трехов Е.С., Фетисов Е.П. Электродинамическое описание высокочастотного факельного разряда // Физика газоразрядной плазмы. – М., 1968. – Вып.1. – с. 39-47.

27. Исследование пространственного распределения параметров ВЧ факельного разряда. 1. Газовая температура / Тихомиров И.А., Перскальскис Б.Ш., Федянин В.Я., Михайличенко Ю.П., Тихомиров В.В., Пуговкин М.М.; Томский политехнический институт. – Томск, 1973. – 9с. - Деп. в ВИНТИ. №7606 – 73.

28. Мочалов К.Н., Никифоров А.Я., Богоносцев А.С. К вопросу о температуре факельного разряда // Журнал Технической Физики. – 1950. – т.20. – с.474 – 477.

29. Кудинов А.П. Исследование плазмы ВЧ факельного разряда сложного химического состава и плазмы горения спектральными и лазерными методами. дис. ...канд. физ.-мат. наук / А.П. Кудинов; Томский политехнический университет – Томск, 1979. – 158с.

30. Сузи Я.А., Лаан М.Р. Измерение вращательной температуры во время импульсного ВЧ разряда // Учёные записки Тартуского университета. – 1982. – т.631. – с.13 – 18.

31. Truneček V. Temperature and processes of dissociation in unipolar discharge // VIII Semin. on Plasma Research. CSAV. – 1975. – p.28
32. Farský V. The power characteristic of a torch discharge and its dependence on electrode geometry // Czechoslovak Journal of Physics. – 1967. - vol. B17. - pp. 780-785.
33. Mollwo L. Electronentemperatur und Elektronenrauschen in der hochfrequenten Fackelentladung // Ann. der Phys. – 1958. – №2. – s. 97-129.
34. Зоммерфельд А. Электродинамика. – М.:ИЛ, 1958. – 410с.
35. Качанов А.В. и др. Экранированный высокочастотный факельный разряд // Физика газоразрядной плазмы. – М., 1968. – Вып.1. – с.60-67
36. Kannapan D., Bose T.K. Transport properties of a two-temperature argon plasma. // The Physics of Fluids. – 1977. – vol. 20. – №10. – p.1668 – 1673.
37. Власов В.А., Тихомиров И.А., Луценко Ю.Ю. О характере распределения частотных составляющих электромагнитного поля в плазме высокочастотного факельного разряда. // Тезисы докладов IV Международной конференции по фундаментальным и прикладным проблемам физики. – Саранск, 2003. – с.16.
38. Власов В.А., Тихомиров И.А., Луценко Ю.Ю. Определение величины отношения коэффициента фазы к коэффициенту затухания электромагнитной волны, распространяющейся в плазме высокочастотного факельного разряда. // Тезисы докладов IV Международной конференции по фундаментальным и прикладным проблемам физики. – Саранск, 2003. – с.17.
39. <http://lud.bmstu.ru/> Метод относительных интенсивностей (метод Орнштейна)
40. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197;

41. СанПиН 2.2.2/2.4.1.1340-03. «Гигиеническими требованиями к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 15.06.2003 г.;
42. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М.: Стандартиформ, 2016;
43. ГОСТ 12.0.003-74. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация – М.: ИПК Издательство стандартов, 1992. – 4 с.;
44. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиеническими требованиями к микроклимату производственных помещений»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 13.06.2003 г.;
45. ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартиформ, 2008. – 11с.;
46. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
47. Теоретические основы безопасности жизнедеятельности / Р. И. Айзман, С. В. Петров, В. М. Ширшова. — Новосибирск: АРГА, 2011. — 208 с. — (Серия «Безопасность жизнедеятельности»);
48. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. – М.: МЧС России, 2009. – 35 с.;
49. СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.– М.: Минрегион России, 2016;
50. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31.10.1996 г.;
51. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

52. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

53. ГОСТ 12.1.007-76. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.– М.: ИПК Издательство стандартов, 1976;

54. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 N 89-ФЗ;

55.ГОСТ 12.1.004-91, ССБТ «Пожарная безопасность. Общие требования». – М.: МВД России, 1992. – 25 с.

56. Михалевский В.Д., Прокофьева В.В. Исследование температуры металлической дуги по молекулярному спектру гидроксидов // ЖЭТФ – 1950. – т.20. – Вып.7. – с.584 – 593.

