

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

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки: 11.04.04 «Электроника и микроэлектроника»
Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование генерации импульсного электронного пучка в плазменном эмиттере на основе дугового разряда низкого давления

УДК 537.533:621.3.032.273:537.523.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ61	Проскурина Елена Александровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение материаловедения, Профессор	Коваль Николай Николаевич	Доктор технических наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение социально- гуманитарных наук, Доцент	Старикова Екатерина Васильевна	Кандидат философских наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение контроля и диагностики, Профессор	Ахмеджанов Рафик Равильевич	Доктор биологических наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение материаловедения, Профессор	Яковлев Виктор Юрьевич	Доктор физико- математических наук		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения
Универсальные компетенции	
P1	Способность <i>совершенствовать</i> и развивать свой <i>интеллектуальный и общекультурный уровень</i> , добиваться <i>нравственного и физического совершенствования</i> своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	Способность <i>использовать иностранный язык в профессиональной сфере</i> .
P3	Способность применять на практике <i>навыки и умения в организации</i> научно-исследовательских и производственных работ, в <i>управлении</i> коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности
P4	Способность использовать методологические основы <i>научного познания и творчества</i> , научную информацию в развитии отрасли, навыки проведения работ с использованием <i>современных информационных технологий</i> ; синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
P5	Способность применять <i>углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Способность <i>ставить и решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности
P7	Способность выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Способность выполнять инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Способность проводить <i>техничко-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Способность проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные</i> работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	Способность осваивать <i>новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Способность разрабатывать <i>рабочую проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; <i>составлять оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы

Министерство образования и науки Российской Федерации

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



Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки: 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ61	Проскуриной Елене Александровне

Тема работы:

Исследование генерации импульсного электронного пучка в плазменном эмиттере на основе дугового разряда низкого давления

Утверждена приказом директора (дата, номер) № 2279/с от 02.04.2018

Срок сдачи студентом выполненной работы: 14 июня 2018 года

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Плазменный источник электронов – Энергия электронов: 5 – 25 кВ, – Ток разряда: 100 – 500 А, – Длительность импульсов: 10 – 250 мкс, – Частота следования импульсов: 0,3 – 10 Гц, – Рабочее давление: $2,4 \cdot 10^{-2}$ – 0.8 Па
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	– Обзор литературы по теме ВКР; – описание источника электронов с плазменным эмиттером; – проведение экспериментов, расчетов; – экспериментальные результаты и их обсуждение;

	– расчеты ежемесячного расхода на проведение экспериментов и способы уменьшения затрат при сохранении качества получаемых результатов; – анализ вредных и опасных факторов на рабочем месте.
Перечень графического материала	Презентация в Microsoft PowerPoint
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Старикова Екатерина Васильевна
Социальная ответственность	Ахмеджанов Рафик Равильевич
Разделы, выполненные на иностранном языке	Парнюгин Александр Сергеевич
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: методика эксперимента и экспериментальное оборудование.	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	22 января 2018 г.
---	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение материаловедения, Профессор	Коваль Николай Николаевич	Доктор технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ61	Проскурина Елена Александровна		

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки: 11.04.04 «Электроника и микроэлектроника»
Уровень образования: магистратура
Отделение материаловедения
Период выполнения: 2017/2018 учебный год

Форма представления работы:

магистерская диссертация

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы: 05.06.2018 г.

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01/11/2016	Литературный обзор	25
29/05/17	Экспериментальная часть	35
15/04/18	Финансовый менеджмент	10
15/05/18	Социальная ответственность	10
27/04/18	Раздел, выполненный на английском языке	20
		<i>Сумма: 100 баллов</i>

Составил руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение материаловедения, Профессор	Коваль Николай Николаевич	Доктор технических наук		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение материаловедения, Профессор	Яковлев Виктор Юрьевич	Доктор физико-математических наук		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ61	Проскурина Елена Александровна

Школа	ИШНПТ	Отделение	Отделение материаловедения
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Электроника и наноэлектроника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объектом исследования является плазменный источник электронов на основе дугового разряда низкого давления. Исследования проводились в институте сильноточной электроники, лаборатория плазменной и эмиссионной электроники.</p> <p>Область применения: поверхностная обработка (полировка, упрочнение) металлов без образования микродефектов (микротрещин и микрократеров); плазменный источник позволяет уменьшить шероховатость поверхности, увеличить поверхностную микротвердость.</p>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации</p>	<p>Условия труда работающих характеризуются возможностью воздействия на них следующих вредных производственных факторов в соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – повышенный уровень шума <p>Уровень шума на рабочем месте составляет 70 дБ. В соответствии с ГОСТ 12.1.003–83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности, уровень шума и звукового давления не должен превышать не более 50 дБ. В лаборатории ПЭЭ для снижения воздействия шума используют коллективные средства защиты, удаленные отдельные звукоизолирующие комнаты с компрессором и индивидуальные – наушники. Также во время эксперимента персонал находится в пультовой комнате,</p>
---	---

<p>проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения). 	<p>огражденная металлической дверью, которая отделяет пультовую и помещение с установкой.</p> <ul style="list-style-type: none"> – неблагоприятные условия микроклимата Согласно СанПиНу 2.2.4.548-96 исследовательская работа относится к работе легкой физической нагрузки (категория Іб), микроклиматические условия на рабочих местах должны соответствовать следующим требованиям: в теплый сезон года температура воздуха в помещении – 20-21,9°С, относительная влажность воздуха – 15-75 %, скорость движения воздуха не превышает 0,3 м/сек; в холодный сезон года температура воздуха в помещении – 19–20,9°С, относительная влажность воздуха – 15-75 %, скорость движения воздуха не превышает 0,2 м/сек. – электромагнитное поле Энергетическая экспозиция излучения в диапазоне частот 30–300 МГц составляет 3 В/м согласно СанПиНу 2.2.4.1191-03. В соответствии с ГОСТ 12.4.120-83 Средства коллективной защиты от ионизирующих излучений для коллективной защиты установка находится в металлическом кожухе и персонал во время работы находится в пультовой за закрытой металлической дверью. Средствами защиты является экранирование, то есть во время работы установки персонал находится в пультовой. – недостаточная освещенность рабочего места Согласно СНиП 23-05-95 работа в лаборатории имеет разряд зрительной работы VIII а. Освещенность в лаборатории согласно нормам, СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 составляет 400 лк, достигается с помощью искусственного освещения, так как помещение находится на первом этаже и естественного освещения недостаточно. <p>Анализ опасных факторов производственной среды:</p> <p>повышенное значение напряжения до 400 кВ, электрический ток до 45 кА. Согласно ГОСТу 12.1.030–81 ССБТ. Защитное заземление, зануление. используют меры и средства защиты: выравнивание потенциалов, электрическое разделение сети, зануление, система защитных проводов, защитное заземление, защитное отключение и средства индивидуальной защиты;</p> <ul style="list-style-type: none"> – статическое электричество Основной опасностью при электризации различных материалов является возможность возникновения искрового разряда, как с диэлектрической наэлектризованной поверхности, так и с изолированного проводящего объекта. По ГОСТу 12.1.045–84 ССБТ.
---	---

	<p>Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля предупреждают созданием замкнутых контуров или перемычек для предотвращения образования статического электричества на элементах металлических конструкций, трубопроводах разного назначения. В качестве коллективной защиты используются электропроводящие полы, заземленные зоны или рабочие площадки, оборудование, трапы, а также средства индивидуальной защиты в виде антиэлектростатических халатов и обуви, с кожаной подошвой или подошвой из электропроводной резины для непрерывного снятия электростатических зарядов с человека.</p> <p>– повышенный уровень ионизирующих излучений При проведении экспериментов в помещении, где располагается установка, доза радиации не превышает 1 мкЗв в час (12 мЗв в год при 1200 рабочих часах). Во избежание облучения рентгеновским излучением при работе используется средство коллективной защиты: защищенное место от воздействий находится в пультовой, отделенной от установки металлической дверью, не пропускающих рентгеновское тормозное излучение в соответствии с документом СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности.</p>
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>Селитебная зона установки находится на территории лаборатории ПЭЭ.</p> <p>Воздействий на гидросферу и литосферу установка не оказывает, т.к. отсутствуют сбросы в гидросферу и литосферу. Установка «СОЛО» имеет систему охлаждения, в качестве охлаждающей жидкости используется техническая вода, то есть загрязнения воды и канализационных выбросов при работе не происходит. При работе ускорителя исключено загрязнение тяжелыми металлами, вредными химическими веществами. Т.к. никаких опасных веществ при проведении экспериментов не используются.</p> <p>Экологическая безопасность отражена в документе СанПиН 2.6.1.2573-10 "Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ".</p>

