#### Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт <u>Физико-технический</u> Направление подготовки <u>14.04.02 Ядерные физика и технологии</u> Кафедра Физико-энергетические установки

#### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы

#### Определение осевого распределения электрофизических характеристик высокочастотного плазмохимического реактора

УДК <u>66.023.2.088:537</u>

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Б	Мирзоев Спартак Рамилевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Луценко Ю.Ю.	д.фм.н		

#### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

1 .	· · · · · ·	<b>1 1</b>		
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Верховская М. В.	К.Э.Н.		
По разделу «Социальная	ответственность»			
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Гоголева Т. С.	к.фм.н.		

#### **ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ΤΦ	Шаманин И.В.	д.фм.н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения
Профессион	альные компетенции
P1	Способность самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности, расширять и углублять свое научное мировоззрение.
P2	Готовность к созданию новых методов расчета современных физических установок и устройств, разработке методов регистрации ионизирующих излучений, методов оценки количественных характеристик ядерных материалов.
P3	Способность применять экспериментальные, теоретические и компьютерные методы исследований в профессиональной области.
Р4	Способность самостоятельно выполнять экспериментальные или теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современной техники и методов расчета и исследования
Р5	Способность оценивать риск и определять меры безопасности для новых установок и технологий, составлять и анализировать сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать методы уменьшения риска их возникновения.
P6	Способность провести расчет, концептуальную и проектную проработку современных физических установок и приборов
P7	Способность формулировать технические задания, использовать информационные технологии и пакеты прикладных программ при проектировании и расчете физических установок, использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов.
P8	Способностью к анализу технических и расчетно-теоретических разработок, к учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности и другим нормативным актам.
Р9	Способность на практике применять знание основных понятий в Области интеллектуальной собственности, прав авторов, предприятия-работодателя, патента обладателя, основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
P10	Способность проводить поиск по источникам патентной информации, определять патентную чистоту разрабатываемых объектов, подготавливать первичные материалы к патентованию изобретений, официальной регистрации компьютерных программ и баз данных

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

Студенту:

Группа 0АМ4Б ФИО Мирзоеву Спартаку Рамилевичу

Институт	Физико-технический	Кафедра	Техническая физика
Уровень	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02. «Ядерные
образования			физика и технологии»

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих

2. Нормы и нормативы расходования ресурсов

3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования

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

1. Планирование и формирование бюджета научных исследований

2. Разработка календарного план-графика выполнения ВКР

#### Перечень графического материала:

1. Календарный план-график выполнения ВКР (диаграмма Ганта)

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

#### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Верховская М.В.	К.Э.Н.		

#### Задание принял к исполнению студент:

Группа	a	ФИО	Подпись	Дата
0AM4	Б	Мирзоев С.Р.		

#### ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО		
0АМ4Б	Мирзоеву Спартаку Рамилевичу		

Институт	ФТИ	Кафедра	Технической физики
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 «Ядерные
			физика и технологии»

Исходные данные к разделу «Социальная ответс	гвенность»:
1. Описание рабочего места (рабочей зоны, механического оборудования) на предмет возникновения:	<ul> <li>вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующее излучение, работа с газовыми баллонами);</li> <li>опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> <li>Работа с баллонами.</li> </ul>
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	<ul> <li>электробезопасность;</li> <li>пожаровзрывобезопасность;</li> <li>требования охраны труда при работе на ПЭВМ.</li> <li>работа с газовыми баллонами.</li> </ul>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию,	проектированию и разработке:
1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul> <li>действие фактора на организм человека;</li> <li>приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно- технический документ);</li> <li>предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).</li> </ul>
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	<ul> <li>электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

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

#### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Гоголева Т.С.	к.фм.н.		

#### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Б	Мирзоев Спартак Рамилевич		

#### Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт <u>Физико-технический</u> Направление подготовки (специальность)<u>14.04.02. «Ядерные физика и технологии»</u> Кафедра <u>Техническая физика</u>

## УТВЕРЖДАЮ:

#### Зав. кафедрой

(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
0АМ4Б	Мирзоеву Спартаку Рамилевичу
<b>T</b>	

Тема работы:

Определение осевого распределения электрофизических характеристик высокочастотного плазмохимического реактора		
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 791/с от 04.02.2016	

Срок сдачи студентом выполненной работы:

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Определение осевого распределения электрофизических характеристик высокочастотного плазмохимического реактора
Перечень подлежащих исследованию,	При разработке магистерской диссертации должны
проектированию и разработке	быть рассмотрены следующие вопросы:
вопросов	1. Расчет электронной и газовой температур.
	2. Определение удельной электропроводности.
	3. Определение напряженности электрического
	поля и удельного энерговыделения
	4. Экономическое обоснование проведения НИР.
	Выводы по работе. Заключение.
Перечень графического материала	

(с точным указанием обязательных чертежей)		
Консультанты по разделам выпу	скной квалификационной работы	
Раздел	Консультант	
«Финансовый менеджмент,		
ресурсоэффективность и	доцент каф. Мен. ИСГТ	
ресурсосбережение»	Верховская Марина Витальевна	
«Социальная ответственность»	ассистент каф. ПФ ФТИ	
	Гоголева Татьяна Сергеевна	
По иностранному языку	старший преподаватель каф. ИЯ ФТИ	
1 5 5	Ермакова Янина Викторовна	
Названия разделов, которые до	олжны быть написаны на русском и иностранном	
языках:		
Литературный обзор, эксперимента	льный часть	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной	
квалификационной работы по линейному графику	

#### Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Луценко Ю.Ю	д.фм.н		

#### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Б	Мирзоев Спартак Рамилевич		

#### Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

#### «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт Физико-технический

Направление подготовки (специальность)<u>14.04.02 «Ядерные физика и технологии»</u> Уровень образования <u>Магистратура</u> Кафедра <u>Технической физики</u>

Период выполнения (весенний семестр 2015/2016 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:

Дата	Название раздела (модуля) /	Максимальный
контроля	вид работы (исследования)	балл раздела
1-00-001-0		(модуля)
17.03.2016	Разработка ТЗ на ВКР	20
24.03.2016	Составление и утверждение технического задания	10
25.0331.03.2016	Выбор направления исследования и способов решения	10
	задач	
1.0414.04.2016	Сбор и изучение научно-технической литературы	10
15.0418.04.2016	Сбор плазмохимической установки	5
19.0414.05.2016	Проведение экспериментов по определению электронной и	10
	газовой температур	
15.0520.05.2016	Определение характеристик плазмохимического реактора	10
	на основе исследованной температуры	
21.0523.05.2016	Анализ и обработка полученных результатов	5
24.05.2016	Обобщение и оценка эффективности полученных	5
	результатов	
25.0502.06.2016	Оформление пояснительной записки	5

#### Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Луценко Ю.Ю.			

#### СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Техническая физика	Шаманин И.В.	д.фм.н		

### Оглавление

РЕФЕРАТ 10
ВВЕДЕНИЕ 11
1 ОБЗОРНАЯ ГЛАВА
1.1. Свойства и особенности высокочастотного факельного разряда 12
1.2. Диагностика плазмы и её специфика 20
2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РАЗРЯДНОЙ
ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА29
2.1. Схема экспериментальной установки 29
2.2. Методика измерения электронной температуры 30
2.3. Результаты экспериментов
3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА 43
3.1. Методика измерения газовой температуры 43
3.2. Результаты экспериментов 45
3.3. Определение удельной электропроводности разрядной плазмы 61
4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОЧАСТОТНОГО
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА 64
5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ
5.1. SWOT-анализ
5.2. Структура работ в рамках научного исследования
5.3. Определение трудоемкости выполнения работ
5.4. Разработка графика проведения научного исследования
5.5 Бюджет научного исследования
5.6 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

5.7. Основная заработная плата исполнителей темы 83
5.8. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)
5.9. Накладные расходы 86
6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ 88
6.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов 89
6.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов
6.2.1 Организационные мероприятия91
6.2.2 Требования безопасности при выполнении работ с использованием
персональных электронно-вычислительных машин и на плазмохимическом
реакторе
6.3 Электробезопасность95
6.3.1 Электробезопасность при работе на ПЭВМ96
6.3.2 Электробезопасность при работе с плазмохимическим реактором. 97
6.4 Пожарная безопасность99
ВЫВОДЫ
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 105
ПРИЛОЖЕНИЕ А

#### РЕФЕРАТ

Пояснительная записка к выпускной квалификационной работе представлена на 107 страницах и содержит 71 рисунок, 33 таблицы, список используемой литературы 31 наименование, 1 приложение.

Ключевые слова: температура, плазма, факельный разряд, электропроводность, плазмохимический реактор, энерговыделение, напряженность.

Цель работы – определение электрофизических характеристик плазмохимического реактора, созданного на базе высокочастотного факельного разряда, в зависимости от расхода плазмообразующего газа.

В процессе исследования проводились измерения электронной и газовой температур факельного разряда, горящего в аргоне. А также определение удельной электропроводности, напряженности электрического поля и расчет удельного энерговыделения в канале разряда при различных расходах плазмообразующего газа.

Результаты данной выпускной квалификационной работы могут быть использованы для оптимизации работы плазмохимического реактора, рабочим телом в котором является инертный газ.

Научная новизна и ценность заключается в следующем: на основе проведенных измерений осевого распределения газовой температуры могут быть рассчитаны кинетические характеристики, протекающих в реакторе, химических процессов. А также могут быть определены механические характеристики плазмохимической установки, в частности тепловая нагрузка на стенки реактора.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013. Вычисления и построение графиков выполнялись с помощью программы Microsoft Excel 2013 и Matlab 2010, а также с помощью сайта WolframAlpha.com.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Плазменные технологии находят большое применение по переработке веществ, получении высокочистых материалов с заданными свойствами, утилизации различных техногенных отходов. В настоящее время задача утилизации ядерного отработавшего топлива, радиоактивных материалов и других техногенных отходов является очень актуальной. В работе [31] приведено описание установки по разделению изотопов углерода в факельном разряде, возбуждаемом в аргоне. Данный метод основан на селективном по изотопам ускорении химических реакций в постоянном магнитном поле, протекающих с участием радикалов. Эту установку также можно использовать для утилизации облучённого графита.

Для проведения оптимизации вышеназванной плазмохимической установки необходимо знать пространственное распределение температур в плазмохимическом реакторе. Знание пространственного распределения температур также позволяет учесть влияние термодиффузии на процесс разделения изотопов.

В данной выпускной квалификационной работе рассмотрено распределение газовой электронной И температур ВДОЛЬ оси реактора. Для моделирования процессов плазмохимического В плазмохимическом реакторе используется медный водоохлаждаемый электрод, схожий по своим свойствам с графитовым электродом. На основе измерения электронной и газовой температур проведён расчёт величин удельной электропроводности плазмы разряда И напряженности электрического поля и расчет удельного энерговыделения в канале разряда при различных расходах плазмообразующего газа. Приведены результаты измерений осевого распределения электронной и газовой температуры высокочастотного факельного разряда, горящего в плазме аргона при атмосферном давлении.

#### 1 ОБЗОРНАЯ ГЛАВА

# 1.1. Свойства и особенности высокочастотного факельного разряда

Высокочастотный факельный (одноэлектродный) разряд (ВЧФР) представляет собой плазменный шнур (рис.1.1.), горящий с поверхности



Рис. 1.1.1 Высокочастотный факельный разряд

электрода, к которому приложено ВЧ напряжение. ВЧФР может быть возбужден с поверхности не только проводника, но и диэлектрика.

ВЧФР был открыт Зилитинкевичем С.И. в 1928 году [1] при исследовании работы ВЧ генераторов. Заметим, что до 60-х годов проводились исследования одноэлектродных разрядов, имеющих мощность не более 200 Вт.

1 – приэлектродный слой; 2 – канал; 3 – диффузионная оболочка Наиболее полные, на наш взгляд, исследования одноэлектродного разряда мощностью до 150-200 Вт, возбуждаемого синусоидальным ВЧ напряжением были проведены чешскими авторами [2, 3].

При вышеуказанных величинах мощностей, вкладываемых в разряд авторы работ [2, 4] выделили три режима его горения, для каждого из которых существует свой механизм протекания физических процессов: высокочастотный коронный разряд; высокочастотный факельный разряд; высокочастотный дуговой разряд.

Высокочастотный коронный разряд представляет собой целый ряд искривленных плазменных каналов, выходящих из электрода в виде "короны", либо имеет вид одного канал с размытой, диффузной структурой. Высокочастотная корона наблюдается [2] при частотах v<10 МГц, или в случае больших частот ВЧ-напряжения – при усиленном охлаждении плазмы

разряда. Для высокочастотной короны характерна высокая степень неравновесности и соответственно существенное различие между температурой электронов [17]  $T_e = (6 \div 7) \cdot 10^3$ К и температурой тяжелых частиц [34]  $T = (2 \div 3) \cdot 10^3$ К. Механизм горения высокочастотной короны объясняется на основе [5, 6] стриммерной теории.

Высокочастотный факельный разряд (рис. 1.1.) имеет три структурных [2] элемента: приэлектродный слой 1, канал 2 и диффузионную оболочку 3. Электропитание разряда осуществляется от ВЧ генератора. Горение ВЧФР наблюдается в широком частотном диапазоне, начиная с частоты v~6 МГц и выше. Механизм горения ВЧФР обусловлен [2] процессами термической ионизации.

Высокочастотная дуга представляет собой одноэлектродный разряд [4] при горении которого идет сильное испарение материала электрода. Вследствие этого при рассмотрении механизма горения высокочастотной дуги необходимо учитывать процессы на электроде, а также влияние присутствия газовой фазы материала электрода в плазме разряда. В случае охлаждения электрода высокочастотная дуга переходит в ВЧФР.

Вышеуказанные три типа одноэлектродного ВЧ разряда хорошо различаются лишь при малых мощностях высокочастотной энергии подводимой к разряду, так как в этом случае регулирование степени неравновесности плазмы разряда легко осуществить либо простым изменением подводимой к разряду мощности, либо охлаждением плазмы разряда газовым потоком.

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

ВЧ 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 ВЧФР [2, 3, 17];

2. исследование характеристик плазмы ВЧФР (температуры тяжелых частиц, температуры и концентрации электронов, степени неравновесности плазмы разряда) [7, 3, 4, 17];

3. теоретические и экспериментальные исследования вопросов тепломассопереноса в плазме ВЧФР [9, 7, 10];

исследование амплитудно-модулированной плазмы ВЧФР [13, 61,
 62];

5. изучение влияния внешних электрических полей на свойства и поведение ВЧФР [13];

6. исследование вопроса согласования ВЧФР с ВЧ генератором [6];

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. Вид, форма, режимы горения ВЧФР освещены в работах [9, 2, 4].

Из экспериментальных исследований следует, что структура ВЧФР и его размеры определяются свойствами плазмообразующего газа, характером и уровнем вводимой в разряд мощности. При давлениях более 3,3 ·10<sup>4</sup> Па свободный ВЧФР представляет собой плазменное образование с ярко выделенным тонким каналом и диффузионной оболочкой с радиусом в 3÷10 раз большем радиуса канала (рис. 1.1.1).