Приложение А

Calculation of the thermophysical characteristics of a high-frequency flare discharge burning in a mixture of atomic and molecular gas.

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Семенов В.И.		12.03.2020

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Луценко Ю.Ю.	д.ф.-м.н		12.03.2020

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Смирнова Ульяна Александровна			12.03.2020

Introduction

High-frequency flare discharge is a promising source of plasma during various plasma-chemical processes. It has several advantages over other types of high-frequency discharges. The flare discharge is easily excited in any medium, including hydrogen, is dust resistant, has a large plasma volume at a small amount of input power.

When carrying out certain plasma-chemical processes, for example, in the preparation of metal carbides, as well as in the reduction of metal chlorides, a monoatomic inert gas is added to the plasma-forming gas along with the molecular gas reducing agent.

Note that when developing flare plasmatrons, it is necessary to know the relationship between the thermal power of the discharge and the length of its channel. However, to date, the determination of the thermal power of a flare discharge burning in a mixture of molecular and atomic gases has not been carried out.

In this work, we measured the specific thermal power of the flare discharge depending on the ratio of the concentration of molecular and atomic gases. Argon was used as atomic gas, and air was used as molecular gas. The measurements were carried out by calorimetry.

Along with measurements of the specific power of the discharge, measurements were made of the electronic and gas temperature of the discharge. Based on the measurements, the specific electrical conductivity of the discharge plasma was calculated. The electric field strength in the discharge channel was also determined. Based on the obtained values of the electric field strength and the value of electrical conductivity, the calculation of the thermal power of the discharge was carried out.

A.1 Properties and features of high-frequency flare discharge

A high-frequency flare (single-electrode) discharge (HFFD) was discovered by S.I. Zilitinkevich in 1928 in the study of the operation of RF generators.

A high-frequency flare discharge (Fig. 1.1) has three structural elements: a near-electrode layer 1, channel 2 and a diffusion shell 3. The discharge channel is a brightly luminous formation of a cylindrical shape, the diameter of which gradually decreases along the axis of the discharge. A high-frequency current flows in the discharge channel and the predominant dissipation of electromagnetic wave energy occurs. The discharge channel is surrounded by a weakly luminous diffusion shell, the diameter of which is 3-10 times larger than the diameter of the channel. In the diffusion shell, ions recombine as a result of thermal ionization in the zone of the discharge channel. The near-electrode layer is located between the discharge plasma and the electrode surface. It is characterized by high electric field strengths. In this zone, electrons are accelerated to energies sufficient to ionize the gas molecules. The combustion mechanism of HFVR is due to thermal ionization processes.

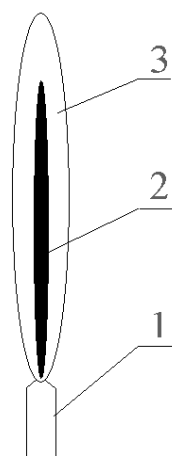


Fig.1.1 - HF flare discharge 1 - near-electrode layer; 2 - channel; 3 - diffusion shell

At powers of $W > 70$ W, in the case of a discharge excitation from a cooled electrode, as a rule, only HFFD can be observed. Therefore, when working with sufficiently powerful discharges used for applied and research purposes, excited at a frequency of $\nu > 10$ MHz, a single-electrode discharge can be identified with HFFD.

From the moment of its discovery to the present, high-frequency flare discharge has been studied mainly in the following directions:

1. the study of the influence of various factors (form, electrode material, kind of plasma-forming gas, amount of input power) on the properties of a high-frequency flare discharge;

2. the study of the plasma characteristics of HFFD (temperature of heavy particles, temperature and concentration of electrons, degree of nonequilibrium discharge plasma);

3. theoretical and experimental studies of heat and mass transfer in plasma HFVR;

4. the study of amplitude-modulated plasma HFFD;

5. the study of the influence of external electric fields on the properties and behavior of HFFD;

6. the study of the coordination of the HFFD with the HF generator;

7. the study of the electrical characteristics of the HFFD (burning voltage, total current, discharge-earth capacity).

HFFD is easily excited in any gaseous medium (air, inert gases, hydrogen, etc.) at pressures of 10^1 – 10^5 Pa. At pressures above $3,3 \cdot 10^4$ Pa, the discharge usually has a contracted shape, however, when burning in gases with high thermal conductivity, its shape becomes diffuse. A similar mode of discharge burning is observed upon its excitation in a hydrogen medium.