<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p>Возможные ЧС на объекте: пожар, короткое замыкание электрической цепи.</p> <p>В качестве наиболее типичной ситуации рассматривается пожар.</p> <p>Превентивные меры по предупреждению возгораний: следить за состоянием электрической проводки, не оставлять без присмотра включенные электронагревательные приборы (паяльник), не пользоваться без навыков горючими и легковоспламеняющимися жидкостями (ацетон, бензин). При возгорании в срочном порядке необходимо сообщить о пожаре по телефону 01, дать сигнал тревоги, принять меры по эвакуации людей. В срочном порядке покинуть помещение. При возможности приступить к устранению пожара с помощью имеющихся средств пожаротушения.</p>
<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Социальные гарантии, режим работы. Эффективный и безопасный труд возможен только в том случае, если производственные условия на рабочем месте отвечают всем требованиям стандартов в области охраны труда.</p>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение контроля и диагностики ИШНКБ, Профессор	Ахмеджанов Рафик Равильевич	Доктор биологических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ61	Проскурина Елена Александровна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ61	Проскуриной Елене Александровне

Инженерная школа	ИШНПТ	Отделение	Отделение материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроника и наноэлектроника

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	1. Стоимость ресурсов для исследования генерации импульсного электронного пучка в плазменном эмиттере.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	2. Нормы и нормативы расходования ресурсов
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Предпроектный анализ</i>	1. Составление карты сегментирования рынка 2. Анализ конкурентных технических решений 3. SWOT-анализ
2. <i>Планирование управления научно-исследовательского проекта</i>	2. Планирование научно-исследовательских работ: – структура работ в рамках научного исследования; – определение трудоемкости выполнения работ; – разработка графика проведения научного исследования; – бюджет научно-технического исследования (НТИ).

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>План-график проведения НИ</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент, отделение социально-гуманитарных наук	Старикова Екатерина Васильевна	Кандидат философских наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ61	Проскурина Елена Александровна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 125 страниц, рисунков 41, таблиц 24, 1 приложение.

Ключевые слова: источник электронов, плазменный катод, диагностика плазмы, потенциал плазмы, эмиссионный зонд.

Объектом исследования является плазменный источник интенсивного низкоэнергетического электронного пучка на основе дугового разряда низкого давления. Предметом исследований является распределение электрических потенциалов в разрядной ячейке в зависимости от изменения основных параметров электронного источника.

Цель данной диссертационной работы является определение потенциала плазмы в течение импульса тока разряда плазменного источника электронов с сеточной стабилизацией эмиссионной границы. В процессе выполнения магистерской диссертации были проведены экспериментальные исследования, с помощью сконструированного плоского зонда с охранным кольцом и эмиссионного зонда, разработка автоматического контроллера и блока накала зонда. Рассмотрены вопросы безопасности жизнедеятельности и охраны труда, произведены экономические расчеты. Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word. А обработка результатов были проведены в программе Microsoft Excel с использованием макросов на языке программирования VBA и в Origin 8 Pro.

Оглавление

Введение.....	15
1. Электронные источники с плазменным эмиттером	17
1.1. Электронный источник с плазменным катодом для генерации ленточного пучка в форвакуумном диапазоне давлений	17
1.2. Высокоэнергетичные источники электронов микросекундной и субмикросекундной длительности (ГЕЗА)	22
1.3. Источник НСЭП «РИТМ» с плазменным анодом на основе сильноточного отражательного разряда.....	25
1.4. Плазменный источник интенсивного низкоэнергетического электронного пучка на основе дугового разряда низкого давления «СОЛО»	30
2. Зондовые методы диагностики плазмы.....	36
2.1. Электрические зонды	38
2.1.1. Плоский зонд с охранным кольцом.....	39
2.1.2. Эмиссионный электрический зонд.....	40
2.2. Методика измерения параметров плазмы плоским зондом с охранным кольцом	41
2.3. Методика измерения параметров плазмы эмиссионным зондом.....	46
3. Методика эксперимента	49
3.1. Система измерения параметров плазмы плазменного источника электронов «СОЛО»	50
3.1.1. Контроль и измерение токов в цепях электронного источника	50
3.1.2. Контроль ускоряющего напряжения.....	51
3.1.3. Система газового питания электронного источника.....	52

3.1.4. Контроль импульсных сигналов в цепях электронного источника	
52	
3.2. Методика измерения плоским зондом с охранным кольцом.....	53
3.3. Методика измерения эмиссионным зондом	57
4. Результаты эксперимента.....	65
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	81
5.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	82
5.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	82
5.3. SWOT-анализ	85
5.4. План проекта	87
5.4.1. Структура работ в рамках научного исследования	87
5.5. Определение трудоемкости выполнения работ	88
5.6. Разработка графика проведения научного исследования	89
5.7. Бюджет научного исследования	93
5.7.1. Расчет материальных затрат НТИ	94
5.7.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	96
5.7.3. Основная заработная плата исполнителей темы.....	97
5.7.4. Дополнительная заработная плата исполнительной системы.....	100
5.7.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).	100
5.7.6. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	101
5.8. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	102

6. Социальная ответственность	107
6.1. Производственная безопасность	107
6.1.1. Анализ выявленных вредных факторов при проведении исследования:	107
6.1.2. Анализ выявленных опасных факторов при проведении исследования:	114
6.2. Экологическая безопасность	119
6.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	119
6.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. .	122
Список используемой литературы	124

Введение

В настоящее время низкоэнергетические субмиллисекундные электронные пучки с плазменным катодом активно применяются для модифицирования поверхности металлических и металлокерамических материалов, а также используются для исследований в этой области [1]. Модифицирование поверхности стали электронным пучком может включать в себя несколько технологических операций, например, предварительный нагрев, электронно-пучковую полировку, закалку, перемешивание в поверхностном слое покрытия со стальной основой. Каждая операция требует специфических параметров электронного пучка, которые, в общем случае, различны для разных марок стали. Плазменный источник электронов может работать в различных режимах обработки поверхностей металлов, так как параметры в плазменном источнике электронов с плазменным катодом на основе дугового или тлеющего разряда, и как правило для источников с сеточной стабилизацией границы плазмы источника можно варьировать независимо друг от друга. Следует развивать уже достигнутые параметры и расширять диапазоны основных рабочих характеристик.

В рамках магистерской диссертации было проведено исследование потенциала катодной плазмы в зависимости от параметров эмиттера, поскольку существует необходимость контролировать процессы плазменно-пучковой обработки для улучшения эксплуатационных свойств металлических и металлокерамических изделий. Поэтому важно контролировать такую характеристику разряда как потенциал плазмы, который позволяет понять физические процессы, происходящие в ней и прогнозировать ее свойства.

Для измерения потенциала плазмы существует целый ряд методик диагностики плазмы, подразделяющихся на бесконтактные (спектроскопическая, оптическая и термографическая) и контактные (зондовая, электромагнитная, болометрическая). Особое место среди перечисленных методов занимает зондовая диагностика плазмы,

предложенная Ленгмюром [2], которая, как и прочие контактные методы, не вносит возмущения в плазму. Однако возмущения локализуются в слоях плазмы, прилегающих к поверхности зонда, а параметры призондовой плазмы удается связать с ее объемными характеристиками. А поскольку зонд может выдержать ограниченный энергетический поток частиц, измерить им можно только низкотемпературную плазму. Важным преимуществом данного метода среди прочих является локальность измерений, простота используемой аппаратуры и возможность подбора конструкции зонда под особенности разряда.

Из множества известных конструкций зондов для измерения параметров низкотемпературной плазмы наиболее эффективными являются плоский зонд с охранным кольцом и «плавающий» эмиссионный зонд. Выбор плоского зонда с охранным кольцом, в сравнении с обычным плоским (зонд Ленгмюра) обусловлен тем, что его конструкция позволяет уменьшить влияние краевых эффектов. А эмиссионный плавающий зонд непосредственно, в пределах своей точности, указывает потенциал плазмы без последовательных измерений по точкам или обработки полученных данных. Благодаря этому эмиссионный зонд позволяет следить за изменениями потенциала плазмы вплоть до нижних частот ВЧ-диапазона.

Зная, как зависит потенциал плазмы от параметров разряда можно не только управлять параметрами разряда, но и модернизировать источник электронов под определенные задачи и применения.

Таким образом целью данной работы является определение потенциала плазмы в течение импульса тока разряда плазменного источника электронов с сеточной стабилизацией эмиссионной границы.

Важным требованием при эффективной плазменной обработке деталей является управление характеристиками газового разряда низкого давления. Для исследований разряда главные задачи состоят в определении распределения электрических потенциалов в разрядной ячейке, а также разработать методику и оборудование для измерения катодного потенциала.