В таблице 1.1.1 и на рис. 1.1.2 и 1.1.3 представлены основные результаты экспериментальных исследований свойств и особенностей ВЧФР, горящего при атмосферном давлении.



Рис. 1.2. Зависимость длины канала ВЧФР от радиуса разряда



Рис. 1.3. Зависимость длины канала ВЧФР от частоты

Достаточно много работ посвящено измерению температуры факельного разряда. В таблице 1.1.1 приведены значения температуры канала ВЧФР. Как видно из таблицы 1.1.1 газовая температура ВЧФР в значительной степени зависит от рода плазмообразующего газа и частоты питающего разряд электромагнитного поля. Газовая температура зависит также [15] от мощности, вкладываемой в разряд и от ВЧ частоты (рис.1.1.4 и рис. 1.1.5).

16000	150-1000	ı	200-800	750	670	800	1020	920	ı	I	I	ı		100	500-600	500-600	ı	15-308	30	ı	20-200	500-600	1	Мощность, Ро, Вт
воздух	воздух	воздух	воздух	$O_2$	СО	$CO_2$	воздух	воздух	аргон	воздух	аргон	<b>a</b> 30T	воздух	гелий			воздух	воздух	<b>a</b> 30T	воздух	воздух	воздух	2	Плазмообразую- щий газ
0,75	I	40	40	37	37	37	37	37	ı	I	I	I	1	26	34	34	40	8,7	30	30	12-100	6-20	3	Частота, ∨·10 <sup>-6</sup> , Гц
1,2	0,06-0,18	I	-	0,15	0,10	0,14	0,25	1,17	I	-	I	ı	I		-	I	ı	I	-	-	0,24-0,34	-	4	Радиус канала ВЧФР, а ·10 <sup>2</sup> , м
,	3,1-2,8	5,22	1	ı			,				ı	,					,		,		0,3-36,6	15-20	5	Длина разряда, L ·10 <sup>2</sup> , м
ı	I	ı	ı	0,82	ı	ı	ı	ı	ı	ı	I	ı	1	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	6	Проводимость, σ, см/м
			3,5-3,9	ı			4,2	3,8	1,4-2,0	3,0-5,0	1,4	4,0	3,8-4,2	0,9		0,9	3,5		3,8	3,8-4,2	3,3-4,3		7	Газовая температура, Т <sub>г</sub> ·10 <sup>-3</sup> , К (в канале)
	I			I	ı	ı		ı	6,0-7,0	6,5	I			25	7,8	7,4	7,0	ı	ı	ı	ı	ı	8	Температура электронов (канала) Те ·10 <sup>-3</sup> , К
I	I	0,8-1,6	-	I	I	I	I	I	I	1	I	I	I	I	I	I	1,24	$4 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$	ı	I	0,01-0,14	ı	9	Ток в разряде, I, A
ı	I	I	I	I	ı	ı	ı	T	ı	I	I	ı	1	ı	T	ı	ı	3,6-4,4	ı	T	ı	ı	10	Напряжение разряда U ·10 <sup>-3</sup> , В
	T	-	1	-	-	-	400	500	12-13	300-500	-	'	1	'	-	-	'	-	-	300-500	-	-	11	Напряженнсоть электрического поля, Е ·10 <sup>-2</sup> , В/м
	T	1		$1,3 \cdot 10^{12}$	$1,5 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^{12}$	$7 \cdot 10^{11}$	ı		ı		'	$1,2.10^{15}$ -3,0.10 <sup>15</sup>	$0,7{\cdot}10^{14}{\cdot}1,9{\cdot}10^{14}$	$3,2 \cdot 10^{13} \cdot 1,5 \cdot 10^{14}$		ı	10 <sup>11</sup> -10 <sup>12</sup>	$5 \cdot 10^{10} - 10^{11}$	ı		12	Концентрация электронов, ne ·10 <sup>-6</sup> , м <sup>-1</sup>
[42]	[41]	[41]	[40]	[11]	[11]	[11]	[11]	[11]	[39]	[46]	[48]	[48]	[48]	[47]	[38]	[38]	[38]	[39]	[37]	[46]	[43]	[31]	13	Литература

Таблица 1.1.1 Значения температуры канала ФЧФР





Рис. 1.5. Зависимость температуры в канале ВЧФР от частоты поля v [18, 52]

В свою очередь, исследования по пространственному распределению температур (рис. 1.1.6, 1.1.7) указывают на существенное падение температур в радиальном направлении и на относительно слабое падение осевой  $(dT/dr \ge dT/dz).$ ВЧФР температуры Заметим, что температура В молекулярных газах составляет (3÷5)·10<sup>3</sup>К. Это различие связано с большей эффективностью передачи энергий от электронов к тяжелым частицам в молекулярных газах по сравнению С атомарными. В случае лаже незначительных добавок молекулярного газа [3] температура ВЧФР горящего в атомарном газе значительно повышается. В работе [63] измерялась также температура диффузионной оболочки ВЧФР. Для ВЧФР горящего в атмосферном воздухе температура диффузионной оболочки составляет 2200-2500К.

Сравнение результатов измерений газовой температуры с температурой электронов показывает, что при частоте поля в десятки мегагерц различие между ними порядка ( $T_e/T = 1,5-2,5$ ). Однако, в случае, когда частота запитывающего разряд поля лежит в СВЧ диапазоне разница между электронной температурой и газовой становится более существенной ( $T_e/T = 5-25$ ). В работе [16] также показано, что распределение электронов по скоростям в канале ВЧФР имеет вид, отличающийся от максвелловского.

Таким образом, мы можем сделать вывод о существенной неравновесности плазмы ВЧФР.



Рис. 1.1.6. Радиальное распределение ВЧФР температуры [61,56]



Рис. 1.1.7. Распределение температуры вдоль оси свободного ВЧФР [61]

Характеристики разрядной плазмы ВЧФР в сильной степени зависят от частоты электромагнитного поля, мощности подводимой к разряду и величины расхода плазмообразующего газа. В работе [33] показано, что с уменьшением частоты (при заданной мощности) увеличивается длина канала разряда и уменьшается температура плазмы.

Изменение длины канала разряда в зависимости от частоты электромагнитного поля приведены на рис. 1.1.3.

По данным работы [17] вышеуказанная зависимость имеет логарифмический характер. Авторы работы [11] в свою очередь предлагают использовать зависимость вида L ~  $\omega^{1/2}$ ,

где L - длина канала разряда,  $\omega$  - частоты электромагнитного поля.

Представляет собой интерес также процесс передачи энергии от электромагнитного поля к плазме ВЧФР. Так, авторы работы [3] высказывают предположение влиянии на механизм передачи 0 электромагнитной энергии процессов диссоциативной рекомбинации. В ВЧФР горящем в воздухе или азоте при атмосферном давлении вблизи электрода присутствуют ионы  $N_2^+$ , имеющие потенциал возбуждения 18 эВ. Данные молекулярные ионы диффундируют от электрода в разрядную плазму, где посредством столкновений с электронами они диссоциативно рекомбинируют в атомы азота. Так как энергия диссоциации молекулярного азота составляет 9,7 эВ, образующиеся атомы получают кинетическую энергию 8,3 эВ, которая вследствие столкновений быстро диссоциирует преимущественно в виде хаотического теплового движения частиц плазмы. Данный механизм передачи электромагнитной энергии подтверждается измерениями температуры разряда [16], горящего в молекулярных газах с различными энергиями диссоциации.

При описании ВЧФР большое значение имеет определение таких величин как емкостное сопротивление, адмитанс, активное сопротивление плазмоида ВЧФР. В работе [8] показано, что теоретический расчет вышеуказанных величин, основывающийся лишь на геометрических характеристиках плазмоида разряда без учета происходящих в нем физических процессов приводит к серьезным ошибкам. Вследствие этого большинство работ по определению электрических параметров разряда носит экспериментальный характер.



Рис. 1.1.8.Зависимость емкостного сопротивления ωС, проводимости G, адмитанса Y и тока I от мощности Wpa3pяда

1 - воздух; 2 - аргон

На рис.1.1.8 приведены зависимости, полученные авторами работ [12] для емкостного сопротивления, проводимости и адмитанса плазмоида ВЧФР, горящего при атмосферном давлении в воздухе и аргоне в зависимости от величины высокочастотной мощности, подводимой к разряду. Как видно на рис. 1.1.8 электрические характеристики плазмоида ВЧФР сильно зависят от рода плазмообразующего газа и геометрических размеров разряда, которые в свою очередь зависят от величины высокочастотной мощности.

Учет процессов, происходящих в плазме ВЧФР и их влияние на результаты расчетов электрических параметров плазмоида разряда, рассмотрены в работах [12]. Из результатов работ [10, 16] также следует, что вольтамперная характеристика ВЧФР ( рис. 1.8, таблица 1.1) имеет возрастающий характер.

#### 1.2. Диагностика плазмы и её специфика

С точки зрения практического использования факельного разряда наибольший интерес вызывает измерение его газовой температуры. Во многих плазмохимических реакциях определяющим фактором является не только газовая, но и электронная температура. Поэтому измерению газовой и электронной температуры факельного разряда посвящено достаточно большое количество работ. Для согласования разряда с высокочастотным генератором необходимо знать его электрические характеристики, а также научиться измерять его мощность. Большой интерес также представляет вопрос о наличии полного или частичного термодинамического равновесия в плазме разряда.

Все эти вопросы рассматривались различными авторами с момента открытия факельного разряда по настоящее время. Значительное число исследований посвящено изучению характеристик факельного разряда, горящего в воздухе. Изучение свойств разряда, горящего в других средах, рассмотрено в меньшем количестве работ.

Спектры факельного разряда в воздухе и азоте весьма схожи и состоят из полос гидроксила, β,γ – систем NO и второй положительной системы

азота. В приэлектродной области кроме этих полос наблюдаются также полосы первой отрицательной системы N<sub>2</sub><sup>+</sup>

При горении разряда в воздухе возможно измерение его газовой относительной интенсивности линий температуры по вращательных спектров азота и гидроксила. Измерение температуры газа по полосам стабильных в канале разряда молекул азота крайне затруднено вследствие наложения на них значительно более интенсивного спектра гидроксила, перекрывающего диапазон длин волн от 280 до 370 нм. Определение же газовой температуры по молекулярному спектру гидроксила требует распределения интенсивностей установления равновесности BO вращательной структуре полос. В работе показано, что в канале факельного разряда, горящего в воздухе, при давлениях выше 13 кПа вращательная температура молекул гидроксила совпадает с температурой нейтрального газа. В связи с этим измерение газовой температуры в воздушной плазме факельного разряда, горящего при атмосферном давлении, обычно проводят по молекулярному спектру гидроксила. Результаты измерений газовой температуры факельного разряда, горящего при атмосферном давлении, в воздухе, а также в некоторых других средах, приведены в таблице 1.2.1. Из таблицы 1.2.1 следует, что температура разряда, горящего в одноатомных газах значительно ниже температуры разряда, горящего в молекулярных газах. Это различие связано с большей эффективностью передачи энергии от электронов к тяжёлым частицам в молекулярных газах по сравнению с атомарными.

№	Плазмообразующий	Частота,	Температура,	Литература
	газ	ΜΓц	°К	
1	Воздух	10	3000	[46]
2	Воздух	22,9	2900	[47]
3	Воздух	32,3	3610	[45]
4	Воздух	62,5	3850	[9]
5	Воздух	84,5	4100	[9]
6	Воздух	915	3800	[15]
7	Воздух	2400	53005600	[10]

Таблица 1.2.1

8	Азот	2400	4000	[10]
9	Аргон	2400	14002000	[10]
10	Аргон	34	2000	[49]
11	Воздух	81,6	3380	[50]
12	Гелий	26,4	880	[29]

Измерение электронной температуры плазмы факельного разряда осуществляется либо по относительной интенсивности линий атомарного спектра, либо по интенсивности непрерывного излучения в определённом диапазоне длин волн.

Концентрация электронов В плазме разряда, горящего при атмосферном давлении, определялась спектральными и микроволновыми методами. Микроволновым методом возможно определение не только концентрации электронов, но и частоты их столкновений с тяжёлыми частицами. На рис.1.2.1 приведены результаты измерений микроволновым методом осевого распределения концентрации электронов и эффективной частоты их столкновений с тяжёлыми частицами для факельного разряда, мощностью 1 кВт, горящего в воздухе при атмосферном давлении, Частота электромагнитного поля при этом составляла 30 МГц. Заметим, однако, что микроволновой метод имеет малое пространственное разрешение И вследствие этого позволяет оценивать вышеуказанные параметры лишь усреднёнными по сечению разряда. Спектральные методы позволяют провести оценку концентрации электронов непосредственно в канале разряда. Обычно при этом используется штарковский эффект уширения



спектральных линий. Результаты измерений параметров электронной компоненты плазмы высокочастотного факельного разряда, горящего при атмосферном

Рис. 1.2.1

давлении, представлены в следующей таблице.

N⁰	Плазмообразующий	Частота,	Концентрация	Температура	Литература
	газ	МГц	электронов, м <sup>-3</sup>	Электронов, °К	1 71
1	воздух	30	$5 \cdot 10^{16} \dots 10^{17}$	45006000	[51]
2	воздух	915	10 <sup>19</sup>	130000	[15]
3	воздух	1500	10 <sup>19</sup>	870013900	[35]
4	азот	2400	$10^{16}10^{17}$	-	[10]
5	аргон	2400	$10^{16}10^{18}$	-	[10]
6	гелий	26,4	$5,3\cdot 10^{21}$	$2,5 \cdot 10^4$	[29]
7	аргон	34	$1,6.10^{20}$	7000	[49]
8	воздух	30	$9.10^{17}$	-	[32]

Таблица 1.2.2

Как видно из таблицы 1.2.2 электронная температура больше газовой температуры. Для молекулярных газов различие между электронной и газовой температурами невелико и составляет 500...1500°К. В случае атомарных газов это различие существенно больше. Так для аргона оно составляет 5000...6000°К, а для гелия составляет десятки тысяч градусов. Следовательно, плазма факельного разряда не находиться в состоянии термодинамического равновесия.

Для молекулярных газов различие между электронной и газовой температурами возрастает при уменьшении мощности разряда и давления. На рис. 1.2.2 приведены результаты измерений электронной и газовых температур факельного разряда, возбуждаемого в воздухе, в зависимости от давления. Из рисунка видно, что с ростом давления, а следовательно и частоты столкновений электронов с молекулами воздуха, анизотермия плазмы уменьшается.



Приведённые в таблицах значения электронных и газовых температур были получены различными авторами на различных расстояниях от высокочастотного электрода. Факел же разряда неоднороден, как в радиальном, так и в осевом направлениях. Поэтому результаты различных авторов могут довольно значительно отличаться друг от друга. Измерения осевого и радиального распределения температур факельного разряда проводились лишь в небольшом количестве работ. В работах [Сузи, 22] показано, что изменение газовой температуры вдоль оси факельного разряда, горящего в воздухе, незначительно, и составляет 300...500К (рис.1.2.3). Радиальное же изменение температур воздушной плазмы разряда, напротив, является довольно значительным (рис. 1.2.4).