Flare contraction is associated with its spectral characteristics. In particular, a correlation was established between the diameters of the emission regions of the bands of NO and OH molecules and the diameters of the channel and diffusion shell of a discharge burning in air at atmospheric pressure. In fig. Figure 1.2 shows the dependences of the diameter of the emission regions of the NO bands depending on the diameter of the discharge channel and the diameter of the emission region of the OH bands, depending on the diameter of the diffusion shell. As can be seen from the figure, the emission of NO bands occurs in the discharge channel, and the emission of OH bands occurs both in the channel and in the diffusion shell of the discharge.

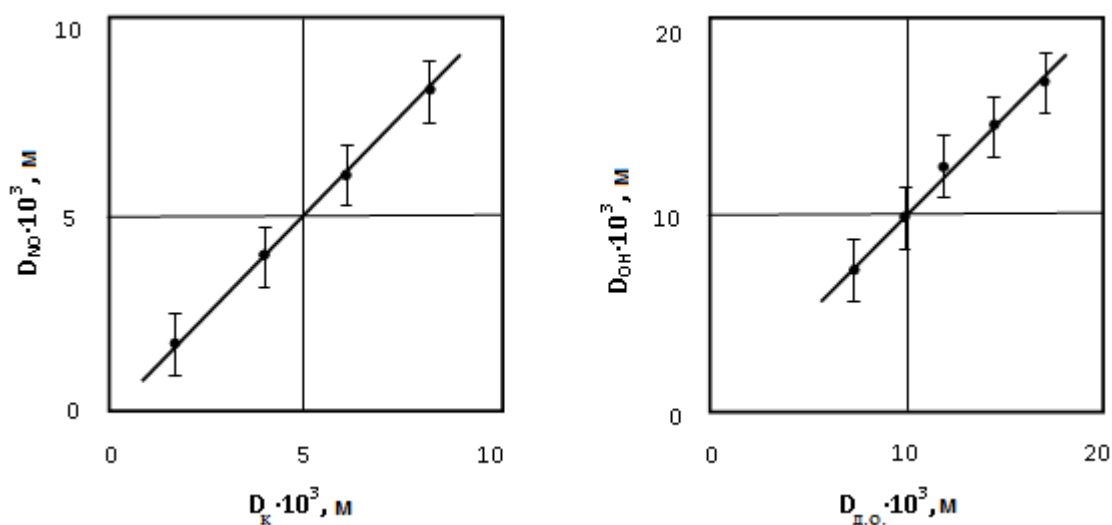


Figure 1.2 - Dependences of the diameters of the radiation regions of OH and NO molecules on the diameters of the channel and the diffusion shell of the discharge, respectively

In fig. 1.3 and 1.4, the main results of experimental studies of the properties and characteristics of HFFD burning in air at atmospheric pressure are presented.

The change in the length of the discharge channel depending on the frequency of the electromagnetic field is shown in Fig. 1.4.

Thus, taking into account that the ionization rate depends on the ionization energy according to the exponential law, it can be assumed that the contribution of molecules to the balance of electron formation in plasma is not significant.

From previous experimental studies, it follows that the structure of the HFFD and its dimensions are determined by the properties of the plasma-forming gas, the nature and level of the power introduced into the discharge.

Quite a lot of work is devoted to measuring the temperature of a flare. The gas temperature of the HFFD largely depends on the type of plasma-forming gas and the frequency of the electromagnetic field supplying the discharge. Gas temperature also depends on the power invested in the discharge and on the frequency (Fig. 1.5 and Fig. 1.6). When burning in molecular gases, the temperature of the HFFD is $(3 - 4.5) \cdot 10^3$ K. The electron temperature in this case is slightly different from the temperature of heavy particles. In the case of a discharge burning in monatomic gases, its gas temperature is $(0.8 - 2.0) \cdot 10^3$ K. The electron temperature in this case is significantly higher than the gas temperature. For example, for argon, the difference between electron and gas temperatures is 5000 - 6000 K, and for helium - tens of thousands of degrees.