1. Электронные источники с плазменным эмиттером

В настоящее время существуют различные источники электронов с плазменным эмиттером, которые используются для фундаментальных и прикладных задач, например, обработки материалов в вакууме, полировки металлов, модифицирования поверхности металлических изделий. Создание источников с плазменным катодом обусловлено преимуществами перед традиционно используемыми термоэмиссионными катодами, например, более высокая плотность эмиссионного тока, способность к импульсной эмиссии, более широкий диапазон давлений остаточного газа и ряд других. Важная особенность плазменного катода состоит в возможности отбора из плазмы практически всех электронов, генерируемых в разрядном промежутке. Это обуславливает высокую эффективность эмиттера электронов такого типа [3]. Далее в главе приводятся действующие плазменные источники для генерации электронного пучка, их конструкция и основные параметры, а также достоинства и недостатки.

1.1. Электронный источник с плазменным катодом для генерации ленточного пучка в форвакуумном диапазоне давлений

Задача генерации электронных пучков при повышенных давлениях важна с точки зрения разработки электронно-лучевых технологий для обработки проводящих материалов [4], синтеза различных функциональных покрытий [5], плазмохимических процессов [6] и т. д. В настоящее время форвакуумные электронные источники энергии [7] могут обеспечить эффективную генерацию электронных пучков при давлениях до 20 Па, когда воздух используется в качестве рабочего газа и до 30 Па при работе на гелии.

Физически предел рабочего давления форвакуумных электронных источников связан с конечной электрической прочностью (электрическим пробоем) ускоряющего промежутка. При давлениях газа выше 10 Па решающую роль в развитии пробоя играет высоковольтный тлеющий разряд [8], интенсивность которого в значительной степени определяет плотность

плазмы, образовавшейся в области переноса электронного пучка. Для расширения диапазона рабочих газов давление имеет первостепенное значение для обеспечения условий для снижения тока тлеющего разряда.

В плазменном источнике электронов, генерирующем цилиндрический электронный пучок в форвакуумном диапазоне давлений, применяется разряд с полым катодом [9, 10]. Схематичное изображение этого источника представлено на рисунке 1. [11].

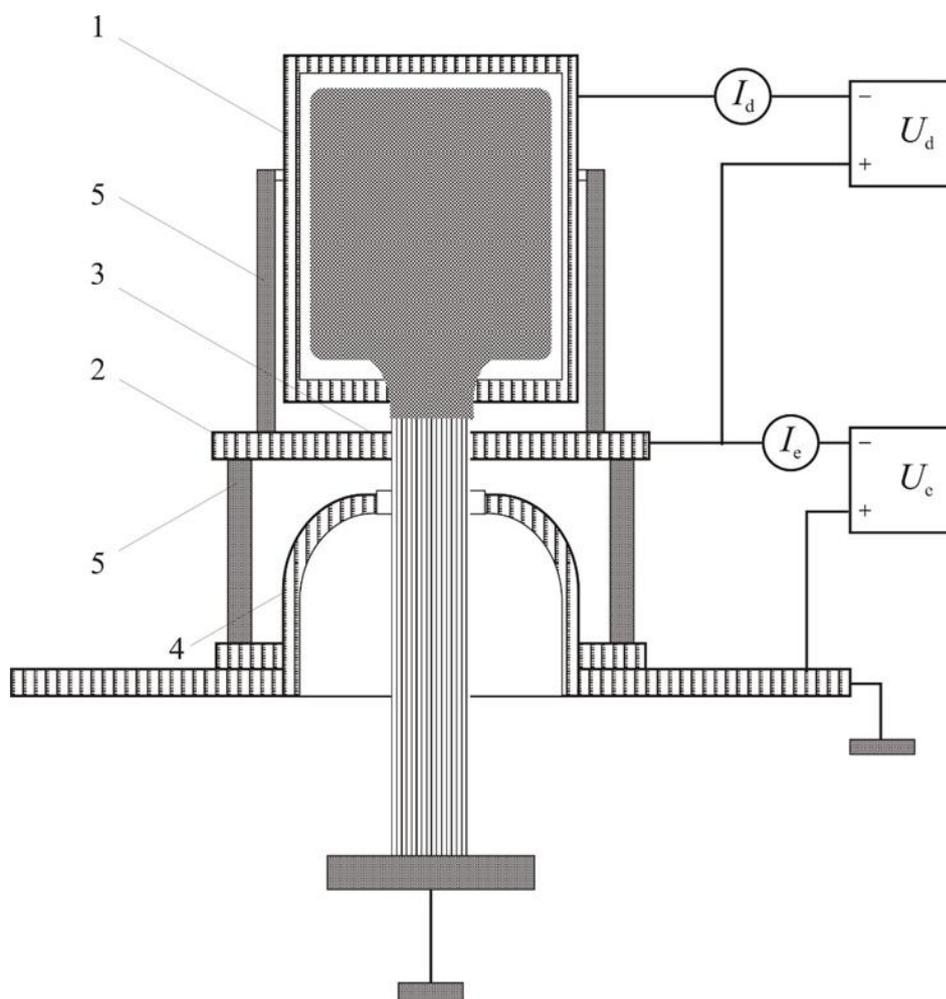


Рисунок 1 – Электронный источник на основе разряда с полым катодом для генерации пучка в форвакуумном диапазоне давлений: 1 – полый катод, 2 – анод (эмиссионный электрод), 3 – эмиссионное отверстие, 4 – ускоряющий электрод, 5 – керамические изоляторы

Конфигурация данной разрядной системы представляет собой полый медный катод 1 (диаметром 50 мм и длиной 100 мм) и плоский анод 2 – из

нержавеющей стали. В торце полого катода, обращенного к аноду, выполнено центральное отверстие диаметром 16 мм. Такое же отверстие 3 выполнено и в аноде, но оно дополнительно было перекрыто мелкоструктурной вольфрамовой сеткой с размером элементарной ячейки 0.5×0.5 мм² при диаметре проволоочки 50 мкм. Для увеличения ресурса источника сетка заменяется танталовой пластиной толщиной 0.5 мм с перфорированными отверстиями диаметром 0.8 мм. Ускоряющий электрод 4 с центральным отверстием, равным отверстию в аноде, также выполнен из нержавеющей стали и удален на 10 мм от анода. В конструкции источника использованы стандартные керамические изоляторы 5. Рабочий газ (азот, аргон, метан и др.) напускается непосредственно в вакуумную камеру, поэтому давление в разрядном и ускоряющем промежутках является одинаковым. Разрядная камера охлаждается принудительным воздушным потоком или проточной водой. Для транспортировки электронного пучка используется магнитное поле до 100 мТл, создаваемое соленоидом. Фотография деталей и узлов источника представлена на рисунке 2.

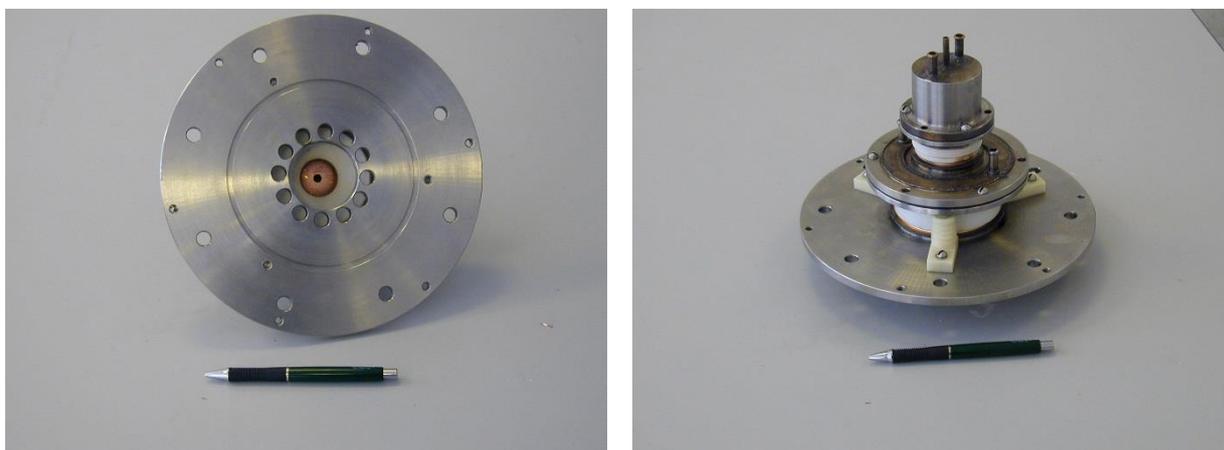


Рисунок 2 – Фотографии разрядной камеры плазменного источника электронов, генерирующего пучок в форвакуумной области давлений

Вольтамперная характеристика источника представлена на рисунке 3.