Распределение электронной температуры разряда аналогично распределению газовой температуры. На рис 1.2.5 приведено радиальное распределение электронной температуры в воздушной (кривая 1) и азотной

(кривая 2) плазме, 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 О<sub>2</sub>, обладающих значительным сечением захвата электронов. Присутствие молекул электроотрицательных газов существенно увеличивает контракцию разряда

На пространственное распределение температур в факельном разряде могут влиять не только его мощность и частота электромагнитного поля, но и скорость продува плазмообразующего газа. На рис. 1.2.6 приведены зависимости среднеосевой газовой температуры плазмы от скорости прокачки плазмообразующего газа. Из рисунка видно, что с увеличением скорости прокачки газа несколько увеличивается среднеосевая газовая температура плазмы. Этот эффект объясняется тем, что с увеличением скорости продува газа происходит увеличение газовой температуры в центральной части, в то время как на периферии газовая температура 4,5



\

Рис. 1.2.6

Значения величины концентрации электронов, полученные разными авторами, отличаются друг от друга. Однако, несмотря на некоторые расхождения, можно утверждать, что концентрация электронов в плазме разряда, горящего в молекулярных газах меньше концентрации электронов при горении разряда в одноатомных газах.

Значения величин транспортных характеристик разрядной плазмы в значительной степени определяются видом функции распределения электронов по скоростям в плазме разряда. Впервые вид функции распределения электронов по скоростям в высокочастотном разряде был получен [8] Маргенау. В этой работе предполагалось, что напряжённость электрического поля невелика, и вследствие этого можно пренебречь неупругими столкновениями. Для факельного разряда, особенно при его горении в молекулярных газах эти условия не соблюдаются. Поэтому функция распределения электронов по скоростям в плазме факельного разряда отличается от распределения Маргенау.

Определению вида функции распределения электронов по скоростям в плазме факельного разряда посвящены работы [2, 19]. Эти работы носят теоретический характер. На рис. 1.2.7 приведена функция распределения электронов по энергиям (кривая 2) для случая высокочастотного факельного разряда, горящего в воздухе при атмосферном давлении. При этом газовая температура составляет 4000°К, а напряжённость электрического поля 300 в/см. Для построена максвелловская сравнения здесь же функция распределения для  $T = 4000^{\circ}$ К (кривая 1) и функция распределения Маргенау (кривая 2). Из рисунка следует, распределение электронов по энергиям в плазме факельного разряда существенно немаксвелловское. Расчёты [19] также показывают, вид функции распределения зависит что OT напряжённости электрического поля. Вблизи электрода напряжённость электрического поля возрастает, электроны приобретают большие направленные скорости, и максимум функции распределения сдвигается вправо.

Экспериментальное определение функции распределения электронов ПО энергиям проводилось лишь для случая факельного разряда, возбуждаемого давлении. Измерения при пониженном проводились зондовым методом. Использовался известный способ определения функции распределения электронов по энергиям по второй производной зондового

тока. Экспериментально полученная функция распределения электронов по энергиям для случая факельного разряда, горящего в воздухе при давлении 160 Па, приведена на рис. 1.2.8 Здесь же приведено максвелловское распределение, рассчитанное для данного случая. При расчёте использовалась экспериментально полученная величина электронной температуры плазмы разряда. Как видно из рисунка функция распределения электронов по энергиям в отличии от максвелловского распределения имеет крутой спад в области высоких энергий. Полученное распределение совпадает с распределением, приведённым на рис. 24, которое рассчитано для случая факельного разряда, горящего при атмосферном давлении.



При проведении плазмохимических процессов перерабатываемый материал вводится в разрядную плазму, как правило, либо в виде капель, либо в виде порошка. В связи с этим, представляет интерес определение характеристик запылённой разрядной плазмы. Такие характеристики плазмы, как газовая и электронная температуры, в существенной степени зависят от способности перерабатываемого материала поглощать или испускать электроны. Данная способность материала связана с его ионизационным потенциалом [7].

Проводились исследования характеристик разрядной плазмы факельного разряда, запылённого мелкодисперсными частицами с низким ионизационным потенциалом. Использовались частицы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BaO, MgO с диаметром 10...60 мкм. При введении частиц в плазму факельного разряда, горящего в воздухе при атмосферном давлении, происходит изменение геометрических характеристик его канала. Так, при малых концентрациях частиц происходит некоторое увеличение диаметра факела, однако дальнейшее увеличение их концентрации приводит к резкому уменьшению диаметра факела, то есть к усилению контракции разряда. С ростом концентрации частиц с малой энергией ионизации отмечается также рост электропроводности плазмы, что указывает на увеличение концентрации электронов.

Зависимости газовой и электронной температур воздушной плазмы факельного разряда от концентрации частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> представлены на рис. 1.2.9 и 1.2.10 Из рисунков видно, что с ростом концентрации частиц происходит увеличение газовой температуры, что ведёт к интенсификации плазмохимических процессов. Увеличение газовой температуры обусловлено ростом концентрации электронов. В то же время с ростом концентрации частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> происходит уменьшение электронной температуры плазмы разряда. Таким образом, с ростом концентрации частиц уменьшается анизотермия плазмы [9].



Далее будет рассмотрено и оценено влияния добавок молекулярного газа на температуру факельного разряда, горящего в атомарном газе. Ранее предполагалось, что при небольших добавках, электронная и газовая температура имеют большой разрыв. А также будет проведена оценка длины канала и определена удельная электропроводность.

## 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

#### 2.1. Схема экспериментальной установки

Для проведения опытов использовалась следующая установка:



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

Рисунок 2.1.1 - Схема экспериментальной установки

Исследовался факельный разряд высокочастотного плазмохимического реактора мощностью около 1 кВт. Разряд возбуждался в кварцевой трубке длиной 50 см и диаметром 28 мм на частоте 37 МГц. Расход аргона варьировался от 0,4 до 0,6 м<sup>3</sup>/час. Измерения газовой и электронной температур проводились вдоль оси зоны каналирования разряда. Излучение от исследуемого объёма разряда посредством линзы проецировалось на щель спектрографа Shamrock 303i.

Спектр выводился непосредственно на экран компьютера. Ширина щели спектрографа составляла 0.3 мм. Время экспозиции спектра составляло 0,5...1,5 секунды. Для уменьшения собственных шумов ПЗС камеры проводилось её охлаждение до температуры -50°С. Перед каждым измерением осуществлялось измерение фона в том же спектральном диапазоне. Полученный фон вычитался из результатов измерений. Величина фона составляла 3..5% от величины полезного сигнала.

#### 2.2. Методика измерения электронной температуры

Измерения электронной температуры факельного разряда проводились методом Орнштейна по относительной интенсивности линий меди. Пары меди попадали в плазму разряда за счёт испарения материала поверхности медного водоохлаждаемого электрода. Использовались линии меди 5153Å и 5218Å.

Температуру, характеризующую состояние оптически тонкой плазмы в условиях локального термодинамического равновесия, можно определить, если измерить интенсивность какой - либо из излучаемых плазмой спектральных линий λ в абсолютных единицах по формуле:

$$J_{ki} = N_0 \left(\frac{g_k}{g_0}\right) A_{ki} h v_{ki} \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right)$$
(2.2.1)

где величины  $N_0$ ,  $g_k$ ,  $g_0$ ,  $g_1$ ,  $A_{ki}$ , h,  $n_{ki}$ ,  $E_k$  берутся соответственно для переходов атоме, ионе или молекуле. Однако точное измерение абсолютных В интенсивностей спектральных линий большими связано с экспериментальными трудностями. Кроме того, во многих случаях известны только относительные значения вероятностей переходов. В основу метода разработанного плазмы, Л.С. Орнштейном, измерения температуры положено спектроскопическое определение температуры по измерениям относительных интенсивностей спектральных линий. Это дает возможность избежать измерения абсолютных значений и не требует знания абсолютных величин концентраций атомов или ионов. Суть метода состоит в следующем. Рассматриваются две спектральные линии, возникающие при переходе между возбужденными уровнями одного сорта частиц (атомов, ионов данной кратности и т. д.). Если заселенности всех этих уровней удовлетворяют распределению Больцмана с одной и той же температурой возбуждения T<sub>e</sub>, то, записав выражение данное для обеих линий и комбинируя их. получим отношение в виде

$$\frac{J_{ki}}{J_{lm}} = \left(\frac{A_{ki}}{A_{lm}}\right) \left(\frac{g_k}{g_l}\right) \left(\frac{\lambda_{lm}}{\lambda_{ki}}\right) \exp\left[-\frac{E_k - E_l}{kT_{\theta}}\right]$$
(2.2.2)

где  $\lambda_{ki}$  и  $\lambda_{lm}$  - длины волн выбранных спектральных линий. Здесь учтено, что основное состояние для данных частиц одного сорта одно и то же.

Оценим точность нахождения температуры. Продифференцировав полученное соотношение, имеем

$$\frac{\Delta T_{e}}{T_{e}} = \left[\frac{kT_{e}}{E_{k} - E_{l}}\right] \left[\frac{\Delta \left(\frac{J_{ki}}{J_{lm}}\right)}{\frac{J_{ki}}{J_{lm}}}\right]$$
(2.2.3)

откуда видно, что точность нахождения  $T_e$  тем выше, чем больше разность энергий верхних уровней:  $E_{ki}$ - $E_{lm}$ . Величины  $E_{ki}$  и  $E_{lm}$  задаются расположением уровней в энергетической схеме данных атома или иона.

Желательно подобрать спектральные линии, находящиеся в удобной для измерений области спектра и имеющие разность энергий верхних уровней  $\Delta E_{ik} = E_l - E_k i \ge 1$  эВ. Кроме того, необходимо выбирать линии с известными величинами вероятностей спонтанных переходов. У линий должна отсутствовать реабсорбция и они не должны принадлежать дублетам.

Чтобы повысить точность и надежность определения температуры  $T_e$ , на практике обычно проводят подобные измерения не для двух, а для большего числа линий с различными  $\Delta E$  и обработку выполняют графически на основе уравнения

$$\lg\left(\frac{J_{ki}}{J_{lm}}\right) = \lg\left[\frac{A_{im}g_k\lambda_{im}}{A_{im}g_l\lambda_{lm}}\right] - 5040(E_k - E_l)/T_e$$
(2.2.4)

Введя обозначения:  $P_{ki} = A_{ki}g_k hv_{ki}/g_0$  и  $P_{lm} = A_{lm}g_l hv_{lm}/g_0$ , запишем следующую формулу:

$$\lg\left(\frac{J_{ki}}{J_{lm}}\right) = \lg\left(\frac{P_{ki}}{P_{lm}}\right) - 5040(E_k - E_l)/T_e \tag{2.2.5}$$

где величина Е выражена в электронвольтах. Тангенс угла наклона позволяет найти электронную температуру по формуле:

$$T_e = \frac{5040(E_l - E_k)}{\left[\lg\left(\frac{J_{ki}}{J_{lm}}\right) + \lg\left(\frac{P_{lm}}{P_{ki}}\right)\right]} = 5040(E_l - E_k) / \left[\lg\left(\frac{J_{ki}}{J_{lm}}\right) + \lg\left[\frac{A_{lm}g_m\lambda_{ki}}{A_{ki}g_k\lambda_{lm}}\right]\right]$$
(2.2.6)

[28]

Линии меди, наблюдаемые в диапазоне длин волн от 4900 до 5400Å представлены в следующей таблице:

Линия	λ, Å	Е, эВ	(Agv) <sub>i</sub>
1	5782	3,77	8,58
2	5700	3,80	1,754
3	5218	6,16	2080
4	5153	6,16	1164
5	5106	3,80	36,7

Таблица 2.2.1 Характеристики линий меди

Полученные в результате проведённых экспериментов спектры аргоновой плазмы высокочастотного факельного разряда в диапазоне длин волн от 4900 до 5400Å (линии меди) имеют следующий вид:



Рисунок 2.2.1 - Спектр аргоновой плазмы

На рисунке показаны линии, по которым определялась электронная температура. Преимущественно это были линии 5106 и 5153 Å.

#### 2.3. Результаты экспериментов

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

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

В нашем случае формула (2.2.6) примет вид:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{(Agv)_1}{(Agv)_2} \cdot e^{-\frac{E_1 - E_2}{kT}}$$
(2.2.7)

Прологарифмировав формулу, получили:

$$T = \frac{E_1 - E_2}{k \cdot \ln \frac{I_1(Agv)_2}{I_2(Agv)_1}}$$
(2.2.8)

где k — постоянная Больцмана;  $E_1, E_2$  — энергетические уровни; A — вероятность спонтанных переходов;  $\nu$  — частота.

Ниже приведены типичные спектры аргоновой плазмы при расходе аргона 0,4 м<sup>3</sup>/час, на разных расстояниях от электрода.



Рисунок 2.3.1 - Спектр аргоновой плазмы на расстоянии 5 см от электрода Подставляем значения и рассчитываем температуру на расстоянии 5 см от электрода:



Рисунок 2.3.2 - Спектр аргоновой плазмы на расстоянии 15 см от электрода Подставляем значения и рассчитываем температуру на расстоянии 15см от электрода:

$$T_{e} = \frac{E_{1} - E_{2}}{k \cdot \ln \frac{I_{1}(Agv)_{2}}{I_{2}(Agv)_{1}}} = \frac{(6,16 - 3,18) * 1,6^{-19}}{1,38 * 10^{-23} \cdot \ln 1,297 * \frac{36,7}{1164}} = 8560 K$$

Рисунок 2.3.3 - Спектр аргоновой плазмы на расстоянии 50 см от электрода Подставляем значения и рассчитываем температуру на расстоянии 50

см от электрода:

$$T_e = \frac{E_1 - E_2}{k \cdot \ln \frac{I_1(Agv)_2}{I_2(Agv)_1}} = \frac{(6,16 - 3,18) * 1,6^{-19}}{1,38 * 10^{-23} \cdot \ln 0,998 * \frac{36,7}{1164}} = 7910 \, K$$

Z	I1/I2	Те
5	0,895291	7670
10	0,988928	7890
15	1,14357	8235
20	1,29733	8560
25	1,225434	8410
30	1,136657	8220
35	1,087383	8112
40	1,053689	8037
45	1,032797	7990
50	0,997638	7910

Таблица 2.3.1 Характеристики аргоновой плазмы

На рисунке приведен график распределения электронной температуры при расходе аргона 0,4 м<sup>3</sup>/час.