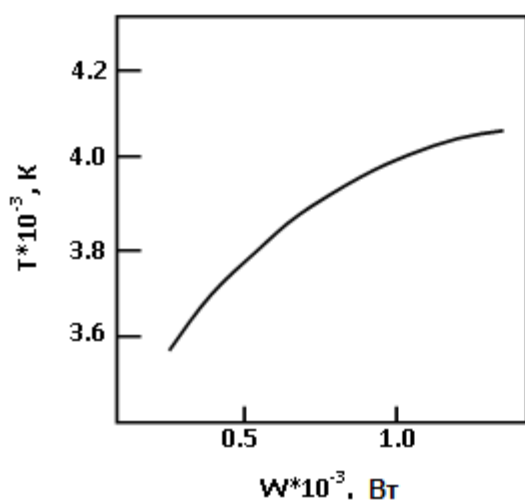


Fig. 1.3 - Dependence of the HFFD channel length on the discharge radius

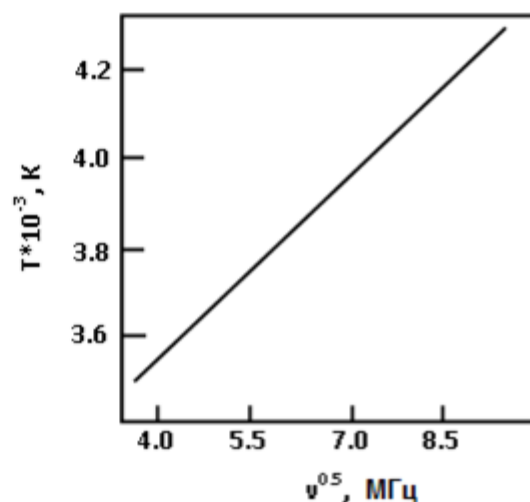


Fig. 1.4 - Dependence of the HFFD channel length on the frequency

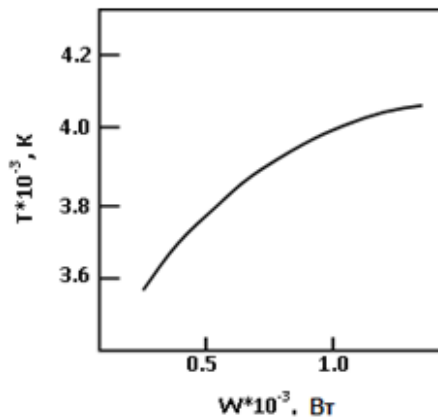


Fig. 1.5 - The dependence of the temperature in the HFFD channel on power

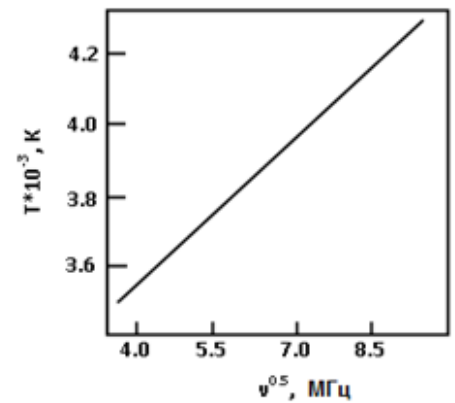


Fig. 1.6 - Dependence of the HFFD temperature on the field frequency

The above difference in the temperature characteristics of HFFD plasma burning in molecular and monatomic gases is associated with a higher efficiency of energy transfer from electrons to heavy particles in molecular gases compared to atomic ones. In the case of even insignificant additions of molecular gas, the temperature of the HFFD burning in the atomic gas increases significantly. For HFFD burning in atmospheric air, the temperature of the diffusion shell is 2200-2500K.

For molecular gases, the difference between electron and gas temperatures increases with decreasing discharge power and pressure. In fig. 1.7 the results of measurements of electron and gas temperatures of a flare discharge excited in air are presented, depending on pressure. It can be seen from the figure that with increasing pressure, and hence the frequency of collisions of electrons with air molecules, the plasma anisotherm decreases.