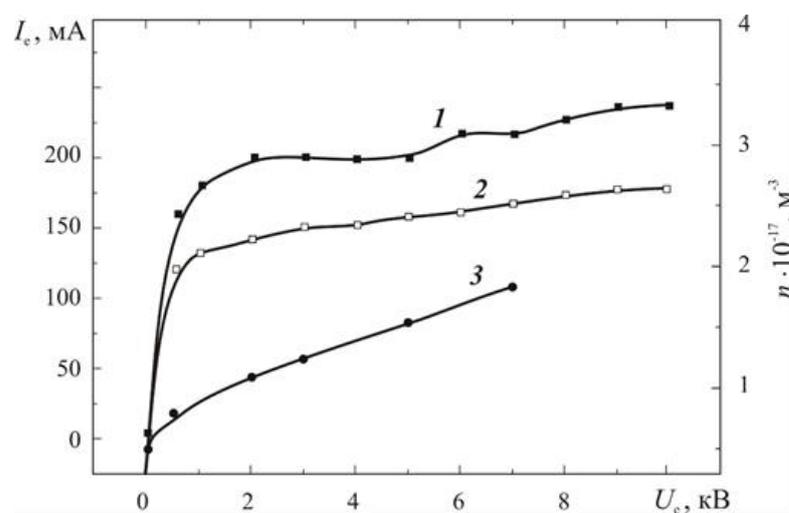


Рисунок 3 – Вольтамперные характеристики источника (1,2) и зависимость концентрации плазмы от ускоряющего напряжения (3). Давление газа (воздуха) 5,3 Па (1) и 3,3 Па (2,3)

Данная вольтамперная характеристика имеет две характерные области: участок резкого роста тока при малых ускоряющих напряжениях и участок слабого роста, близкого к насыщению. При ускоряющем напряжении до 10 кВ созданный источник обеспечивает ток до 1 А в области давлений вплоть до 100 мТорр.

Возможность получения электронных пучков в форвакуумном диапазоне давлений обусловлена сочетанием разряда с полым катодом для эффективной генерации эмиссионной плазмы с плоскопараллельной ускоряющей системой, в которой из-за быстрого пролета ускоренных электронов вероятность образования ионов и инициирование ими пробоя ускоряющего промежутка, даже в области повышенных давлений, мала. Важным, в данной случае, является экранирование области генерации плазмы от проникновения ускоряющего поля, которое достигалась использованием сетки или перфорированного электрода с малыми размерами отверстий. И, наконец, для предотвращения пробоев по периферии изоляторов в ускоряющем промежутке размещались специальные экранирующие керамические электроды.

На рисунке 4 показана зависимость максимального тока разряда I_{dm} , выше которого происходит электрический пробой ускоряющего зазора на ускоряющем напряжении U_a .

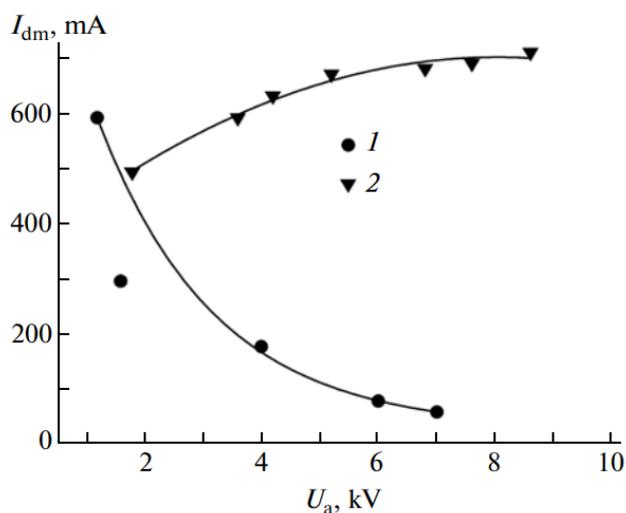


Рисунок 4 – Графики порогового тока разряда I_{dm} против ускоряющего напряжения U_a для источника, заполненного воздухом при (1) 100 Па и (2) 27 Па

Как видно, характер кривой $I_{dm}(U_a)$ определяется давлением рабочего газа. В интервале давлений в пределах 20-50 Па значение I_{dm} увеличивается с U_a , тогда как при повышенных давлениях пороговый ток пробоя падает с увеличением U_a . Эта разница в поведении $I_{dm}(U_a)$, связана с различными механизмами электрического пробоя в различных интервалах газового давления. При низких давлениях происходит плазменный пробой, согласно которому плазма проникает из области разряда в ускоряющий зазор. При повышенных давлениях преобладает влияние обратного потока ионов из плазмы, что приводит к появлению катодных пятен на излучающем электроде. Сдвиг давления, при котором последний механизм работает, к более высоким значениям по сравнению с наблюдаемыми ранее [12], связан с модификацией электродной системы, которая обеспечивала резкое уменьшение тока НГД.

Также стоит отметить, что основной отличительной чертой плазменных источников в форвакуумном диапазоне давлений является влияние обратного потока электронов на функционирование этих устройств. Поток ионов

образуется за счет ионизации газа в области транспортировки ускоренного электронного пучка. Направление движения ионов противоположно направлению движения электронов пучка, что позволяет применять в данном случае термин «обратный поток». Заметный вклад в обратный ионный поток вносят и ионы высоковольтного тлеющего разряда, который зажигается в ускоряющей промежутке источника при повышенных давлениях [13]. В результате ионно-электронной эмиссии с электродов источника генерируются дополнительные электроны, которые также ускоряются полным приложенным напряжением и в этом смысле неотличимы от электронов, эмитированных из плазмы основного тлеющего разряда. Наличие обратного ионного потока может быть полезным для инициирования разряда в форвакуумных электронных источниках [14]. Но в целом поток обратных ионов представляет собой основной фактор, ограничивающий предельные параметры форвакуумных плазменных источников электронов.

1.2. Высокоэнергетичные источники электронов микросекундной и субмикросекундной длительности (ГЕЗА)

Установка ГЕЗА была разработана и изготовлена в институте им. Ефремова и предназначена для обработки поверхности различных материалов короткими импульсами мощного электронного пучка. Согласно предложенному в [15, 16] методу, энергия, переносимая пучком и осажденная в поверхностном слое мишени, должна быть достаточной для плавления, но не для испарения этого слоя. В виду длительности импульса основной объем мишени остается холодным, а после окончания импульса температура поверхности падает очень быстро, что обеспечивает очень высокую скорость рекристаллизации в плавленной зоне. Это приводит к значительному улучшению поверхностных свойств облученной мишени, таких как усталостная прочность, износостойкость и коррозионная стойкость и т. д. В каждом случае наилучшие результаты достигаются в сравнительно узком диапазоне параметров облучения, что накладывает строгие требования на их

управляемость и однородность. В то же время требования к энергии пучка и сжатию также довольно высоки. Электрическая схема установки ГЕЗА-2, которая пришла на смену установке ГЕЗА-1, сходна с ней по строению, но имеет несколько более совершенные характеристики (таблица 1).

Основные составные части данных установок следующие: инжектор электронов триодного типа с многоострийным взрывоэмиссионным катодом, канал транспортировки, камера обработки, магнитная система, высоковольтный генератор, устройство контроля длительности импульса, вакуумная система, стойка управления, радиационная защита и механическая опора. Схема установки ГЕЗА приведена на рисунке 5, а основные характеристики в таблице 1 [17].

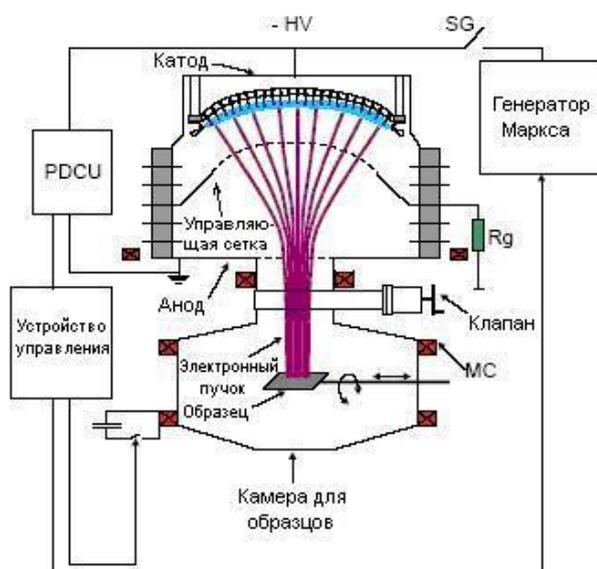


Рисунок 5 – Схема установки ГЕЗА

Таблица 1– Параметры установки ГЕЗА-1 и ГЕЗА-2

Параметры	ГЕЗА-1	ГЕЗА-2
Ускоряющее напряжение, кВ	50 – 150	200 – 400
Плотность мощности, МВт/см ²	до 2	до 6
Диаметр пучка на мишени, см	5 – 10	4 – 6
Длительность импульса, мкс	4 – 40	5 – 250

Представленная установка позволяет получать пучки с кинетической энергией электронов 50 – 400 кэВ, токами 200 – 500 А, длительностью импульса 5 – 250 мкс и максимальной плотностью мощности и энергии у подложки 6 МВт/см² и 500 Дж/см² соответственно. Пучок формируется в электронном источнике триодного типа с многоострийным взрывоэмиссионным катодом с управляющим разрядом. Инжектор электронов включает в себя высоковольтный многоострийный взрывоэмиссионный катод и управляющую сетку (разрядный электрод). Управляющая сетка соединена с заземленным анодом через резистор, что позволяет, во-первых, контролировать величину тока электронного пучка в определенных пределах без изменения кинетической энергии электронов на выходе инжектора, во-вторых, создавать достаточно высокое электрическое поле у поверхности катода в начале импульса, необходимое для однородного возбуждения эмиссии электронов. Площадь эмиссионной поверхности катода ГЕЗА-1 – 700 см² (рисунок 6).