Рисунок 2.3.5 - Спектр аргоновой плазмы на расстоянии 5 см от электрода Подставляем значения и рассчитываем температуру на расстоянии 5 см от электрода:





Подставляем значения и рассчитываем температуру на расстоянии 20 см от электрода:

$$T_e = \frac{E_1 - E_2}{k \cdot \ln \frac{I_1(Agv)_2}{I_2(Agv)_1}} = \frac{(6, 16 - 3, 18) \times 1, 6^{-19}}{1, 38 \times 10^{-23} \cdot \ln 1, 199 \times \frac{36, 7}{1164}} = 8535 \, K$$


Рисунок 2.3.7 - Спектр аргоновой плазмы на расстоянии 50 см от электрода

Подставляем значения и рассчитываем температуру на расстоянии 50 см от электрода:

$$T_e = \frac{E_1 - E_2}{k \cdot \ln \frac{I_1(Agv)_2}{I_2(Agv)_1}} = \frac{(6, 16 - 3, 18) \times 1, 6^{-19}}{1, 38 \times 10^{-23} \cdot \ln 1, 038 \times \frac{36, 7}{1164}} = 7969 \, K$$

Z	I1/I2	Te
5	0,876639	7625
10	0,943737	7785
15	1,070706	8075
20	1,199467	8355
25	1,28524	8535
30	1,197117	8350
35	1,125173	8195
40	1,091908	8122
45	1,072504	8079
50	1,037671	8001

Таблица 2.3.2 Характеристики аргоновой плазмы

На рисунке 2.3.8 приведен график распределения электронной температуры при соответствующем расходе аргона.



Рисунок 2.3.8 - Распределение газовой температуры при расходе аргона 0,5

м<sup>3</sup>/час

Ниже приведены типичные спектры аргоновой плазмы при расходе аргона 0,6 м<sup>3</sup>/час, на разных расстояниях от электрода.





Подставляем значения и рассчитываем температуру на расстоянии 5 см от электрода:

$$T_e = \frac{E_1 - E_2}{k \cdot \ln \frac{I_1(Agv)_2}{I_2(Agv)_1}} = \frac{(6,16 - 3,18) \times 1,6^{-19}}{1,38 \times 10^{-23} \cdot \ln 0,862 \times \frac{36,7}{1164}} = 7589 \, K$$



Рисунок 2.3.10 - Спектр аргоновой плазмы на расстоянии 25 см от электрода

Подставляем значения и рассчитываем температуру на расстоянии 25см от электрода:





Подставляем значения и рассчитываем температуру на расстоянии 50 см от электрода:

$$T_e = \frac{E_1 - E_2}{k \cdot \ln \frac{I_1(Agv)_2}{I_2(Agv)_1}} = \frac{(6,16 - 3,18) * 1,6^{-19}}{1,38 * 10^{-23} \cdot \ln 1,082 * \frac{36,7}{1164}} = 8099 \, K$$

Таблица 2.3.3 Характеристики аргоновой плазмы

Z	I1/I2	Те
5	0,861842	7589

	10	0,908241	7701
	15	0,993279	7900
	20	1,10462	8150
	25	1,225434	8410
	30	1,263585	8490
	35	1,169059	8290
	40	1,132977	8212
	45	1,113736	8170
	50	1,081512	8099
1			

На рисунке 2.3.12 приведен график распределения электронной температуры при заданном расходе аргона.



Рисунок 2.3.12 - Распределения газовой температуры при расходе аргона 0,5 м<sup>3</sup>/час

В таблице 2.3.4 приведены значения электронной температуры при трех расходах аргона по всей длине канала.

Таблица 2.3.4 Значения температуры при разных расходах аргона в зависимости от длины канала

Расход Арго	она, Q		
0,6	0,5	0,4	z=Z/L
7589	7625	7670	0,1
7701	7785	7890	0,2
7900	8075	8235	0,3
8150	8355	8560	0,4
8410	8535	8410	0,5
8490	8350	8220	0,6
8290	8195	8112	0,7
8212	8122	8037	0,8
8170	8079	7990	0,9
8099	8001	7910	1

По данным таблицы 2.3.4 строим графики распределения электронной температуры на одном рисунке, чтобы провести сравнение.



Рисунок 2.3.13 - Распределения электронной температуры при разных

расходах аргона

На основе данного рисунка можно сделать вывод, что при увеличении расхода аргона, происходит изменение максимумов и смещение пиков электронной температуры. Максимумы электронной температуры наблюдаются в диапазоне 15...25 см от электрода.

# 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

#### 3.1. Методика измерения газовой температуры

Измерение газовой температуры проводилось по относительной интенсивности вращательных переходов молекулярной полосы гидроксила 3064 Å. Использовались линии колебательной ветви Q<sub>1</sub>. Выбирались линии свободные от наложения других линий – Q<sub>1</sub>4, Q<sub>1</sub>6, Q<sub>1</sub>9, Q<sub>1</sub>10. Излучение от исследуемого объёма разряда посредством линзы проецировалось на щель спектрографа MSDD с более высокой разрешающей способностью. Спектр непосредственно экран компьютера. выводился на Ширина щели спектрографа составляла 0.3 мм. Время экспозиции спектра составляло 0,5...1,5 секунды. Для уменьшения собственных шумов ПЗС камеры проводилось её охлаждение до температуры -10°С. Перед каждым измерением осуществлялось измерение фона в том же спектральном диапазоне. Полученный фон вычитался из результатов измерений.

Установлено, что температура возбуждения, определяемая по распределению интенсивностей в молекулярной полосе, соответствует газовой температуре разряда [27].

В изотермической плазме при больцмановском распределении молекул по возбужденным уровням интенсивность вращательной линии в испускании определяется выражением:

$$I_n = aie^{-E_n/_{kT}},$$

$$E_n = hcBJ(J+1); B = h8\pi^2 cI_0,$$
(3.1.1)

Здесь a — постоянная величина, h, c, k,  $\pi$  — универсальные постоянные,  $I_0$  — момент инерции молекулы; i — фактор интенсивности вращательной линии, пропорциональный относительной вероятности перехода и статистическому весу начального состояния молекулы, J — вращательное квантовое число возбужденного состояния.

где

После преобразования формулы (1) получаем:

$$0,093lg \frac{I_n}{i} = 0,093lg a - J(J+1)\frac{1}{T}$$
(3.1.2)  
$$\frac{3}{2}, \frac{5}{2}, ...)$$

 $(J = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots)$ 

Если рассчитать интенсивности для вращательных термов молекул ОН в возбужденном состоянии <sup>2</sup>Σ, то получим

$$0,095lg\frac{l_n}{i} = 0,095lga - K(K+1)\frac{1}{T}$$

$$I = K + \frac{1}{2}$$
(3.1.3)

 $K=0,1,2,\dots \;,\;\; J=K\pm \; {1/_2}$ 

Формулы (3.2) и (3.3) почти совпадают. Для практических расчетов они могут быть объединены в более удобное выражение вида

$$0,1 \lg \frac{l_n}{i} = 0,1 \lg a - K(K+1)\frac{1}{T}$$
(3.1.4)

По виду зависимости lg — f[K(K+1)] можно судить о наличии или отсутствии больцмановского распределения молекул по вращательным уровням. При больцмановском распределении, т. е. термодинамическом равновесии эта зависимость должна представлять собой прямую линию с тангенсом угла наклона, равным 1/T.

Экспериментально было установлено, что при большом числе линий на узком участке спектра в полосе  $\lambda$  3064 Å наиболее удобна для работы ветвь  $Q_1$ . В табл. 3.1.1 приведены квантовые числа K, факторы интенсивности *i* и длины волн линий ветви  $Q_1$  [26].

Таблица 3.1.1 Факторы интенсивностей линий ветви Q1 полосы ОН  $\lambda$  3064 Å

K	J	K(K+1)	λ	i	lgi
4	9/2	20	3083,262	2,100	0,324
6	13/2	42	3087,326	3,16	0,5
9	19/2	90	3095,329	4,73	0,673
10	21/2	110	3098,575	5,16	0,712

### 3.2. Результаты экспериментов

В результате проведенных экспериментов были получены молекулярные спектры полос гидроксила 3064 Å при разных расходах аргона. Для регистрации спектра гидроксила в плазму было добавлено 2-3 % воздуха.

Ниже приведены типичные спектры аргоновой плазмы при расходе аргона 0,4 м<sup>3</sup>/час. На основе данных спектров рассчитана газовая температура и построен график распределения температуры.

На рисунке 3.2.1 показан спектр полос гидроксила на расстоянии 5 см от электрода



Рисунок 3.2.1 - Спектр полос гидроксила

Таблица 3.2.1 Факторы интенсивностей на расстоянии 5 см от

электрода

	V(V+1)	$0.11_{\alpha}(\mathbf{I}/\mathbf{i})$
ЛИНИИ	$\mathbf{K}(\mathbf{K}+1)$	0,11g(1/1)
O1(4)	20	0.226
		- , -
Q1(6)	42	0,213
Q1(9)	90	0,194
Q1(10)	110	0,175

Далее с помощью значений таблицы 3.2.1 стороим кривую, на основе которой, с помощью тангенса угла наклона, определяем температуру.



Рисунок 3.2.2 - Распределение факторов интенсивности

$$T = \frac{1}{0,051:90} = 1749 \, K$$

Таким же способом будет определена газовая температура во всех случаях.



На рисунке 3.2.3 показан спектр на расстоянии 15 см от оси разряда

Рисунок 3.2.3 - Спектр полос гидроксил

Таблица 3.2.2 Факторы интенсивностей на расстоянии 15 см от электрода

линии	K(K+1)	0,11g(I/i)
Q1(4)	20	0,224
Q1(6)	42	0,212
Q1(9)	90	0,195
Q1(10)	110	0,178



Рисунок 3.2.4 - Распределение факторов интенсивности

# $T=1931\,K$

На рисунке 3.2.1 показан спектр на расстоянии 50 см от электрода.



Рисунок 3.2.5 - Спектр полос гидроксила

Таблица 3.2.3 Факторы интенсивностей на расстоянии 50 см от электрода



Рисунок 3.2.6 - Распределение факторов интенсивности

T = 1690 K

В таблице 3.2.4 распределения электронной температуры вдоль всей оси разряда при расходе аргона 0,4 м<sup>3</sup>/час.

Q 0,4 м <sup>3</sup> /час	z=Z/L	Z, см
1749	0,1	5
1872	0,2	10
1990	0,3	15
1931	0,4	20
1861	0,5	25
1799	0,6	30
1755	0,7	35
1722	0,8	40
1701	0,9	45
1690	1	50

Таблица 3.2.4 Значения газовой температуры

График распределения газовой температуры представлен на рисунке





Рисунок 3.2.7 - Распределения газовой температуры при расходе 0,4 м<sup>3</sup>/час

Далее приведены характерные спектры при расходе аргона 0,5 м<sup>3</sup>/час, определена газовая температура и построен график распределения температуры.



На рисунке 3.2.8 показан спектр на расстоянии 5 см от электрода

Рисунок 3.2.8 - Спектр полос гидроксила на расстоянии 5 см от электрода

	Таблица 3.2.5	Факторы	интенсивностей	полос	гидроксил
--	---------------	---------	----------------	-------	-----------

линии	K(K+1)	0,11g(I/i)
Q1(4)	20	0,2517
Q1(6)	42	0,2315
Q1(9)	90	0,2133
Q1(10)	110	0,1989

Далее с помощью рисунка 3.2.1 определяем тангенс угла наклона и высчитываем температуру.



Рисунок 3.2.9 - Распределение факторов интенсивности

 $T=1704\,K$ 

На рисунке 3.2.10 показан спектр на расстоянии 20 см от электрода



Рисунок 3.2.10 - Спектр полос гидроксила

Таблица 3.2.6 Факторы интенсивностей полос гидроксила

линии	K(K+1)	0,11g(I/i)
Q1(4)	20	0,249

Q1(6)	42	0,232
Q1(9)	90	0,219
Q1(10)	110	0,2033



Рисунок 3.2.11 - Распределение факторов интенсивности

# $T=1971\,K$

На рисунке 3.2.12 показан спектр на расстоянии 50 см от электрода



Рисунок 3.2.12 - Спектр полос гидроксила

линии	K(K+1)	0,11g(I/i)
Q1(4)	20	0,242
Q1(6)	42	0,227
Q1(9)	90	0,201
Q1(10)	110	0,189

# Таблица 3.2.7 Факторы интенсивностей полос гидроксила



Рисунок 3.2.13 - Распределение факторов интенсивности

# $T=1711\,K$

В таблице 3.2.8 приведены значения газовой температуры вдоль всей оси разряда при расходе аргона 0,5 м<sup>3</sup>/час

T (	220	n	v		
Гаолина	328	КЗначения	ГАЗОВОИ	темпег	оатуры
таозппца	J.L.		1 asoboli	reminer	, ar j p br

Q 0,5 м <sup>3</sup> /час	z=Z/L	Z
1704	0,1	5
1808	0,2	10

1923	0,3	15
1971	0,4	20
1891	0,5	25
1829	0,6	30
1779	0,7	35
1745	0,8	40
1725	0,9	45
1711	1	50

График распределения газовой температуры при расходе аргона 0,5 м<sup>3</sup>/час представлен на рисунке 3.2.14.



Рисунок 3.2.14 - Распределение газовой температуры

Далее приведены характерные спектры при расходе аргона 0,6 м<sup>3</sup>/час, определена газовая температура и построен график распределения температуры.



На рисунке 3.2.15 показан спектр на расстоянии 5 см от электрода

Рисунок 3.2.15 - Спектр полос гидроксила на расстоянии 5 см от электрода

В таблице 3.2.9 приведены значения по которым строится график

линии	K(K+1)	0,11g(I/i)
Q1(4)	20	0,2531
Q1(6)	42	0,242
Q1(9)	90	0,2163
Q1(10)	110	0,199



Рисунок 3.2.16 - Распределение факторов интенсивности

### T = 1665 K

На основе рисунка 3.2.16 определяется тангенс угла наклона, с помощью которого вычисляется газовая температура на расстоянии 5 см от электрода.

На рисунке 3.2.17 показан спектр на расстоянии 25 см от электрода



Рисунок 3.2.17 - Спектр полос гидроксила

<b>K</b> ( <b>IX</b> + <b>I</b> ) 0,	,11g(1/1)
20 (	),2511
42	0,238
90	),2153
110 (	),2047
20         0           42         0           90         0           110         0	0,2511 0,238 0,2153 0,2047

Таблица 3.2.10 Факторы интенсивностей полос гидроксила



Рисунок 3.2.18 - Распределение факторов интенсивности

# T = 1940 K

На рисунке 3.2.19 показан спектр на расстоянии 50 см от электрода



Рисунок 3.2.19 Спектр полос гидроксила





Рисунок 3.2.20 - Распределение факторов интенсивности

# T = 1736 K

В таблице 3.2.8 приведены значения газовой температуры вдоль всей оси разряда при расходе аргона 0,6 м<sup>3</sup>/час

Q 0,6 м <sup>3</sup> /час	z=Z/L	Z, см
1665	0,1	5
1756	0,2	10
1851	0,3	15
1924	0,4	20
1940	0,5	25
1867	0,6	30
1809	0,7	35
1777	0,8	40
1749	0,9	45
1736	1	50

Таблица 3.2.12 Значения газовой температуры

На рисунке 3.2.21 показан график распределения газовой температуры при расходе 0,6 м<sup>3</sup>/час.



Рисунок 3.2.21 Распределение газовой температуры

В таблице приведены значения газовой температуры при различных расходах аргона по всей длине канала.