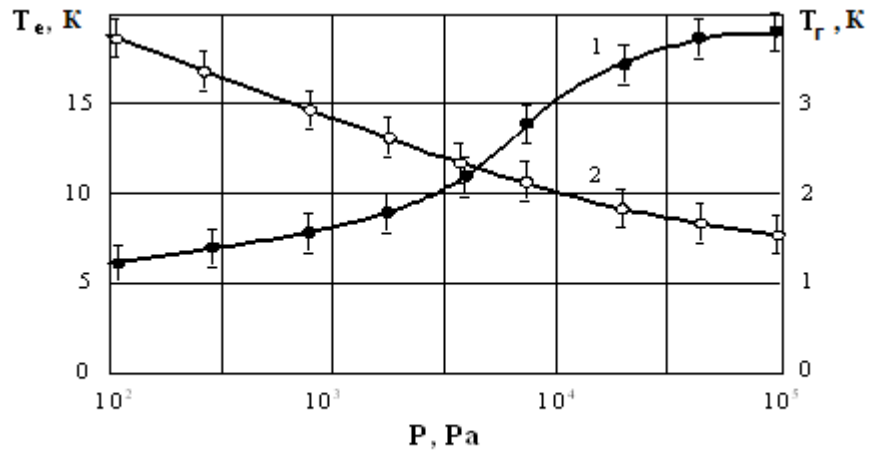


Fig. 1.7 - Dependence of electronic and gas temperatures of HFFD on pressure

The HFFD plasma is heterogeneous, both in the radial and axial directions. Therefore, the results of various authors can quite significantly differ from each other.

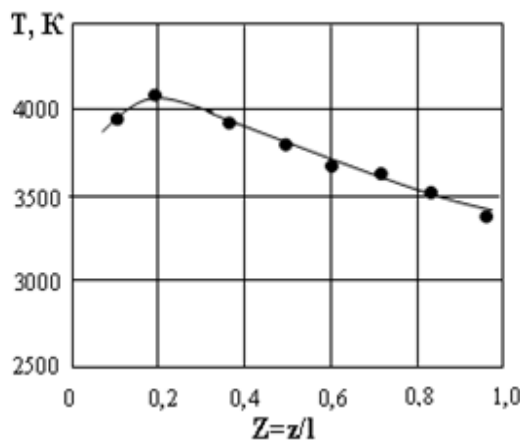


Fig. 1.8 - Axial distribution of gas temperature HFFD in air

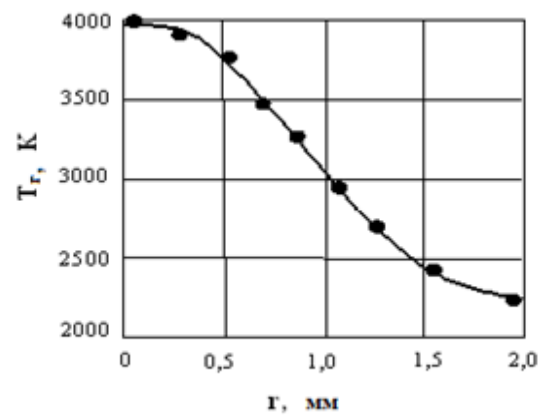


Fig. 1.9 - Radial distribution of gas temperature HFFD in air

The axial and radial distribution of flare discharge temperatures were measured only in a small number of works. It was shown in the works that the change in gas temperature along the axis of the flare discharge burning in the air is insignificant, and amounts to 300 ... 500K. A typical axial distribution of the gas temperature of the HFFD is presented in Fig. 1.8. In this figure, the axial coordinate is given in units of channel length l HFFD. The radial change in

temperature of the air plasma of the discharge, on the contrary, is quite significant (Fig. 1.9)

The distribution of the electron discharge temperature is similar to the distribution of gas temperature. Figure 1.10 shows the radial distribution of electron temperature in the air (curve 1) and nitrogen (curve 2) plasma, which shows that the air plasma of the flare discharge is more contracted, which is apparently due to the presence of plasma-chemical reactions associated with the formation of NO molecules, as well as the presence of O^2 molecules with a significant electron capture cross section. The presence of electronegative gas molecules significantly increases discharge contraction.