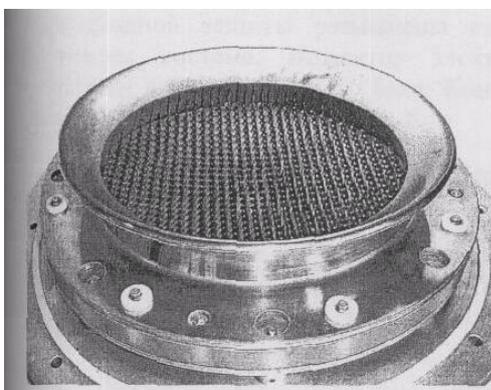


Рисунок 6 – Фотография многоострийного взрывоэмиссионного катода установки ГЕЗА

Принцип работы источника заключается в следующем: ускоряющее напряжение подается на многоострийный взрывоэмиссионный катод. Это приводит к взрыву острий и формированию вакуумных дуговых разрядов между остриями и разрядным электродом. Плазма этих разрядов после

заполнения пространства между разрядным электродом и взрывоэмиссионным катодом является источником электронов, которые ускоряются в промежутке между разрядным электродом и анодом. Концентрация плазмы зависит от тока вспомогательного разряда, следовательно, меняя ток разряда, можно менять концентрацию плазмы и тем самым управлять плотностью тока электронного пучка. До появления электронного тока напряжение на промежутках катод-сетка и сетка-анод распределяется с учетом тока утечки электронов на сетку. В промежутке сетка-анод электроны ускоряются до энергии, соответствующей напряжению, приложенному к инжектору. Пучок электронов в этой области сжимается внешним магнитным полем. Магнитная система, состоящая из шести катушек, обеспечивает формирование, транспортировку и регулировку диаметра пучка в пределах 6-10 см. Затем он транспортируется к камере с образцами. Объем камеры обработки отделен от объема инжектора каналом диаметром 15 см и длиной 50 см, в котором расположен шиберный вентиль, который позволяет перемещать образцы без нарушения вакуумных условий в инжекторе и использовать различные камеры обработки. Давление остаточного газа в рабочем объеме порядка $10^{-3} - 10^{-2}$ Па [18].

Использование газоразрядной плазмы вместо эрозионной плазмы имеет целый ряд преимуществ. Параметры эрозионной плазмы более нестабильны, чем газоразрядной, из-за нестационарного характера эрозии в дуге. Кроме того, эрозия электродов и диэлектрика плазменных пушек существенно ограничивает их надежность и ресурс работы. Продукты эрозии могут загрязнять обрабатываемую мишень, а энергетические затраты на создание плазменного анода неоправданно велики.

1.3. Источник НСЭП «РИТМ» с плазменным анодом на основе сильноточного отражательного разряда

Для генерации широкоапертурных низкоэнергетических сильноточных

электронных пучков (НСЭП) используются электронные пушки с плазменным анодом и взрывоэмиссионным катодом, помещаемые во внешнее магнитное поле [19]. В разработке первых таких пушек [20] для формирования плазменного анода использовались искровые источники плазмы, причем как катоды искровых источников плазмы, так и взрывоэмиссионный катод изготавливались из графита или материалов на его основе. Кроме того, вакуум в электронной пушке создается с помощью паромасляного диффузионного насоса. В этом случае в процессе работы электроды пушки покрываются углеродсодержащими пленками. С одной стороны, наличие таких пленок повышает стабильность генерации пучка при относительно низких ускоряющих напряжениях, поскольку графитные материалы обеспечивают эффективное возбуждение взрывной электронной эмиссии в относительно невысоких (~ 300 кВ/см) электрических полях [21, 22]. С другой стороны, осаждение углеродсодержащих продуктов на обрабатываемую поверхность недопустимо, когда требуется обеспечить высокую чистоту процесса обработки.

В связи с этим была предложена электронная пушка, в которой плазменный анод в виде протяженного столба формируется из плазмы сильноточного отражательного разряда низкого давления в рабочем газе. Эксперименты показали, что такая пушка может генерировать НСЭП даже в условиях безмасляной откачки и с использованием металлических взрывоэмиссионных катодов и, тем самым, обеспечивать более чистые технологические условия. Блок-схема источника приведена на рисунок 7.

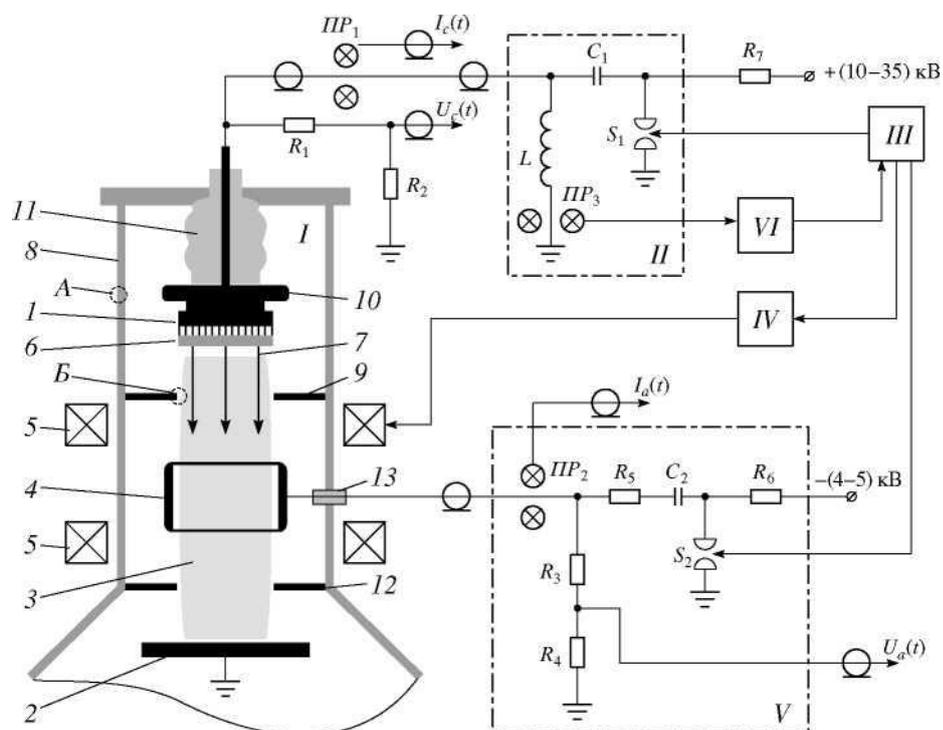


Рисунок 7 – Блок-схема источника НСЭП

Основными элементами источника являются электронная пушка, генератор импульсных напряжений, блоки электрического питания и управления, рабочая вакуумная камера с системами откачки и напуска рабочего газа. Система откачки на основе турбомолекулярного насоса обеспечивает достижение в рабочей камере остаточного давления не более 10^{-3} Па. Двухканальный натекатель СНА-2 обеспечивает стационарный напуск рабочего газа в вакуумную камеру (Ar, H₂) до давления $\sim 13 \cdot 10^{-2}$ –1,3 Па.

Процесс генерации НСЭП возникает между взрывоэмиссионным катодом 1 и коллектором пучка 2, с помощью отражательного разряда формируется плазменный столб 3. Катодами разряда являются катод пушки и коллектор пучка, анодом – электрод 4 в виде кольца, охватывающего плазменный столб. Для зажигания разряда в момент максимума импульсного магнитного поля ($H = 1 - 2$ Тл), создаваемого с помощью соленоида 5, на анод подается импульс напряжения амплитудой 4 – 5 кВ. В результате в ячейке зажигается высоковольтный слаботочный отражательный разряд. Через некоторое время (обычно через 10 – 20 мкс) разряд переходит в сильноточную

(880 – 400 А) низковольтную форму горения. При этом столб плазмы приобретает потенциал, близкий к потенциалу “земли”.

Еще через 20 – 50 мкс, когда столб становится более однородным, на катод пушки от ГИН подается импульс ускоряющего напряжения с фронтом 15 – 20 нс и амплитудой до 35 кВ. При этом электрическое поле сосредоточивается в прикатодном слое объемного заряда ионов, толщина которого существенно меньше расстояния катод-коллектор. В результате на катоде пушки возбуждается взрывная электронная эмиссия с образованием катодной плазмы 6. Поскольку катодная плазма приобретает потенциал, близкий к потенциалу катода, то практически все приложенное напряжение сосредоточивается в образующемся двойном электрическом слое 7 между катодной и анодной плазмами. В этом слое протекает биполярный поток заряженных частиц [23].