Распределение газовой температуры			
Расход Аргона, м <sup>3</sup> /час			z=Z/L
0,6 м3/час	0,5	0,4	
1665	1704	1749	0,1
1756	1808	1872	0,2
1851	1923	1990	0,3
1924	1971	1931	0,4
1940	1891	1861	0,5
1867	1829	1799	0,6
1809	1779	1755	0,7
1777	1745	1722	0,8
1749	1725	1701	0,9
1736	1711	1690	1

Таблица 3.2.13 Распределение газовой температуры

Далее по этим значениям строится общий график распределения газовой температуры. По данному графику видно, как меняется температура с увеличением расхода аргона.



Рисунок 3.2.22 – Распределение газовой температуры в зависимости от расхода

По аналогии с электронной температурой можно сделать вывод, что при увеличении расхода плазмообразующего газа аргона происходит изменение максимумов и смещение пиков газовой температуры. Максимумы газовой температуры можно наблюдать на расстоянии 15-25 см от электрода.

#### 3.3. Определение удельной электропроводности разрядной

#### плазмы

Проведём оценку электропроводности плазмы факельного разряда на основе измеренных величин электронной и газовой температуры.

Удельная электропроводность определялась на основании ранее измеренных газовой и электронной температур, на основе графика, приведенного в работе [25]. Из данной работы видно, что удельная электропроводность определяется с помощью электронной температуры и отношения:

$$\theta = \frac{T_e}{T_r}$$

В таблице 3.3.1 приведены величины θ при разных расходах аргона для соответствующей длины канала

z=Z/L	θ <sub>0,4</sub>	θ 0,5	θ <sub>0,6</sub>
0,1	4,511149	4,568662	4,625225
0,2	4,399038	4,466261	4,498861
0,3	4,301508	4,344774	4,403025
0,4	4,355256	4,330289	4,371102
0,5	4,41698	4,415653	4,376289
0,6	4,509172	4,48059	4,440279
0,7	4,579487	4,565486	4,539525
0,8	4,639954	4,629799	4,597636
0,9	4,650206	4,638261	4,630646
1	4,663314	4,65751	4,639977

Таблица 3.3.1 Значения величины  $\theta$ 

Далее с помощью величины θ и электронной температуры были построены графики удельной электропроводности при заданном расходе аргона.

На рисунке 3.3.2 показан график распределения удельной электропроводности при расходе аргона 0,4 м<sup>3</sup>/час.



Рисунок 3.3.1 Распределение удельной электропроводности

На рисунке 3.3.2 показан график распределения удельной электропроводности при расходе аргона 0,5 м<sup>3</sup>/час



Рисунок 3.3.2 - Распределение удельной электропроводности

На рисунке 3.3.2 показан график распределения удельной электропроводности при расходе аргона 0,6 м<sup>3</sup>/час



Рисунок 3.3.3 - Распределение удельной электропроводности

Так же как в случае с электронной и газовой температурами можно сделать вывод, что при увеличении расхода аргона, в графиках наблюдается смещение вдоль оси разряда. При увеличении расхода значение удельной электропроводности уменьшается.

# 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

После измерения электронной и газовой температур, определим удельную электропроводность разрядной плазмы, напряженность электрического поля и расчет удельного энерговыделения.

#### 4.1 Схема экспериментальной установки

Измерения напряжённости электрического поля проводились емкостными зондами, перемещаемыми в осевом направлении относительно плазмы разряда. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.



1 — разряд, 2 — зонды, 3 — измерительный прибор, 4 — генератор опорного сигнала.

#### Рис.4.1.1 - Схема экспериментальной установки

Для измерения магнитных составляющих поля использовался индуктивный зонд, представляющий собой одновитковую рамку из нихромового провода, навитую на круглый тефлоновый каркас диаметром 5 мм. Сигнал с зондов подавался на вход осциллографа или фазометра в зависимости от вида измеряемой величины.

### 4.2 Определение напряженности электрического поля

Результаты измерений радиального распределения радиальной компоненты электрического поля приведены на рисунках 4.2.1, 4.2.2 и 4.2.3 при различных расходах аргона.



Рисунок 4.2.1 - Напряженность электрического поля при расходе аргона 0,4 м<sup>3</sup>/час.



Рисунок 4.2.2 - Напряженность электрического поля при расходе аргона 0,5 м<sup>3</sup>/час.



Рисунок 4.2.3 - Напряженность электрического поля при расходе аргона 0,6 м<sup>3</sup>/час.

Измерения проводились, начиная 20 мм от оси разряда, потому что диаметр кварцевой трубки 28 мм, возникала опасность пробоя разряда на емкостной зонд. Для определения величины удельного энерговыделения выделения необходимо определить величину напряженности на границе канала, 2 мм от оси разряда

Известно, что при распространении электромагнитной волны вдоль проводящего цилиндра радиальное распределение радиальной компоненты электрического поля будет описываться следующий выражением:

$$E_r = AH_1^{(1)}(\sqrt{k^2 - h^2}r)$$
(4.2.1)  
$$k^2 \ll h^2$$

Здесь *k* – постоянная распределения электромагнитной волны, определяется по формуле:

$$k = \varepsilon_0 \mu \omega^2$$

где ε<sub>0</sub> – абсолютная диэлектрическая проницаемость; ω – частота электромагнитного поля; μ – магнитная проницаемость.

h – волновое число, определяется по формуле:

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

где *a* – радиус канала; *σ* – удельная электропроводность; і – мнимая единица;

Как видно из рисунков 4.2.1, 4.2.2 и 4.2.3 на которых приведено экспериментальное распределение радиальной компоненты электрического поля и распределение электрического поля, рассчитанного на основе выражение 4.2.1 эти распределения практически совпадают. Вследствие этого можно определить напряженность электрического поля на границе канала разряда по средствам использования формулы 4.2.1. В соответствии с этим выражением определим напряженность на границе канала разряда:

$$E_r|_{2mm} = \zeta E_r|_{20mm}$$
  
rge  $\zeta = \frac{E_r|_{20mm}}{E_r|_{2mm}} = AH_1^{(1)}(\sqrt{k^2 - h^2}0,02)/AH_1^{(1)}(\sqrt{k^2 - h^2}0,002)$ 

Определим величину при различных расходах аргона. Так как в формуле 4.2.1 присутствует постоянная распределения электромагнитной волны k и величина волнового числа h, сначала определяем их.

Вычисляем постоянную распределения электромагнитной волны k:

$$k^{2} = \varepsilon_{0}\mu\omega^{2} = 8,8 * 10^{-12} * 4 * 3,14 * 10^{-7} * 2 * 3,14 * 37 * 10^{6} = 0,597$$

Так как величина удельной электропроводности меняется вдоль оси необходимо разряда определить среднее значение удельной электропроводности  $\sigma_{cp}$  для нахождения волнового числа при разных расходах аргона. Для большей точности полученные экспериментальные значения σ аппроксимировались полиномом 5-го порядка. Аппроксимация Среднее MatLab. производилась В программе значение удельной электропроводности определялось с помощью интеграла:

$$\frac{1}{L}\int_0^l \sigma(z)dz$$

При расходе аргона 0,4 м<sup>3</sup>/час  $\sigma_{cp}$  составила:

$$\frac{1}{L} \int_{0,1}^{0,9} (-910x^5 + 3000x^3 - 3200x^2 + 1100x - 60)dx = 26,86/0,8 = 33,58$$

При расходе аргона 0,5 м<sup>3</sup>/час  $\sigma_{cp}$  составила:

$$\frac{1}{L} \int_{0,1}^{0,9} (-690x^5 + 2400x^3 - 2600x^2 + 940x - 53)dx = 25,344/0,8 = 31,68$$

При расходе аргона 0,6 м<sup>3</sup>/час  $\sigma_{cp}$  составила

$$\frac{1}{L} \int_{0,1}^{0,9} (-490x^5 + 1700x^3 - 2000x^2 + 770x - 42) dx = 24,4657/0,8 = 30,58$$

Далее производится вычисление волнового числа при разных значения среднего значения удельной электропроводности.

$$h = \frac{1+i}{a\sqrt{5}}\sqrt{\frac{\omega\varepsilon_0}{\sigma}} = \frac{1+1}{2*2,236}\sqrt{\frac{2*3,14*37*8,8*10^{-6}}{33,58}} = 223,6*0,0078 = 1,75 = >$$

$$h^2 = 6,1i$$

при σ = 33,58

$$\sqrt{k^2 - h^2} = \sqrt{0,597 - 6,1i} = 1.8343 - 1.6627i$$

$$h = \frac{1 + i}{a\sqrt{5}} \sqrt{\frac{\omega\varepsilon_0}{\sigma}} = \frac{1 + 1}{2 * 2,236} \sqrt{\frac{2 * 3,14 * 37 * 8,8 * 10^{-6}}{33,68}} = 223,6 * 0,008 = 1,796 =>$$

$$h^2 = 6,45i$$
при  $\sigma = 31,68$ 

$$\sqrt{k^2 - h^2} = \sqrt{0,597 - 6,45i} = 1,8812 - 1.714i$$

$$h = \frac{1 + i}{a\sqrt{5}} \sqrt{\frac{\omega\varepsilon_0}{\sigma}} = \frac{1 + 1}{2 * 2,236} \sqrt{\frac{2 * 3,14 * 37 * 8,8 * 10^{-6}}{30,58}} = 223,6 * 0,0082 = 1,83 =>$$

$$h^2 = 6,698i$$

при *о* =30,58

$$\sqrt{k^2 - h^2} = \sqrt{0,597 - 6,698i} = 1.9137 - 1.75i$$

После вычисления всех неизвестных значений формулы 4.2.1, определим напряженность на границе канала разряда.

$$\zeta = \frac{E_r|_{20mm}}{E_r|_{2mm}} = AH_1^{(1)}(\sqrt{k^2 - h^2}0, 02) / AH_1^{(1)}(\sqrt{k^2 - h^2}0, 002) = 0, 1$$

Так как экспериментальное значение напряженности электрического поля при первом расходе составило 322 В/м, при втором - 310 и при третьем - 306, определяем значение на границе канала разряда:

Q1:

$$E_r|_{2mm} = \zeta E_r|_{20mm} = 322 * 10 = 3220 \,\mathrm{B/M}$$

Q2:

$$E_r|_{2mm} = \zeta E_r|_{20mm} = 310 * 10 = 3100 \,\mathrm{B/M}$$

Q3:

$$E_r|_{2mm} = \zeta E_r|_{20mm} = 310 * 10 = 3060 \,\mathrm{B/M}$$

#### 4.3 Определение удельного энерговыделения

Величина джоулевых потерь, и соответственно удельного энерговыделения, в плазме разряда определиться посредством следующего выражения:

$$W = \sigma |E|^2$$

где σ – удельная электропроводность плазмы разряда; |E| - действующее значение напряжённости электрического поля.

Используя полученные осевые распределения удельной электропроводности плазмы разряда и напряженности электрического поля, можно рассчитать осевое распределение удельного энерговыделения. Результаты расчёта осевого распределения величины удельного энерговыделения в плазме высокочастотного факельного разряда при заданном расходе представлены на рисунке 4.3.1.



Рисунок 4.3.1 - Осевое распределение источников энерговыделения в плазме высокочастотного разряда, горящего в аргоновой плазме.

На основе рисунка 4.3.1 можно сделать вывод, что максимум энерговыделения будет наблюдаться при расходе аргона 0,4 м<sup>3</sup>/час, на расстоянии 15 см от электрода.

ФИНАНСОВЫЙ

#### РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

5

Работа направлена на исследование перспективности использования изотопа лития в нейтронно-захватной терапии.

В настоящее время перспективность научного исследования определяется ни только масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает трудно, но и коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческого потенциала разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований. Через такую оценку ученый может найти партнера для дальнейшего проведения научного исследования, коммерциализации результатов такого исследования и открытия бизнеса.

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, чтобы удовлетворить потребителя, каков бюджет научного проекта, сколько времени потребуется для выхода на рынок.

Целью данного раздела является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации. Для достижения описанной цели необходимо сформировать концепцию проекта, организовать работы по научно-исследовательскому проекту, определить возможные альтернативы проведения научных Необходимо исследований. планирование провести научноработ, коммерческого исследовательских оценку потенциала И перспективности проведения научных исследований с позиции

71

ресурсоэффективности и ресурсосбережения, определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

Выполнение научных исследований затрагиваемой области должно строиться на основе подходов и принципов управления проектами. В предпроектную стадию входит анализ, направленный на сбор информации, описывающий требования к продукту, который должен произвести научный проект, коммерческий и инновационный потенциал научно-технического исследования. Основными представляемыми моментами являются результаты следующих этапов управления научным проектом:

- инициация проекта;
- планирование проекта;
- исполнение проекта.

Данным этапам должен предшествует предпроектный анализ, направленный на сбор информации, описывающий требования к продукту или услуге.

#### **5.1. 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.

Проведем SWOT-анализ влияния добавок молекулярного газа на температуру факельного разряда, горящего в атомарном газе. Результаты первого этапа, а именно описание сильных и слабых сторон проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 5.1.1.

72
Таблица 5.1.1 Матрица SWOT

	Сильные стороны	Слабые стороны
	научно-	научно-
	исследовательского	исследовательского
	проекта:	проекта:
	С1. Низкая	Сл1.Неизученность
	себестоимость	метода и сложности в
	атомарного газа-аргона	его развитии
	С2. Экономичное	Сл2. Низкая
	использование	актуальность
	электроэнергии.	исследований
	СЗ.Компактность	
	установки	
	С4. Простота монтажа	
	установки и	
	эксплуатация.	
Возможности:		
В1. Проведение		
дальнейших		
исследований и		
открытие новых		
перспектив		
В2.Усовершенствование		
установки		
В3. Сотрудничество с		
научными		
исследовательскими		
центрами		
Угрозы:		
У1. Появление более		
актуальных методик		
У2. Малый спрос на		
установку.		

Второй этап заключается в том, что необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Результаты приведены в таблице 5.1.2.