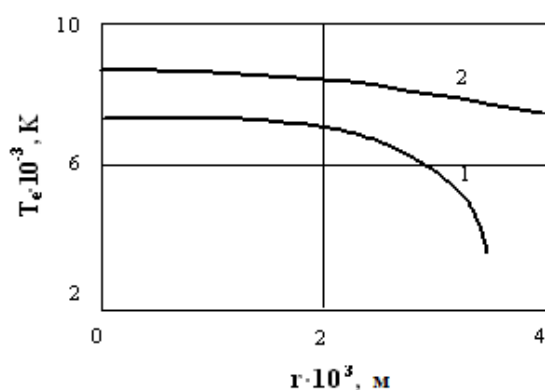


Fig. 1.10 - Radial Distribution of Electron Temperature

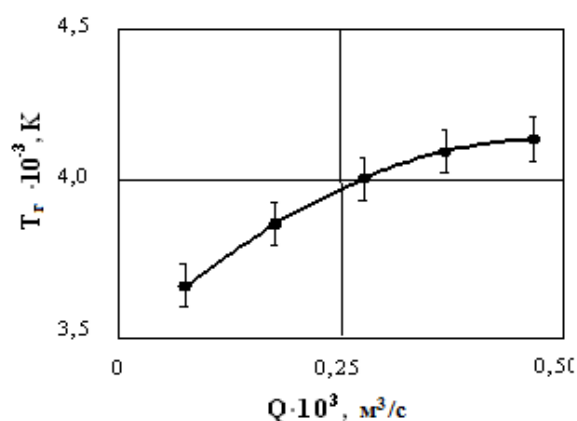


Fig. 1.11 - Dependence of the gas temperature of the HFFD in air on the gas pumping rate

The spatial distribution of temperatures in a flare can be affected not only by its power and frequency of the electromagnetic field, but also by the rate of blowing of the plasma-forming gas. In fig. Fig. 1. 11 shows the dependence of the mean axial gas temperature of the plasma on the rate of pumping of the plasma-forming gas. It can be seen from the figure that with an increase in the gas pumping rate, the mean axial gas temperature of the plasma somewhat increases. This effect is explained by the fact that with an increase in the gas

purge rate, the gas temperature in the central part increases, while at the periphery the gas temperature decreases.

The electron concentration in the plasma of a discharge burning at atmospheric pressure was determined by spectral and microwave methods. Using the microwave method, it is possible to determine not only the concentration of electrons, but also the frequency of their collisions with heavy particles. In Fig. 1.12 the results of measurements by the microwave method of the distribution of the electron concentration and the effective frequency of their collisions with heavy particles for a flare discharge with a power of 1 kW burning in air at atmospheric pressure, depending on the distance from the electrode, are presented. The frequency of the electromagnetic field was 30 MHz. We note, however, that the microwave method has a low spatial resolution and, as a result, allows the above parameters to be estimated only averaged over the discharge cross section.

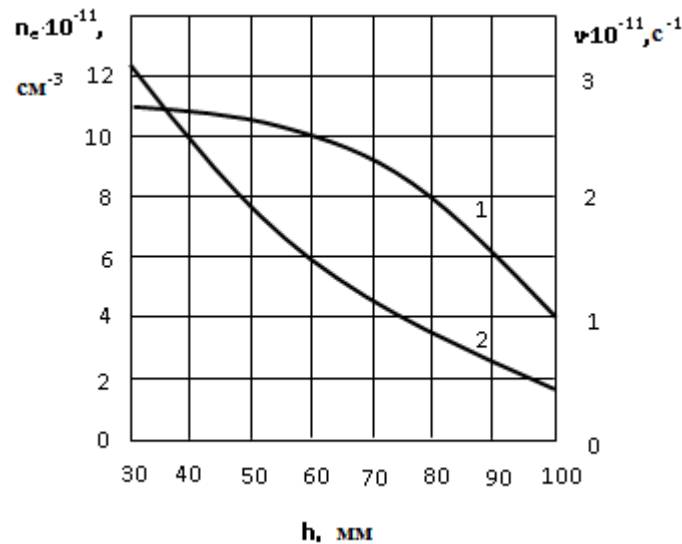


Figure 1.12 - The axial distribution of the characteristics of the electronic component of the air plasma HFFD.

1 - electron concentration; 2 - collision frequency

Spectral methods make it possible to estimate the electron concentration directly in the discharge channel. Usually, the Stark effect of broadening of spectral lines is used.

The values of the transport characteristics of the discharge plasma are largely determined by the form of the electron velocity distribution function in the discharge plasma. For the first time, the form of the velocity distribution function of electrons in a high-frequency discharge was obtained by Margenau. He assumed that the electric field is small, and as a result of this, inelastic collisions can be neglected. For a flare discharge, especially during its combustion in molecular gases, these conditions are not observed. Therefore, the velocity distribution function of electrons in a plasma of a flare discharge differs from the Marghenau distribution.