На стационарной стадии протекания тока плотности электронного и ионного токов в двойном слое связаны соотношением Ленгмюра [24]. Из данного соотношения видно, что при достаточной эмиссионной способности катодной плазмы плотность тока пучка и ее распределение по сечению определяются концентрацией анодной плазмы и ее радиальным профилем. Ускоренный в двойном слое пучок электронов транспортируется в столбе анодной плазмы до коллектора. Высокая (до ~90%) эффективность транспортировки обеспечивается нейтрализацией объемного заряда пучка ионами плазмы.

В описываемой электронной пушке магнитное поле обеспечивает не только формирование и транспортировку НСЭП, как и в пушках с искровыми источниками плазмы [25], но и зажигание отражательного разряда. Очевидно, что создание плазменного анода путем объемной ионизации рабочего газа в отражательном разряде обеспечивает лучшую чистоту процесса обработки по сравнению с генерацией анодной плазмы искровыми источниками.

Эмитирующая часть катода пушки изготовлена из медной оплетки

радиочастотного кабеля, свернутой в виде плоской спирали и закрепленной в обойме. После “подстригания” оплетки получается многоэмиттерный катод. Такие катоды просты в изготовлении и легко заменяются. Обойма катода и остальные металлические детали пушки изготовлены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Характерные размеры системы: диаметр эмитирующей части катода 6 см, внутренний диаметр анодного кольца 8 см, длина кольца 4 см, внутренний диаметр корпуса электронной пушки 20.6 см.

Для регистрации импульсов ускоряющего напряжения БС использовался резистивный делитель K_1, K_2 , соединенный с катододержателем (рисунок 7). Индуктивность катододержателя не превышает 20 нГн, что при максимальных для данного источника скоростях изменения тока в цепи катода искажает реальную величину напряжения на катоде не более чем на 1-2 кВ. Для измерения тока в цепи катода I_c использовался пояс Роговского ПР₁, а для измерения тока пучка на коллектор I_a использовался шунт сопротивлением 17 мОм. Для регистрации импульсов напряжения на аноде отражательного разряда U_a использовался резистивный делитель K_3, K_4 , тока в цепи анода $I_a(\Gamma)$ – пояс Роговского ПР₂. Регистрируемые сигналы поступали на входы двухканальных цифровых осциллографов Тектроникс ТБ8 220 с полосой пропускания 100 МГц. Для измерения полной энергии пучка и радиального распределения плотности энергии использовались калориметры на основе медных поглотителей и калиброванных терморезисторов КМТ-8. Качество пучка также оценивалось по его отпечаткам на металлических фольгах.

Обнаружен эффект накопления ионов в приосевой области пучка, обусловленный быстрым ростом концентрации инжектируемых электронов во времени (в течение всего импульса), что характерно для сильноточных электронных диодов. Это вызывает появление некомпенсированного отрицательного объемного заряда и, следовательно, радиального электрического поля (в нашем случае до десятков кВ/см) в канале транспортировки пучка, несмотря на присутствие в канале избыточной плазмы. Накопление ионов под действием радиального электрического поля в

приосевой области пучка, и, как следствие, увеличение его плотности тока (энергии) в этой области приводит к деформации даже исходно однородного распределения плотности тока. Компенсация этого негативного эффекта, осуществляется путем искусственного понижения концентрации плазмы в приосевой области по сравнению с периферийной областью.

Источник серии «Ритм» успешно используется в физико-технологических исследованиях, имеющих конечной целью повышение эксплуатационных характеристик различных видов изделий [26]. Сглаживание микрорельефа с одновременной очисткой поверхностного слоя электродов из нержавеющей стали путем их облучения НСЭП в режиме поверхностного плавления позволило получить рекордные значения импульсных пробивных электрических полей в вакууме (более 1 МВ/см для электродов площадью до 100 см² [27]).

Уникальное сочетание параметров пучка, простота инженерного решения и надежность источника НСЭП сделали его вполне пригодным для технологического использования. Относительно невысокое ускоряющее напряжение обеспечивает рентгенобезопасность источника при толщине стенок камеры (нержавеющая сталь) 4 мм.

1.4. Плазменный источник интенсивного низкоэнергетического электронного пучка на основе дугового разряда низкого давления «СОЛО»

Применение плазменного катода в импульсном источнике электронов дает ряд преимуществ: относительно высокая плотность тока по сравнению с термокатадами, более высокая длительность импульсов по сравнению с каскадами взрывчатого излучения, независимая регулировка параметров электронного пучка (длительность импульса, энергия электронов и ток пучка) и достаточно широкий диапазон их вариаций. Одним из таких источников является устройство серии «СОЛО» на основе плазменного катода с сеточной стабилизацией, которая послужила основой для ряда лабораторных установок,

предназначенных для развития процессов обработки поверхности материалов и изделий с помощью импульсного электронного пучка [28].

Основная геометрия разрядной системы изображена на рисунке 8.

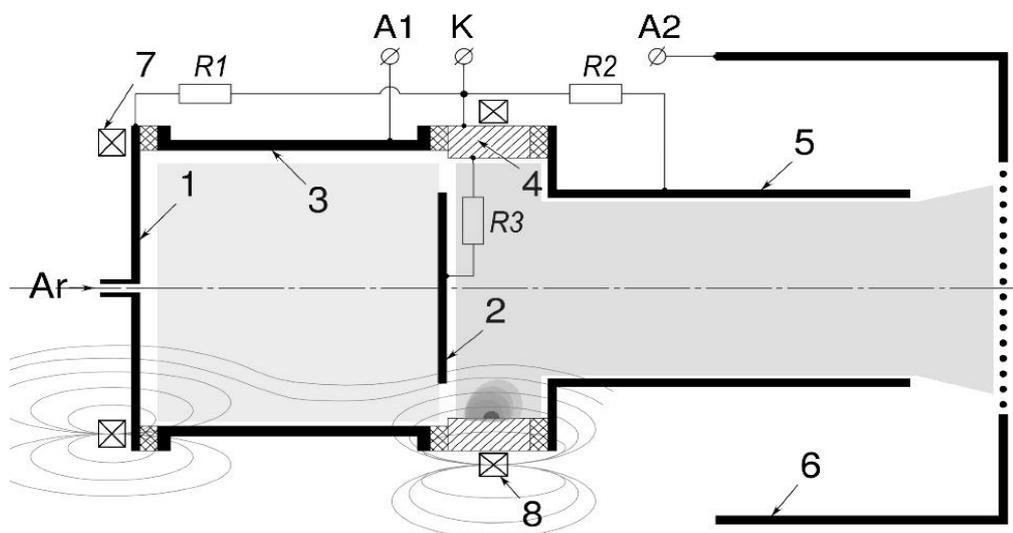


Рисунок 8 – Схема эмиттера с широкоапертурным катодом: 1 – катод-отражатель поджигающего разряда, 2 – диафрагма, 3 – инициирующий разряд, 4 – катодная вставка (силумин или магний), 5 – полый катод основного разряда, 6 – эмиссионный электрод с выходным отверстием, перекрытым сеткой (анод основного разряда)

Плазменный эмиттер работает следующим образом. Сначала зажигается инициирующий разряд в форме пенинговского тлеющего разряда. Эта форма разряда быстро (через 1 – 2 микросекунды) переходит в дуговой разряд с образованием катодного пятна на вставке 4 которая является катодом поджигающего разряда также как отражательный катод 1. Катодное пятно зажигается именно на вставке вследствие того, что она выполнена из легкоплавкого материала (использовались магний и силумин АК12), а катод 1 был выполнен из молибдена и соединен со вставкой через сопротивление $R=10$ Ом. После зажигания катодного пятна инициирующего разряда на этой же вставке зажигалось и катодное пятно основного разряда. Данные катодные пятна, стабилизируются магнитным полем постоянного магнита 8 и начинают быстро перемещаться по внутренней поверхности катодной вставки по

траектории близкой к окружности в области максимума магнитного поля, который находится примерно посередине катодной вставки. Электроны, эмиттированные из катодного пятна, осциллируют внутри катодной полости и ионизуют напускаемый в неё рабочий газ.

Наличие свободных электронов в области с повышенной концентрацией молекул рабочего газа обеспечивает зажигание и горение газового дугового разряда между полым катодом 5 и полым анодом 6. Продукты эрозии катода (микрокапли), а также металлические ионы, ускоренные в катодном пятне, оседают на внутренней поверхности катодной полости. Магнитное поле, создаваемое магнитом 8, кроме стабилизации положения катодных пятен создает дополнительные условия для более однородного «перемешивания» плазменных тепловых электронов и усиления ионизации за счет увеличения длины пробега быстрых электронов катодного пятна. Рабочий диапазон давлений в вакуумной камере составлял $p = (1 - 6) \times 10^{-2}$ Па (Ar). Амплитуда импульсов тока I_d может изменяться от 20 до 300 А, тем самым определяя амплитуду тока I_b пучка, образованного плазменным катодом.