Сильные стороны проекта									
		C	21	C2		C3	C4		
Возможности	B1	-	ŀ	+		+	+		
проекта	B2	-	-	+		+	+		
	B3	-	-	-		-	-		
		Сл	абые с	тороны прое	екта				
Возможности				Сл1			Сл2		
	В	1		-			-		
проскта	В	2		-			-		
	В	3		-			-		
<b>/</b>		Сил	іьные (	стороны про	екта				
Venozli		C	21	C2		C3	C4		
проекта	У1		_	-		-	-		
npoerra	У2	-	_	-	-		-		
Слабые стороны проекта									
Venosh				Сл1			Сл2		
проекта	У	1		+			+		
npoonta	У	2		-		-			

## Таблица 5.1.2 Интерактивная матрица проекта

В рамках **третьего этапа** должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа, результаты приведены в таблице 4.3.3

## Таблица 5.1.3 SWOT-анализ

Сильные стороны	Слабые стороны
научно-	научно-
исследовательского	исследовательского
проекта:	проекта:
С1. Низкая	Сл1.Неизученность
себестоимость	метода и сложности в
атомарного газа-аргона	его развитии
С2. Экономичное	Сл2. Низкая

	использование	актуальность
	СЗ Компактность	исследовании
	С4. Простота монтажа	
	установки и	
<b>D</b> option and a street	Эксплуатация.	
<b>БОЗМОЖНОСТИ:</b> D1 Провоношио	Результаты анализа	Результаты анализа
ы. проведение	интерактивной матрицы	интерактивной матрицы
дальнеиших		проекта полеи «Слаоые
исследовании и	«Сильные стороны и	стороны и
открытие новых	возможности»:	возможности»: В свою
перспектив	Проведению	очередь неизученность
В2. у совершенствование	дальнеиших	метода, а также низкая
установки	исследованию и	актуальность может
ВЗ. Сотрудничество с	открытию новых	внести много
научными	перспектив,	трудностей при работе с
исследовательскими	усовершенствованию	установкой и разработке
центрами	установки и	новых проектов.
	сотрудничеству с	
	научными	
	исследовательскими	
	центрами могут	
	поспособствовать выше	
	перечисленные сильные	
	стороны НИП, такие как	
	дешевизна, простота и	
	компактность.	
Угрозы:	Результаты анализа	Результаты анализа
У1. Появление более	интерактивной матрицы	интерактивной матрицы
актуальных методик	проекта полей	проекта полей «Слабые
У2. Малый спрос на	«Сильные стороны и	стороны и угрозы»:
установку.	угрозы»	могут отрицательно
	Угрозы слабо влияют	сказаться на реализации
	на сильные стороны	данной установки в
	проекта, так как	научно-
	присутствует	исследовательской
	возможность ее	деятельности, так как
	усовершенствования и	малый спрос и
	проведения новых	появление более
	опытов.	актуальных методик
		могут сыграть свою

	роль.

# 5.2. Структура работ в рамках научного исследования

Таблица 5.2.1 Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	No	Содержание работ	Должность
	раб		исполнителя
Разработка технического	1	Составление и утверждение	Руководитель
задания		технического задания	темы
	2	Подбор и изучение материалов по	Руководитель
		теме	
Выбор направления исслелований	3	Проведение патентных исследований	Руководитель
	4	Выбор направления исследований	Руководитель,
	5	Календарное планирование работ по	Руководитель,
		теме	дипломник
	6	Проведение теоретических расчетов и	Руководитель,
Теоретические и		обоснований	дипломник
экспериментальные	7	Построение макетов (моделей) и	Руководитель,
исследования		проведение экспериментов	дипломник
	8	Сопоставление результатов	Руководитель,
		экспериментов с теоретическими	дипломник
		исследованиями	
	9	Анализ и обработка полученных	Руководитель,
		результатов	дипломник
	10	Оценка эффективности полученных	Дипломник
Обобщение и оценка		результатов	
результатов	11	Определение целесообразности	Дипломник
		проведения ОКР	
	Прове	гдение ОКР	
Изготовление и	12	Конструирование и изготовление	Руководитель,
испытание макета		макета (опытного образца)	инженер
(опытного образца)	13	Лабораторные испытания макета	Руководитель,
			инженер
Оформление отчета но	14	Составление пояснительной записки	Дипломник
НИР (комплекта		(эксплуатационно-технической	
документации по ОКР)		документации)	

#### 5.3. Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаях образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{oxi}$  используется следующая формула:

$$t_{\text{ожi}} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \qquad (5.3.1)$$

где  $t_{0,xi}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения *i*-ой работы чел.-дн.;

*t*<sub>min*i*</sub> – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной *i*-ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

*t*<sub>maxi</sub> – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной *i*-ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

$$t_{\text{ож1}} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8$$
 дн.

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

$$T_{\mathbf{p}_i} = \frac{t_{\text{oxi}}}{\mathbf{U}_i}, \qquad (5.3.2)$$

где *т*<sub>р*i*</sub> – продолжительность одной работы, раб. дн.;

*t*<sub>ожі</sub> – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

Ч<sub>*i*</sub> – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

$$T_{\rm p1} = \frac{2.8}{1} = 2.8$$
 раб.дн.

#### 5.4. Разработка графика проведения научного исследования

*Диаграмма Ганта* – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

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

$$T_{\kappa i} = T_{\rm pi} \cdot k_{\rm кал} \,, \tag{5.3.3}$$

где *Т*<sub>кі</sub> продолжительность выполнения *i*-й работы в календарных днях;

*T*<sub>р*i</sub></sub> – продолжительность выполнения <i>i*-й работы в рабочих днях;</sub>

*к*<sub>кал</sub> k<sub>кал</sub>- коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\rm kan} = \frac{T_{\rm kan}}{T_{\rm kan} - T_{\rm Bbix} - T_{\rm np}},$$
 (5.3.4)

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

№ работ	Вид работ	Исполнители	$T_{\kappa i}$ ,	Продолжительность выполнения работ												
			кал. дн.	февр	).	мар	Г		апре	ль		май			июн	6
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление ТЗ	Руководитель	4		]											
2	Изучение литературы	Дипломник	12													
3	Выбор направления исследований	Дипломник	13													
4	Календарное планирование работ по теме	Дипломник	6													
5	Проведение исследований	Руководитель, дипломник	9													
6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель, дипломник	8													
7	Экспериментальные исследования на основе получены расчетов	Руководитель, дипломник	11													
8	Анализ и обработка полученных результатов	Дипломник	5													
9	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, дипломник	4													
10	Составление пояснительной записки	Дипломник	16													
11	Подготовка к защите темы	Дипломник	12													



Календарный план – график проведения НИР по теме

#### 5.5 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

#### 5.6 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$C_{\rm M} = (1 + k_T) \sum_{i=1}^{m} \coprod_i \cdot N_{\rm pacxi}, \qquad (3.2)$$

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

N<sub>pacxi</sub> – количество материальных ресурсов *i*-ого вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

Ц<sub>*i*</sub> – цена приобретения единицы *i*-ого вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

 $k_T$  — коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15-25 % от стоимости материалов. Примем  $k_T$  равным 0,2.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в таблицу 10.

Наименование	Количество,	Цена за	C <sub>w</sub> , py6.	
	ШТ.	ед., руб.	~ M, FJ 0.	
Шариковая ручка	1	40	48	
Тетрадь формата А4	1	300	360	
Итого:			408	

Таблица 5.6.1 – Материальные затраты

На статью "Спецоборудование" для разработки и экспериментальных работ относятся затраты на приобретение, изготовление, аренду или амортизационные отчисления специальных приборов, устройств и т.д. При выполнении данной работы всё используемое оборудование собственное.

Сумма амортизационных отчислений рассчитывается по следующей формуле:

$$C_a = \sum_{i}^{n} \frac{\mathcal{U}_{\delta a n} \cdot H_a \cdot g_i \cdot t}{\Phi_{g \phi}}$$
(3.3)

где *Цбал* – стоимость *i*-го вида оборудования, руб;

На- норма годовых амортизационных отчислений;

*gi*- количество единиц *i*-го вида оборудования;

*t*- время работы *i*-го вида оборудования;

*Ф*<sub>Э</sub>*ф* – эффективный фонд времени работы оборудования.

Эффективный фонд рабочего времени  $\Phi_{\ni}\phi$  рассчитывается по следующей формуле:

$$\Phi_{\mathcal{H}} = (\Phi_{\kappa a \pi} - \Phi_{n p, \mathcal{B} b i x}) \cdot k_{\mathcal{C} \mathcal{M}} \cdot \kappa_{\mathcal{H} n}$$
(3.4)

где  $\Phi_{Kan}$  количество календарных дней в году, дни;  $\Phi_{np,6blx}$  количество праздничных и выходных дней в году, дни;  $k_{CM}$  – коэффициент сменности (в данном случае  $k_{CM}$ =1);

 $k_{H.N.}$  – коэффициент неучтённых потерь ( $k_{H.N}$ =20 $\Box$ 30 %).

Эффективный фонд рабочего времени составляет 250 дней.

Таблица 5.6.2 – Расчёт затрат по статье "Спецоборудование"

Наименование	Стоимость	Норма	Время	Сумма
оборудования	оборудовани	Амортизаци	использован	амортизационн
	я,	И,	ия, час	ых отчислений,
	руб.	%		руб.
Компьютер	20000	25	300	250
Баллон с	3900	22	15	2
Аргоном				
Осциллограф	39425	17	30	34
универсальный				
C1-68				
Спектрометр	98994	20	50	165
Итого по статье	C <sub>a</sub>			451

Затраты на потребляемую электроэнергию рассчитываются по следующей формуле:

$$C_{_{\mathcal{I}\mathcal{I}}} = W_{_{\mathcal{Y}}} \cdot T_{_{\mathcal{G}}} \cdot S_{_{\mathcal{I}\mathcal{I}}} \tag{3.5}$$

где *W*<sub>V</sub>- установленная мощность, кВт;

*Тg*- время работы оборудования, час;

*S*<sub>ЭЛ</sub>- тариф на электроэнергию.

Тариф в 2016 в Томской области на электроэнергию составляет – 2,28 руб кВт час. Расчёт затрат на потребляемую электроэнергию представлен в таблице 12.

			I
Наименование	Мошность	Прололжительно	Сумма.
	1110		- J minung
ofonygonaug	TRUGORA RBT	CTI DOGOTIL HOC	nyb
оборудования	приобра, кы		руб.
TC	0.2	200	101 50
Компьютер	0,3	280	191,52
Лампа лневного	0.4	500	456
		••••	
освещения (ош1.)			
Осциллограф	0,2	30	13,68
	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,		
Спектрометр	0.2	50	22.8
Спектрометр	0,2	50	22,0
	1	l	60.4
Итого по статье $C_{3}$			684

#### 5.7. Основная заработная плата исполнителей темы

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

$$C_{3\pi} = 3_{och} + 3_{don}$$
 (5.7.1)

где З<sub>осн</sub>– основная заработная плата, руб.;

3<sub>доп</sub> – дополнительная заработная плата, руб.

Основную заработную плату руководителя НИР можно рассчитать по следующей формуле:

$$\mathbf{3}_{\mathsf{och}} = \mathbf{3}_{\mathsf{дH}} * \mathbf{T}_{\mathsf{pab}} \tag{5.7.2}$$

где **З**<sub>дн</sub> – среднедневная заработная плата работника, руб.;

Т<sub>раб</sub> – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.

Для руководителя: З<sub>осн</sub> = 1688,75 × 28 = 47285 рублей

Для инженера: З<sub>осн</sub> = 910,29 × 96 = 87387,84 рублей

Среднедневная заработная плата работника рассчитывается по формуле:

$$3_{\rm gh} = \frac{3_{\rm M} * M}{F_{\rm g}}$$
 (5.7.3)

где 3<sub>м</sub> – месячный должностной оклад работника, руб.;

М – количество месяцев работы без отпуска в течение года, дн.

*F*<sub>д</sub> – расчетный годовой фонд рабочего времени персонала (в рабочих днях).

Количество месяцев работы без отпуска в течение года при отпуске в 56 дней составляет М = 10,2 месяца. Тогда,

для руководителя: 
$$3_{\text{дн}} = \frac{32313,72*10,4}{199} = 1688,75$$
 рублей для инженера:  $3_{\text{дн}} = \frac{17418,24*10,4}{199} = 910,29$  рублей

Таблица 5.7.1 Расчетный годовой фонд рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
-выходные дни	104	104
-праздничные дни	14	14
Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Потери рабочего времени: - отпуск	48	48
- невыходы по болезни	_	—
Действительный годовой фонд рабочего времени	199	199

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$\mathbf{3}_{\mathsf{M}} = \mathbf{3}_{\mathsf{TC}} + \left(\kappa_{\mathsf{TIP}}\right) \cdot \kappa_{\mathsf{P}},\tag{5.7.4}$$

где **З**<sub>тс</sub> – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

к<sub>пр</sub> – премиальный коэффициент (индивидуально стимулирующая добавка(ИСН)), равный 20% от З<sub>тс</sub>;

к<sub>р</sub> – районный коэффициент, равный 1,3 для Томска;

Заработная плата З<sub>тс</sub> по тарифной ставке (оклад) доцента, кондидата наук – 23264,86 руб., ассистента - 13824 руб., согласно «Положению об оплате труда» ТПУ

Работникам, имеющим ученую степень устанавливается ежемесячная доплата: кандидату наук- 7 000 рублей, учтем это при расчете **3**<sub>м</sub>.

 $3_{M} = 23264,86 + (4652,97) * 1,3 + 3000 = 32313,72 \text{ pyb.}$ 

 $3_{M} = 13824 + (2764,8) * 1,3 = 17418,24$  руб.

Результаты расчета основной заработанной платы представлены в таблице 4.9.2.

Исполнители	З <sub>тс</sub> , руб.	Кпр	К <sub>р</sub>	З <sub>м</sub> , руб	З <sub>дн</sub> , руб.	Т раб раб. дн.	З <sub>осн</sub> , руб.
Руководитель	23264,86	4652,97	1,3	32313,72	1688,75	28	47285
Инженер	13824	2764,8	1,3	17418,24	910,29	96	87387,84
Итого З <sub>осн</sub>							

Таблица 5.7.2 Результаты расчета основной заработанной платы

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

$$3_{\text{доп}} = 3_{\text{осн}} * \kappa_{\text{доп}},$$
 (5.7.5)

где З<sub>доп</sub> – дополнительная заработная плата, руб.;

к<sub>доп</sub>- коэффициент дополнительной зарплаты;

**З**<sub>осн</sub> – основная заработная плата, руб.

Для руководителя: З<sub>доп</sub> = 47285 \* 0,1 = 4728,5 рублей

Для инженера: З<sub>доп</sub> = 87387,84 \* 0,1 = 8738,784 рублей

## 5.8. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$\boldsymbol{\beta}_{_{\mathrm{BHe\boldsymbol{\delta}}}} = \boldsymbol{k}_{_{\mathrm{BHe\boldsymbol{\delta}}}} \cdot (\boldsymbol{3}_{_{\mathrm{OCH}}} + \boldsymbol{3}_{_{\mathrm{JO\Pi}}}), \qquad (5.8.1)$$

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

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

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в табличной форме (таблица 5.8.1).

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнитель ная заработная плата, руб.	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	Сумма отчислени й
Руководитель проекта	47285	4728,5	0,271	14095,66
Инженер	87387,84	8738,784	0,271	26050,32
	40145,98			

Таблица 5.8.1. Отчисления во внебюджетные фонды

## 5.9. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов.

Их величина определяется по следующей формуле:

$$\mathbf{3}_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) * \mathbf{k}_{\text{нр}},$$
 (4.9.2.1)

где k<sub>нр</sub> – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

$$3_{\text{накл}} = (40145,98 + 134672,84 + 993,31) * 0,16 = 28129,94$$
руб.

Бюджет затрат на НТИ

# Таблица 5.9.1 – Группировка затрат по статьям

Наименование статей затрат			Сумма, рублей	
Материальные затраты			408	
Сумма		амортизаг	ционных	451
отчислений				
Затраты	на	потреб	бляемую	684
электроэнергию				
Затраты	на	оплату	труда	134672,84
работников,		непосред	ственно	
занятых созданием НИР				
Отчисления во внебюджетные фонды			40145,98	
Накладные расходы			28129,94	
Итого себестоимость, С <sub>нир</sub> руб			204491,76	

#### 6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебнопрофилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

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

и являются обязательными для исполнения рабочими, служащими, инженерно-техническими работниками и руководящим составом.