In fig. 1.13 shows the electron energy distribution function (curve 2) for the case of a high-frequency torch discharge burning in air at atmospheric pressure. In this case, the gas temperature is 4000°K , and the electric field strength is 300 V / cm . For comparison, the Maxwell distribution function for $T = 4000^{\circ}\text{K}$ (curve 1) and the Margenau distribution function (curve 3) are also constructed here. From the figure it follows that the electron energy distribution in the plasma of the flare discharge is substantially non-Maxwellian. Calculations also show that the form of the distribution function depends on the electric field strength. Near the electrode, the electric field strength increases, the electrons acquire large directed velocities, and the maximum of the distribution function shifts to the right.

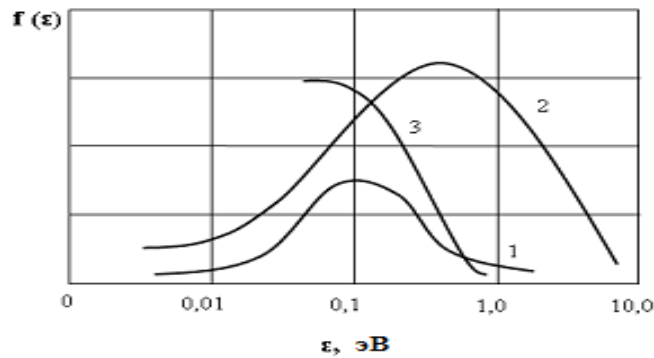


Fig. 1.13 - Energy distribution function of electrons for a high-frequency torch discharge.

1 - distribution function of electrons over Maxwell energies;

2 - calculated function of electron energy distribution;

3 - the distribution function of electrons over the energies of Margenau.

Today, the topic of the process of energy transfer from an electromagnetic field to an HFFD plasma is very relevant.

In HFFD burning in air or nitrogen at atmospheric pressure, N_2^+ ions with an excitation potential of 18 eV are present near the electrode. These molecular ions diffuse from the electrode into the discharge plasma, where, through collisions with electrons, they dissociatively recombine into nitrogen atoms. Since the dissociation energy of molecular nitrogen is 9.7 eV, the resulting atoms receive a kinetic energy of 8.3 eV, which, due to collisions, quickly dissipates mainly in the form of random thermal motion of plasma particles. This mechanism of electromagnetic energy transmission is confirmed by measurements of the temperature of a discharge burning in molecular gases with various dissociation energies. HFFD is a strong atomizer.

Note that the physical features of the high-frequency flare discharge considered above mainly relate to low-power discharges with a channel length of not more than a few centimeters. In particular, this relates to the determination of capacitance and resistance, as well as to the axial distribution of the discharge temperature.

To date, the study of the thermophysical characteristics of a high-frequency flare discharge burning in a mixture of molecular and atomic gases has not been studied in sufficient form.

A.2 Heat exchange in the plasma torch

Heat transfer of a plasma with walls in plasma torches is characterized by a number of features that significantly complicate its analysis and make it difficult to calculate. These features are mainly determined:

- A) dissociation and partial ionization in the gas;
- B) the presence of a magnetic field;
- C) radiation, because of which it is impossible to use computational methods based on the self-similarity of the temperature and enthalpy profiles, since the latter vary in length because of the difference from zero $\text{div } \mathbf{q}^{\wedge}$;
- D) the presence of developed turbulence in the combustion zone of the discharge and behind it; Moreover, an additional turbulence is exerted by shunting the discharge;
- E) unstabilized flow; the thickness of the boundary layer is $5 < D$, where D is the diameter of the channel through which the plasma flows;
- F) the presence of a tangential component of the velocity of the gas acquired as a result of the interaction of the gas with the discharge and often exceeding the axial component of the velocity.

However, within the framework of simple models (for a thin cylindrical wall and laminar gas motion) it is possible to estimate the amount of heat transferred from the plasma to the walls and water in the casing. Accordingly, the heat transfer coefficient will be composed of three components: the heat transfer coefficient from the hot gas to the wall, the temperature resistance of the quartz wall, and the heat transfer coefficient from the wall to the water. The determining factor is the heat transfer coefficient from the hot gas to the wall.