Осциллограммы токов и напряжений для основного и иницирующего разрядов представлены на рисунке 9.

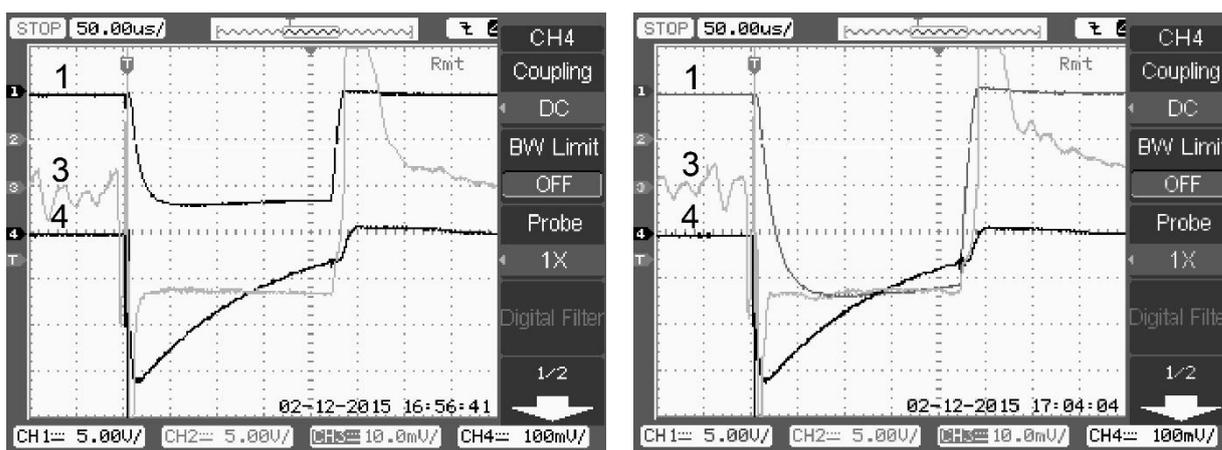


Рисунок 9 – Характерные осциллограммы основных цепей эмиттера для токов разряда 240 и 440 А. Луч «1» – ток основного разряда 100 А/дел, луч «3» – напряжение на разрядном промежутке 4 – 6 (рис. 7.) 20 В/дел, луч «4» – ток поджигающего разряда 2 А/дел. Развертка 50 мкс/дел.

Основными параметрами измерений являлись: напряжение горения основного разряда, которое соответствовало минимальным значениям для газового разряда на Ar ($\approx 40 - 45\text{В}$), ток разряда менялся в диапазоне от 20 до 500А, длительность импульса от 20 до 200 микросекунд. То есть вольтамперная характеристика разряда $U(I) \approx \text{const} \approx 45 \text{ В}$.

В качестве материала катодной вставки используется силумин. Силумин (12% кремния) был взят исходя из особенностей горения катодного пятна на композиционных материалах. Известно, что катодные пятна преимущественно формируются на границах разнородных материалов. В этом случае могут формироваться катодные пятна первого рода [9]. То есть образуется много независимых друг от друга маленьких катодных пятен, скорость перемещения которых высока, а вызываемая ими эрозия меньше. Для больших диаметров катодной вставки такое горение выглядит более предпочтительным с точки зрения однородности.

Оценка однородности горения катодного пятна по внутренней поверхности катодной вставки по трековой дорожке силумина. Была зафиксирована область преимущественного горения катодных пятен в максимуме магнитного поля арочной конфигурации, создаваемого магнитом 8. Для силуминовой вставки диаметром 55 мм после одного импульса (500 А, 200 мкс) трековые следы катодных пятен наблюдались равномерно по всему диаметру. Визуальные наблюдения для силумина при токе 40 – 70 А, длительности импульса 50 – 200 мкс на частоте до 10 Гц свечение плазмы на выходе из катодной полости эмиттера выглядело достаточно однородным. То есть на силумине горение дуги происходит на большом количестве быстро перемещающихся катодных пятен.

Распределение плотности энергии по сечению электронного пучка однородно. Были получены отпечатки оплавленной поверхности на титановой пластине диаметром 45 – 50 мм для тока 250 А, ускоряющего напряжения 20 – 25 кВ и длительности импульса 50 мкс. Отпечатки были получены при использовании в эмиттере выходной катодной полости диаметром 45 мм. При

этом оплавленная поверхность выглядела однородной по всей площади отпечатка (рисунок 10).

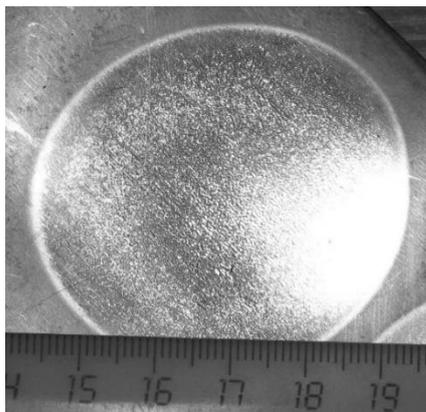


Рисунок 10 – Отпечаток электронного пучка

Эффективность вложения энергии электронного пучка в оплавленный отпечаток составила около 70% (отношение площади отпечатка к площади “идеального” отпечатка). Необходимо отметить, что при увеличении энергии пучка, например при увеличении тока пучка до 500А и/или длительности импульса (вплоть до 200 мкс) диаметр отпечатка практически не увеличивался в то время как плотность энергии в отпечатке росла. Это указывает на некоторую возможность управления профилем распределения плотности энергии по сечению пучка с помощью изменения диаметра выходной полости.

Соответствующий профиль распределения плотности энергии по сечению пучка показан на рисунке 11.

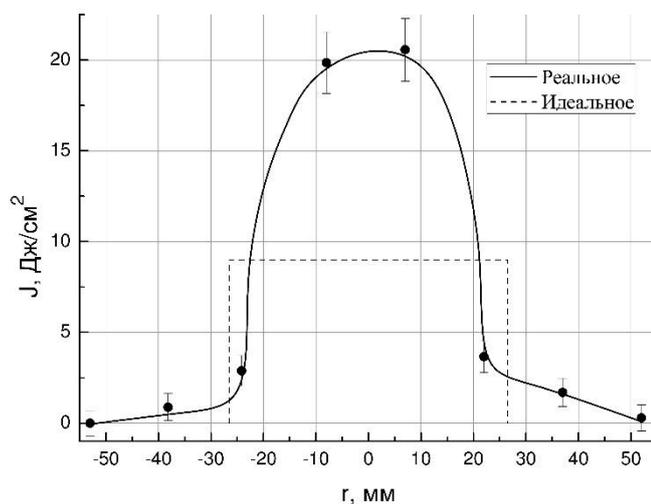


Рисунок 11 – Профиль распределения плотности энергии по сечению электронного пучка. Ускоряющее напряжение 20 кВ, ток разряда 250 А, длительность импульса тока 50 мкс

В ряду данных плазменных источников электронов, наиболее выгодным в наших исследованиях является плазменный источник интенсивного низкоэнергетического электронного пучка на основе дугового разряда низкого давления «СОЛО», данный источник является эффективным для модифицирования металлических образцов это следует из того обстоятельства, что исследуемый источник эффективен еще благодаря распределению плотности тока по сечению пучка, близкому к прямоугольному. Обычно металлические детали или изделия не требуют обработки всего объема изделия, а только рабочей поверхности, то есть источник «СОЛО» воздействует на приповерхностные слои материала (1 – 50 мкм). Основное назначение данного источника с плазменным эмиттером – это сглаживание микрорельефа путем оплавления поверхностного слоя деталей, изготовленных методами электроискровой обработки, точения, фрезерования, а также поверхностная модификация материалов путем импульсной закалки, формирование сплавов на поверхности, моделирование воздействия концентрированных потоков энергии.

2. Зондовые методы диагностики плазмы

Создание различных эффективных плазменных устройств, а также проведение фундаментальных исследований свойств газовых разрядов практически невозможно без четкого знания физических процессов, протекающих в таких устройствах. Эту информацию можно получить с помощью методов диагностики плазмы.

Характеристики плазмы подразделяются на макро- и микрохарактеристики. К макрохарактеристикам относятся конфигурация плазмы, давление, электрические характеристики, полное излучение, динамические характеристики и т. д. Они измеряются, как правило, прямыми методами, и интерпретация их результатов не вызывает обычно принципиальных затруднений и дает вполне однозначный ответ [29].

В фундаментальных исследованиях состояния плазмы подобные макрохарактеристики играют все же лишь вспомогательную роль, так как ее состояние однозначно характеризуется лишь комплексом локальных значений ряда микропараметров (концентрация заряженных и нейтральных частиц, функции распределения этих частиц по кинетическим и потенциальным энергиям и т. д.). Измерения концентраций частиц, распределений (или их параметров) и любых внешних факторов, оказывающих на них то или иное влияние, составляют основной предмет диагностики. Для определения величины микропараметров плазмы разработаны многие десятки методов диагностики. Однако, единственным на сегодняшний день общедоступным способом, позволяющим определять локальные параметры плазмы, являются зондовые методы.