## 6.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. Основные элементы производственного процесса представлены в таблице 4.1.

Таблица 6.1.1 Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование	Факторы		Нормативные	
видов работ и	ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		документы	
параметров	Вредные	Опасные		
производственного				
НИ ТПУ ФТИ		Электрический	ГОСТ 12.1.038-82	
кафедра		ток	ССБТ.	
«Техническая			Электробезопасность.	
физика», Работа с			Предельно	
ЭВМ и			допустимые уровни	
высокочастотной			напряжений	
плазмохимической			прикосновения и	
установкой			токов.	
	Воздействие		СанПиН	
	радиации		2.2.2/2.4.1340-03.	
	(ВЧ,УВЧ,СВЧ		Санитарно-	
	и т.д.)		эпидемиологические	
			правила и нормативы	
			«Гигиенические	
			требования к ПЭВМ и	
			организации работы».	

		СанПин
		2.2.4/2.1.8.055-96
		«Электромагнитные
		излучения
		радиочастотного
		диапазона»
	Пожарная	Федеральный закон от
	опасность	22.07.2013 г. №123 –
		ФЗ. Технический
		регламент о
		требованиях
		пожарной
		безопасности.

При работе на плазмохимическом реакторе, на студента могут воздействовать следующие факторы:

Физические:

- температура и влажность воздуха;
- шум;
- статическое электричество;
- электромагнитное поле высокой чистоты;
- освещённость;
- наличие излучения;
- работа с газовыми баллонами.

Психофизиологические:

— физические перегрузка (статическая, динамическая);

— нервно-психические перегрузки (умственные перегрузки, перегрузки анализаторов, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

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

#### 6.2.1 Организационные мероприятия

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 специальной удостоверение.

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

6.2.2 Требования безопасности при выполнении работ с использованием персональных электронно-вычислительных машин и на плазмохимическом реакторе

При работе на ПЭВМ сотрудники могут быть подвергнуты воздействию вредных производственных факторов:

- шум и вибрация
- повышенный уровень электромагнитных излучений;
- повышенный уровень статического электричества;
- перенапряжение зрительных анализаторов
- статические физические перегрузки;

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 4.2.

Таблица 6.2.2.1 Оптимальные и допустимые параметры микроклимата.

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

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация

вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека – не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и В нагревание воздуха. помещениях равномерное с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность -40%, скорость движения воздуха -0.1 м/с, температура летом -20-25 °C, зимой – 13–15 °C. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

Электрод плазмотрона и разряд являются источниками, излучающими ВЧ излучение в диапазоне 38-41 МГц. Систематическое воздействие электромагнитных полей радиочастот с уровнями, превышающими допустимые, может приводить к нарушению состояния работающих. Защита от воздействия ВЧ поля обеспечивается конструкцией генератора и наличием металлического экрана (кожуха) у плазмотрона.

Необходимость кратковременного снятия части экрана для поджига

разряда и наличие отверстий в экране для ввода оптического излучения из плазмотрона требует, чтобы интенсивность электрической составляющей ВЧ излучения на рабочих местах установки не превышала 5 В/м. Причем при облучении в течении всего рабочего дня допустим уровнем являются 10 мкВт/см<sup>2</sup>. При облучении не более 15-20 минут за рабочий день - 1000 мкВт/см<sup>2</sup>.

В остальное рабочее время интенсивность облучения не должна превышать 10 мкВт/см<sup>2</sup>. Время работы на ПХУ в течение дня не превышало 4 часов.

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

в диапазоне частот 5 Гц2 кГц – 25 В/м;

— в диапазоне частот 2 кГц−400 кГц − 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

в диапазоне частот 5 Гц–2 кГц – 250 нТл;

в диапазоне частот 2 кГц–400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

 увеличение расстояния от источника (экран должен находится на расстоянии не менее 50 см от пользователя);

 применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. Конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 7,7-10 А/кг, что соответствует эквивалентной дозе, равной 100 мкР/час.

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

#### 6.3 Электробезопасность

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

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.

Во избежание травматизма следует, соблюдать следующие правила:

• должна быть изучена инструкция по эксплуатации аппаратуры, а перед каждым включением производился осмотр рабочего места;

• обращать особое внимание на последовательность включений и выключения питания отдельных узлов;

• Все узлы комплекса должны быть заземлены через контур заземления;

• Контур заземления периодически проверяется на электрическое

сопротивление.

Меры первой помощи зависят от состояния пострадавшего, которые определяются путём проведения следующих мероприятий:

1. уложить пострадавшего спиной на твёрдую поверхность;

2. проверить наличие дыхания и пульса;

3. выяснить состояние зрачка.

Если пострадавший находится в сознании, но до этого был в состоянии обморока - обеспечить ему условия для полного покоя, следить за дыханием и пульсом, вызвать врача.

Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но дышит и прощупывается пульс, необходимо привести его в сознание, дать понюхать нашатырный спирт и обрызгивать водой, при необходимости делать искусственное дыхание и массаж сердца.

Характер и последствия поражения зависят от величины, частоты и пути прохождения тока; продолжительности воздействия. Поэтому помощь быть оказана немедленно. При первой должна оказании помощи необходимо пострадавшего отсоединить OT токоведущей части, одновременно защищая себя от опасности контакта с тоководами.

В первую очередь надо отключить ток. При легких поражениях пострадавшего следует вынести на свежий воздух. Если дыхание очень резкое и судорожное, необходимо сделать искусственное дыхание. При остановке дыхания и отсутствии пульса делают искусственное дыхание и непрямой массаж сердца. Затем необходима госпитализация.

#### 6.3.1 Электробезопасность при работе на ПЭВМ

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с

землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ПЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ПЭВМ;

при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ПЭВМ);

при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;

при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок.

Отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы, вывешивание плакатов, указывающих место работы, заземление корпусов всех установок через нулевой провод, покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией, недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей).

# 6.3.2 Электробезопасность при работе с плазмохимическим реактором

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 подеется высоковольтное (выше 1000 В) напряжение высокой частоты (40 МГц). Наличие металлического кожуха у плазматрона исключает случайное прикосновение к электроду.

Инициирование разряда, требующее прикосновения проводником к электроду внутри плазматрона, производиться только изолирующей штангой.

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

Перед началом каждого семестра производится осмотр генератора.

При осмотре должно обращаться 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.

#### 6.4 Пожарная безопасность

Пожар – это неконтролируемый процесс горения, развивающийся во времени и пространстве, опасный для людей и наносящий материальный ущерб.

Пожарная и взрывная безопасность – это система организационных мероприятий и технических средств, направленная на профилактику и ликвидацию пожаров и взрывов на производстве.

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

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

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

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер.

Запрещается:

– использовать электронагревательные приборы;

 эксплуатировать провода электроприборов с поврежденной изоляцией;

пользоваться поврежденными розетками, рубильниками, вилками и прочим электрооборудованием;

обертывать (накрывать) светильники, бытовые приборы бумагой,
тканью и другими горючими материалами;

применять открытый огонь;

– курить в помещении;

 оставлять без наблюдения включенную в сеть радиоэлектронную аппаратуру, ПЭВМ, оргтехнику, бытовую технику;

пользоваться неисправной или незаземленной аппаратурой;

 нарушать правила эксплуатации ПЭВМ и оргтехники, а так же инструкции по работе на ПЭВМ и средствах оргтехники, действующие в институте;

– включать в сетевые фильтры, блоки бесперебойного питания и специализированные розетки, расположенные в коробах бытовую технику и другое, не относящееся к ПЭВМ оборудование.

По окончании работы необходимо обесточить все электроприборы и осмотреть помещения на наличие признаков возгорания. При наличии в помещении выделенной сети электропитания для ПЭВМ, необходимо выключить автомат питания в распределительном щите.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. Сообщить руководству (дежурному).

2. Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел. 112.

3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

## 6.5 Техника безопасности при эксплуатации газовых баллонов.

Эксплуатация 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, вентилей открытым огнем; отогревать их следует только горячей водой;

г) при перекатывании кислородных баллонов вручную нельзя браться 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\*105 Па (0,5 кгс/см2), а для растворенного ацетилена - не более 105 Па (1 кгс/см2).

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

## выводы

- 1. Установлено, что максимум электронной и газовой температуры находится на расстоянии от электрода, составляющем 0,3...0,5 длины канала разряда.
- Максимальная величина электронной температуры составляет 8560 К, а максимальная величина газовой – 1990 К.
- 3. При увеличении расхода аргона, максимумы газовой и электронной температур уменьшаются.
- 4. Величина напряженности электрического поля составила 3220 В/м

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты данной выпускной квалификационной работы могут быть использованы для оптимизации работы плазмохимического реактора, рабочим телом в котором является инертный газ. На основе проведенных измерений осевого распределения газовой температуры могут быть рассчитаны кинетические характеристики, протекающих в реакторе, химических процессов. А также может быть определена тепловая нагрузка на стенки реактора.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1. Зилитинкевич С.И. Электрическое факельное истечение // Телеграфия и телефония без проводов, 1928, № 9.
- Trunecek V. Unipolar high frequency discharge // Folia Fac. Sci. Nat. University. 1971.
- Trunecek V. Unipolar and electrodeless capacitively coupled highfrequency dischanges excited at atmospheric pressure and their applications // Acta physica slovaca, 1979.
- 4. Trunecek V.Fackelentladung und Fackelboden // Beitrage a us der Plasmaphysic. - 1962, Vol. 1, № 2.
- Кузовников А.А., Канцов Н.А. Исследование высокочастотного разряда в диапазоне от 1,5 до 15 МГц // Изв. Вузов. Физика, 1960.
- 6. Кузовников А.А., Цянь-Гао-Юнь. Исследование высокочастотного разряда в диапазоне от 1,5 до 15 МГц // Изв. Вузов. Физика, 1960.
- Ткаченко А.Г., Корючкин А.В., Луценко Ю.Ю., Гамзинов С.В. Теплоэлектрофизические параметры секционированного высокочастотного факельного плазмотрона // Плазменная техника, технология, Казань, 1988.
- U. Jecht, W. Kessler О механизме возбуждения факельного разряда на частоте 2400 МГц // Z.Phys. - 1964. - 178. - №2.
- Тихомиров И.А. Высокочастотные факельные плазмотроны и их практическое применение // Известия СО АН СССР, Серия техн. наук, 1980, -№8, вып.2.
- 10. Ткаченко А.Г. Исследование теплофизических и газодинамических характеристик плазменной струи высокочастотного факельного разряда // Неравновесные процессы в разряженных средах. Новосибирск. - 1983.
- 11. Тихомиров И. А. Квеско С.Б. Плазма амплитудно- модулированного высокочастотного факельного разряда и перспективы ее использования // Физика и химия обработки материалов, 1984.-№6.

- 12.Марусин В.В., Тихомиров И. А. Получение амплитудномодулированной плазмы // Генераторы низкотемпературной плазмы. М.: - 1969.
- 13.Прокофьев А.М. Влияние постороннего постоянного электрического поля на факельное истечение // ЖЭТФ. 1937.
- 14.Farsky, J.Janca. Mutual relation among macro and microparameters in unipolar h.f.discharges // Scripta.Fac.Sci.UJ.E.P -1972. Bd.2
- 15. Тихомиров И.А. и др. Исследование пространственного распределения параметров ВЧ факельного разряда. І. Газовая температура /Деп. в ВИНИТИ. - 1973. - № 7606-73.
- 16. Тихомиров И.А., Марусин В.В. К распределению электронов по энергиям в ВЧ факельном разряде // ЖТФ. - 1967. - т.38. - №1.
- 17.El Gamal M. // Contr. Pap. of 8 Int. Conf. jn Ijniz. Gases, Vienna. 1967.
- 18. Григорович Р., Кристеску Д. К теории высокочастотного факельного разряда // Оптика и спектроскопия, 1959, № 6, Вып. 2. с. 129-136
- 19.Сорокин Л.М. ВЧ плазмотроны // В кн. Теория электрической дуги в условиях вынужденного теплообмена. - Новосибирск, Наука, 1977,-с. 311
- 20.Луценко Ю.Ю., Тихомиров И.А. О характере отражения электромагнитной волны в канале ВЧ факельного разряда//Тез. докл. Всесоюзн. семинара по высокочастотному пробою газов. —Тарту, 1989.
- 21.Качанов А.В., Трехов Е.С., Фетисов Е.П. Электродинамическое описание высокочастотного факельного разряда //Физика газоразрядной плазмы. - М., 1968.
- 22.Сузи Я.А., Лаан М.Р. Измерение вращательной температуры во время импульсного ВЧ разряда // Уч. Зап. Тартуского ун-та, 1982.
- 23.Луценко Ю.Ю., Власов В.А., Зеленецкая Е.П. Влияние осевой неоднородности плазмы высокочастотного факельного разряда на его электродинамические характеристики // Теплофизика и аэромеханика. 2013. №1. с.117 122.

- 24.H. Hess, H.-G. Kloss, K. Rademacher, K. Seliger, Vergleich zwichen einem Verfahren zur Bestimmung von Bogentemperaturen mit Hilfe von Stoßwellen und einer spektroskopischen Methode, Beiträge aus der Plasmaphysik, 2 (1962) 171-178
- 25.D. Kannapan, T.K. Bose, Transport properties of a two-temperature argon plasma, The Physics of Fluids, vol. 20, №10, (1977) 1668-1673
- 26.Сахаров А.Д. Изв. АН СССР, сер. Физ., 12, 372, 1948
- 27.E.C. Kemble, Phys, Rev., 30, 387, 1927
- 28.http://lud.bmstu.ru/indus/demo/scripts/html/direct/help/help\_c\_4.htm
- 29. Федеральный закон «Трудовой кодекс РФ» от 21.12.2001 г.
- 30.ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
- 31.Ижойкин Д.А.Плазменное окисление изотопов углерода в магнитном поле // Механика жидкости, газа и плазмы. 2014.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Determination of the axial distribution of the electrical characteristics of highfrequency plasma chemical reactor

#### Студент:

erjaenn			
Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Б	Мирзоев Спартак Рамилевич		

Консультант кафедры Технической физики:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Видяев Д.Г.	Д.Т.Н.		

#### Консультант – лингвист кафедры ИЯ ФТИ:

<b>.</b>	1 . 1			
Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Старший	Ермакова Я.В.			
преподаватель				

## ANNOTATION

The results of the measurements of electron and gas temperatures for the torch discharge which burns in a mixture of argon and air are presented. The
insignificant effect of air adding on the characteristics of argon plasma has been found. The conductivity of the plasma torch discharge burning in a mixture of argon and air has been evaluated.

# CONTENTS

INTRODUCTION	111
A.1. HIGH FREQUENCY TORCH DISCHARGE PHYSICS	
A.2. DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF T	HE TORCH
DISCHARGE PLASMA BURNING IN A MIXTURE OF AT	FOMIC AND
MOLECULAR GASES	
A.2.1 Setup scheme and measurement results	117
A.2.2. Determination of the electrical conductivity of the discharge p	lasma 119
CONCLUTION	

## **INTRODUCTION**

Recently, for plasma chemical processes the air and the air constituents are often used as the plasma gas. The use of these gases as plasma gas in various technological processes is due to the low cost of plasma gases. This refers not only to the main components of air - nitrogen and oxygen, but also to small impurity argon, which costs orders of magnitude lower than other inert gases.

Burning of the discharge in air is characterized by a slight difference between the gas and electron temperatures. At the same time, for the discharge, which burns in argon, the difference between the electron and gas temperatures is 3000 ... 5000K. This gap between the electron and gas temperatures is caused by low efficiency of the energy transfer from electrons to atoms of a gas through elastic collisions. In it was shown that even a small addition of molecular gas to atomic gas has a significant effect on the energy transfer process in the discharge plasma, which in turn reduces the difference between the gas and electron temperatures.

In this chapter the effect of air additives on the electron and gas temperatures of the torch discharge burning in argon is investigated.

### A1. HIGH FREQUENCY TORCH DISCHARGE PHYSICS

High-frequency flare discharge (HFFD) is a single-electrode highfrequency discharge of a capacitive type. It was discovered in 1929 by S.Zilitinkevich and K.Baxter during the studies of powerful high-frequency radio transmitters operation. The discharge ignited at the radio transmitters oscillating circuit inductor and disturbed its functionality. At low power values the shape of a flare discharge is identical to that of a candle flame. This is the reason why it was called a "flare" discharge. At higher values of power supplied to the discharge its shape acquires the form of an oblong plasma filament. At pressure values above  $3 \cdot 10^4$  Pa the high-frequency flare discharge (Fig.1) has three structural elements: near-electrode layer 1, channel 2, and diffusion cover 3. The discharge channel is a brightly-luminescent formation of a cylindrical shape, with the diameter gradually decreasing along the discharge axis. High-frequency current runs in the discharge channel, where preferential dissipation of the electromagnetic wave energy occurs. The discharge channel is surrounded with a faint diffusion cover having the diameter that is by 3 to 10 times more than that of the channel. In the diffusion



Fig. 1 HF flare discharge 1 – near-electrode layer; 2 – channel; 3 – diffusion cover.

cover their occurs recombination of ions that were formed as a result of thermal ionization in the discharge channel. Near-electrode layer is positioned between the discharge plasma and electrode surface. It is characterized by high values of electric field intensity. In this area the electrons are accelerated up to the energies that are sufficient for gas molecules to be ionized.

The mechanism of the flare discharge burning is conditioned by thermal ionization processes. The plasma of a flare discharge burning in molecular gases under atmospheric pressure is in the condition close to that of the thermodynamic equilibrium. The burning of a flare discharge

is observed in a wide frequency range, starting from  $v \sim 6$  MHz and over.

At the decrease of the electromagnetic field frequency the high-frequency flare discharge passes into the high-frequency corona. The burning of a highfrequency corona is observed at the frequency values under 6 MHz. At higher values of electromagnetic field frequency the corona discharge can be observed at the intensified cooling of the discharge plasma. The transition of the flare discharge into the corona occurs gradually, not step-wise, with the frequency and heat removal values changing in quite a wide range. High-frequency corona discharge represents a whole series of distorted plasma channels coming out of the electrode in the shape of "corona", or looks like a single channel with a blurred diffused structure. A high-frequency corona is characterized by a high degree of non-equilibrium and, accordingly, a significant difference between the temperature of electrons  $T_e = (6 \div 7) \cdot 10^3$  K and that of heavy particles  $T = (2 \div 3) \cdot 10^3$  K. The electric field intensity in a corona discharge is high and reaches 14 000 V/cm.

The mechanism of high-frequency corona combustion is explicable on the basis of streamer theory.

During the combustion from a non-cooled electrode the high-frequency flare discharge turns into a high-frequency arc.

The high-frequency arc is a single-electrode discharge, the combustion of which is accompanied by strong vaporization of the electrode material. Due to this, the mechanism of high-frequency arc combustion should be examined with regard to the processes on the electrode, as well as the influence of the electrode material gas phase presence in the discharge plasma.

The three above-stated types of a single-electrode high-frequency discharge are well observed only at low power values of high-frequency energy supplied to the discharge, since in this case a non-equilibrium degree of the discharge plasma can be easily controlled either by a simple change of the power delivered to the discharge, or by cooling the discharge plasma with a gas flow.

At power values W >70 in case of a cooled electrode, only a highfrequency flare discharge can typically be observed. Hence, when working with considerably powerful discharges used in application and research purposes and induced at the frequency of v>10 MHz, a single-electrode discharge can be identified with the flare one.

From the moment of its discovery up to now the high-frequency flare discharge has been studied mainly in the following aspects:

8.study of various factors (shape, electrode material, type of plasmasupporting gas, value of the supplied power) influence on the properties of the high-frequency flare discharge (HFFD);

9.study of HFFD plasma characteristics (heavy particles temperature, electrons temperature and concentration, non-equilibrium degree of the discharge plasma);

10. theoretical and experimental researches of issues related to the heat and mass transfer in the HFFD plasma;

11. study of HFFD amplitude-modulated plasma;

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

13. study of the issue on the HFFD interfacing with a HF generator;

14. study of HFFD electric characteristics (burner voltage, full-load current, discharge-earth capacitance).

HFFD is easily ignited in any gaseous atmosphere (air, inert gases, hydrogen, etc.) under pressure values of  $10^1 \div 5 \cdot 10^5$  Pa. Under atmospheric pressure the discharge is typically of a contracted shape. However, when burning in gases with high thermal conductivity its form becomes diffuse. Such mode of the discharge combustion is observed at its ignition in the hydrogen atmosphere.

The contraction of a flare discharge is associated with its spectral characteristics. In particular, the correlation was established between the diameters of NO and OH molecules band emission regions and the diameters of the channel and diffusion cover of the discharge burning in the air under atmospheric pressure.

It was also established that the power delivered to the discharge is proportional to the area of the cross-section of the region emitting NO bands. This relationship can be written down as follows:  $D_{NO} = const \sqrt[3]{W}$ , where W is the

discharge power. The measurements of the discharge plasma electrical conductivity were also indicative of the interrelation between the active resistance of the discharge flare and the dimensions of the region emitting NO bands. These results are indicative of the fact that NO bands excitation is localized in the current-conductive region of the discharge plasma.

Experimental studies show that HFFD structure and its dimensions are determined by the properties of the plasma-supporting gas, as well as by the character and level of the power supplied to the discharge. A significant number of studies are devoted to the measurement of the flare discharge temperature.

When comparing the results of measuring gas and electron temperature, it is seen that at the field frequency of tens MHz, the difference between them is about  $T_e/T = 1.5 - 2.5$ . However, in case when the frequency of discharge-feeding field is within a SHF range, the difference between the electron and gas temperature becomes more significant ( $T_e/T = 5 - 25$ ). Work also shows that the electron distribution by rates in a HFFD channel is different from Maxwell distribution. Thus, the conclusion can be made on the considerable nonequilibrium of the HFFD plasma.

HFFD discharge plasma characteristics to a considerable extent are dependent on the frequency of electromagnetic field, power supplied to the discharge, and flow rate of the plasma-supporting gas. Study shows that reduction of frequency (at the preset power) leads to the increase of the discharge channel length and the plasma temperature decrease.

According to study, the specified relationship is of a logarithmic character. The authors of, in their turn, propose using the relationship of L ~  $\omega^{1/2}$  type where L is the discharge channel length and  $\omega$  is the electromagnetic field frequency.

The process of energy transfer from the electromagnetic field to the HFFD plasma is also of interest. For example, the authors of suggest that electromagnetic energy transfer mechanism is influenced by dissociative recombination processes. In the HFFD burning in the air or nitrogen under atmospheric pressure next to the electrode there are  $N_2^+$  ions having the excitation potential of 18 eV. These

molecular ions diffuse from the electrode to the discharge plasma, where by means of collisions with electrons they recombine into nitrogen atoms in a dissociative way. Since the energy of molecular nitrogen dissociation amounts to 9.7 eV, the newly formed atoms acquire the kinetic energy of 8.3 eV, which, due to the collisions, is rapidly dissociated mainly in the form of chaotic thermal motion of plasma particles. Such mechanism of electromagnetic energy transfer is proved by measurements of the temperature of discharge burning in molecular gases with various dissociation energies.

HFFD is a strong atomizer. Studies show that atomization in HFFD plasma amounts to 15-25%

When describing HFFD, it is of great importance to determine such values as capacitive resistance, admittance, and active resistance of HFFD plasmoid. These characteristics of the discharge are strongly dependent on its geometric dimensions that in their turn are determined by the value of high-frequency power.

The measurements of high-frequency current and discharge voltage revealed that its voltage-current characteristic is of progressive character. However, the change of voltage at the increase of discharge power is so insignificant that high-frequency voltage stabilization by a flare discharge can be stated.

## A.2. DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF THE TORCH DISCHARGE PLASMA BURNING IN A MIXTURE OF ATOMIC AND MOLECULAR GASES

## 2.1 Setup scheme and measurement results

The investigated torch discharge had the power of 1 kW. The discharge was initiated in the cylindrical quartz chamber with a diameter of 28 mm at a frequency of 37 MHz. The measurements of the electron and gas temperatures were done at the distance of 70 mm from the electrode. The temperature of the torch discharge varies slightly along its axis. Therefore, the measurements carried out for a single point of the discharge will characterize the discharge plasma as a whole.

The radiation from the discharge volume under investigation was projected onto the slit of a spectrograph MSDD 1000. The measurements of the electron and gas temperatures were done for the relative intensities of rotational transitions of hydroxyl 3064 Å molecular band. Lines of oscillatory branch Q<sub>1</sub> were used. Lines that were not overlapped by other lines, namely Q<sub>1</sub>4, Q<sub>1</sub>6, Q<sub>1</sub>9, Q<sub>1</sub>10 were chosen. In order to cut off radiation from other parts of the discharge a 5 mm wide diaphragm was used.

The results of the gas temperature measurements for the torch discharge with different concentrations  $\Delta$  of air in plasma gas are shown in Fig. 2.

As one can see from Fig. 2 the gas temperature of the torch discharge increases monotonically by adding molecular gas to atomic gas. There is no dramatic increase in the gas temperature caused by addition of air into the plasma gas, which was mentioned in.

However, the temperature change for small values of the air concentration is maximal. At the higher air concentration in the plasma gas the temperature rise decreases.

Along with measurements of the gas temperature the electron temperature of the torch discharge, which burns in the mixture of argon and air, was measured. The measurements of the electron temperature were performed by Ornstein method using the relative intensities of copper lines. The copper was in the discharge plasma due to the evaporation of the surface material of the water-cooled copper electrode. The copper lines of 5106Å, 5153Å and 5218Å were used. The energies and the relative probabilities of the transitions that correspond to these lines were borrowed from.

The measurement results of the torch discharge electron temperature at various air concentrations in plasma gas are shown in Fig. 3.



Fig. 3. The dependence of the electron temperature of the torch discharge, which burns in the mixture of argon and air, on the air concentration.

Fig.2. The dependence of the gas temperature of the torch discharge, which burns in the mixture of argon and air, on the air concentration.

Fig. 3 shows that with the increase of the molecular gas concentration in atomic gas the electron temperature decreases. Thus the gap between the electron and gas temperatures decreases and the discharge plasma becomes more equilibrium.

According to measurements, if air is added to argon in concentrations of less than 30%, the ratio of the electron temperature to the gas temperature is within the range  $T_e/T \sim 2.7$  ... 3.2. Therefore, the gap between the electron and gas temperatures changes not more than 20 %.

Thus, the addition of molecular gas into atomic gas does not have such a significant effect on the characteristics of the plasma discharge as it was previously assumed.

#### 2.2. Determination of the electrical conductivity of the discharge plasma

If air is added to argon plasma, the length of the discharge channel decreases. Reducing of the discharge channel length is caused by a decrease in electrical conductivity of the plasma discharge, and accordingly, by an increase of the attenuation coefficient of the electromagnetic wave propagating along the discharge.

It is necessary to evaluate the electrical conductivity of the torch discharge plasma based on the measured values of the electron and gas temperatures. The high-frequency conductivity of the discharge plasma, which burns in the mixture of argon and air, will be determined by the ionization of argon atoms and by the ionization of molecules of nitrogen, oxygen, and their compounds. In the considered temperature range the mechanism of the electrons appearance is determined by the reaction of the argon ionization. The contribution of reactions, which involve nitrogen and oxygen compounds, is insignificant.

Considering small contribution of the air component in the processes of electrons creation, the conductivity of the torch discharge plasma, which burns in the mixture of air and argon, was evaluated based on the results of. The dependence of the specific conductivity of the plasma discharge on the air concentration in plasma gas is presented in Fig. 4.



Fig. 4. The dependence of the conductivity of the torch discharge plasma, which burns in the mixture of argon and air, on the air concentration.

It is necessary to evaluate the length of the discharge channel, which burns in the mixture of argon and air. According to "Transport properties of a twotemperature argon plasma", the length of the torch discharge channel can be estimated approximately as a reciprocal of the attenuation of the electromagnetic wave sustaining discharge burning. The attenuation coefficient is the imaginary part of the wave number, whIch magnitude is determined by the following formula:

$$h = \frac{1+i}{a\sqrt{5}}\sqrt{\frac{\omega\varepsilon_0}{\sigma}} \, ,$$

where *i* - the imaginary unit; *a* – the channel radius;  $\varepsilon_0$  – the absolute permittivity;  $\omega$  - the frequency of the electromagnetic field;  $\sigma$  – the conductivity of the plasma discharge.

The calculation results of the torch discharge channel length depending on the air concentration in the plasma gas are shown in Fig. 5. Also the experimental measurements results of the discharge channel length are represented.

As it can be seen from Fig. 5., the calculated value of the discharge channel length is smaller than the value obtained experimentally. This discrepancy is due to an approximate estimate of the discharge channel length as the reciprocal value of the attenuation coefficient of the electromagnetic wave.

The change in characteristics of the discharge argon plasma with adding air into it also causes the changes of the ratio between the active and reactive components of the electric power dissipated in the discharge. The obtained values of the discharge channel length and the discharge plasma conductivity can be used to evaluate the conversion of electromagnetic energy into thermal energy. Assessment calculations showed that the addition of 30% air to argon plasma of the torch discharge increases its efficiency by 20 ... 25%.



Fig. 5. The dependence of the channel length of the torch discharge, which burns in the mixture of argon and air, on the air concentration. 1 - calculation; 2 - experiment.

## CONCLUTIOH

As a result of the measurements it has been obtained that the addition of 30% of air to argon plasma of the torch discharge decreases the gap between the electron and gas temperatures by 20%. Consequently, the effect of additives of the molecular gas on the characteristics of the torch discharge, which burns in a monatomic gas, is not as significant as it was previously assumed. The greatest temperature change occurs at the air concentration of less than 10 %. The specific plasma conductivity of the torch discharge, which burns in the mixture of argon and air, and the length of its channel have been evaluated. The satisfactory agreement between the calculated length of the discharge channel and its experimental value has been obtained.