На зонде в зависимости от конструкции и условий работы генерируется вторичный сигнал под воздействием плазмы, который несет информацию об объекте. Информацию получают из вторичного сигнала о соответствующих параметрах, которая зависит от модели зонда. То есть, точность и достоверность информации зависит от выбора модели зонда. Разработка моделей для разных типов зонда и разных условий работы продолжается.

Преимуществом использования зондовых контактных методов является локальность измерений, а главным недостатком – возмущение плазмы. Зонд может быть применим, если возмущение, вносимое им в плазму незначительное.

Несмотря на относительно большую погрешность, с помощью зондовых методов можно получить большое количество полезной информации, которой зачастую оказывается достаточно для описания исследуемого объекта. Внедрение вакуумно-плазменных технологий также подразумевает широкое применение зондовых методов для обеспечения простого контроля технологических процессов. Так что актуальность и необходимость зондовых методов диагностики плазмы в современной науке и технике не вызывает сомнений. Именно поэтому область применения зондовых методик, первоначально разработанных для исследования разреженной неизотермической плазмы, неуклонно расширяется в сторону исследования комплексных плазменных образований, находящихся в нестандартных условиях.

Активная поверхность зонда, потенциал и ее геометрия существенно влияют на физические процессы, протекающие в прилегающей к зонду области плазмы. Это важнейший нелинейный элемент зондовой электрической цепи.

В случае покоящейся плазмы с относительно малыми тепловыми потоками применяются неохлаждаемые зонды цилиндрической, плоской и, значительно реже, сферической геометрии, вводимые в заданную точку пространства. Размеры зондов выбирают малыми или большими в сравнении со средним пробегом частиц плазмы в зависимости от режима его работы. Длину цилиндрического зонда обычно выбирают на порядок больше его радиуса, с тем чтобы можно было пренебречь концевым эффектом. Проводник, соединяющий зонд с измерительной схемой, должен быть надежно изолирован от плазмы и не должен вносить заметных возмущений в нее. В случае высоких частот изменения потенциала на зонде проводник

должен обладать минимальной емкостью и индуктивностью и быть согласованным с измерительной цепью. Рабочая поверхность зонда должна быть тщательно очищена от оксидных пленок и загрязнений. Эффективно очистить поверхность можно непосредственно в плазме с помощью ионной бомбардировки. Для этой цели на зонд подается достаточно высокий отрицательный потенциал (меньше пробойного), проходя который, ионы плазмы ускоряются и бомбардируют поверхность зонда, очищая ее от загрязнений [30].

2.1. Электрические зонды

На данный момент существует достаточно большое разнообразие конструкций электрических зондов. Выбор формы зонда обусловлен тем, что камера разрядной ячейки ограничена габаритными размерами и нестационарным горением разряда в ней. Таким образом, наиболее эффективным и выгодным вариантом были плоский зонд с охранным кольцом и эмиссионный зонд. Эмиссионный зонд предпочли из-за малых возмущений, вносимых в плазму, а плоский зонд – так как по сравнению с цилиндрическим и сферическим электрическими зондами электронный ток стремительно выходил в насыщение, как изображено на вольтамперной характеристике (рисунок 12).

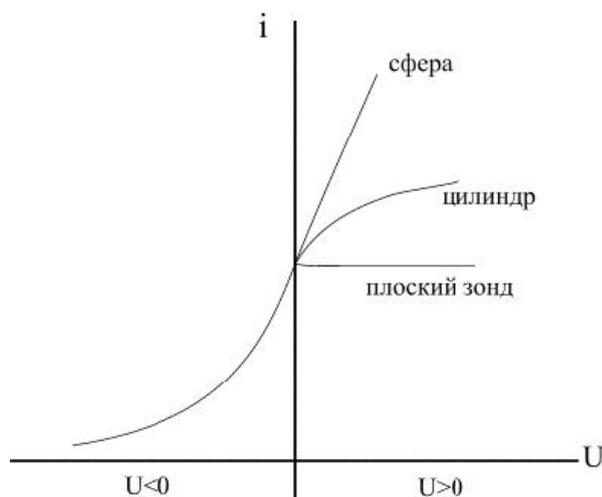


Рисунок 12 – ВАХ в зависимости от формы зонда

2.1.1. Плоский зонд с охранным кольцом

Теорию плоского зонда нельзя применить к плоскому зонду малых размеров из-за краевых эффектов. Даже при невысоких потенциалах зонда перед ним образуется слой, форма поверхности которого отклоняется от плоской. Вследствие этого ток зонда никогда не достигает насыщения, а увеличивается при больших потенциалах из-за одновременного увеличения поверхности слоя. Краевой эффект можно несколько уменьшить, используя зонд с охранным кольцом. Как показано на рисунке 13, такой зонд состоит из металлического диска и окружающего его концентрического кольца из того же материала.

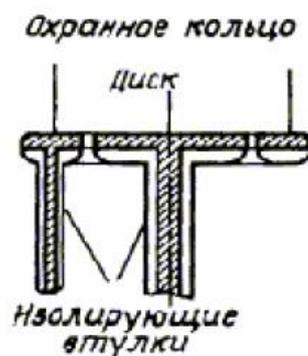


Рисунок 13 – Конструкция зонда с охранным кольцом

Измеряется только ток на диск, поверхность слоя перед которым приблизительно плоская. Во время измерения диск и кольцо поддерживаются при равных потенциалах, чтобы избежать искажения поверхности слоя между обеими частями зонда. Однако при больших потенциалах зонда частицы, проникающие в слой параллельно поверхности зонда, могут быть собраны диском, вновь вызывая небольшое увеличение тока зонда в области насыщения. Если потоки тепла из плазмы на зонд достаточно высоки, то необходимо сокращать время пребывания зонда в плазме.

2.1.2. Эмиссионный электрический зонд

Эмиссионный проволочный зонд, применяется в качестве диагностического инструмента для измерений потенциала плазмы и электронной температуры в широком диапазоне параметров плазмы.

Эмиссионный зонд изготавливается в виде небольшой проволочной петли, которая при пропускании тока может быть нагрета до температуры, достаточной для начала термоэмиссии. Температура накаливаемой проволоки должна быть такой, чтобы плотность термоэмиссионного тока была близка к тепловому току плазменных электронов или даже превосходила его. Тогда эффективная электронная температура плазмы вблизи зонда близка к его температуре, которая, в свою очередь (при больших плотностях эмиссионного тока), составляет десятые доли работы выхода электронов из материала проволоки, т.е. величину порядка $0,1\text{эВ}$. Измерив плавающий потенциал такого эмитирующего зонда, можно определить потенциал пространства с достаточно высокой точностью, поскольку отличие между ними $\approx 3T$ холодных эмитированных с зонда электронов [31]. Если зонд находится при большом положительном потенциале, то эмитируемые электроны снова притягиваются к зонду и эмиссия не оказывает существенного влияния на собираемый электронный ток. Наоборот, если зонд отрицателен относительно потенциала плазмы, то эмитируемые электроны будут уходить от зонда и увеличивать кажущийся ионный ток на зонд. Потенциал, при котором характеристики горячего и холодного зондов начинают различаться, есть потенциал плазмы.

Типичные зонды имеют конструкцию, показанную на рисунке 14.

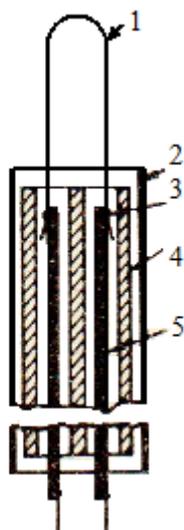


Рисунок 14 – Конструкция накаливаемого зонда: 1 — вольфрамовая проволока диаметром 0,025 мм; 2 — тонкостенная трубка из нержавеющей стали диаметром 3 мм; 3 — соединение точечной сваркой; 4 — керамический изолятор; 5 — никелевые стойки диаметром 0,5 мм

Эмитирующая нить имеет форму маленькой шпильки для волос, изготовленной из вольфрамовой проволоки диаметром от 0,025 до 0,05 мм. Она крепится к двум более толстым никелевым проволокам, установленным внутри двух полых керамических изоляторов и играющим роль токоподводов. Для электрической и механической экранировки вся система заключается в тонкостенную нержавеющую оболочку диаметром 3 мм, так что воздействию ионного потока подвергается только нагретый кончик вольфрамовой нити.

2.2. Методика измерения параметров плазмы плоским зондом с охранным кольцом

Работа заключается в определении токов, протекающих через зонд, и приложенных к нему напряжений – зондовой ВАХ. Схема измерений изображена на рисунке 15.

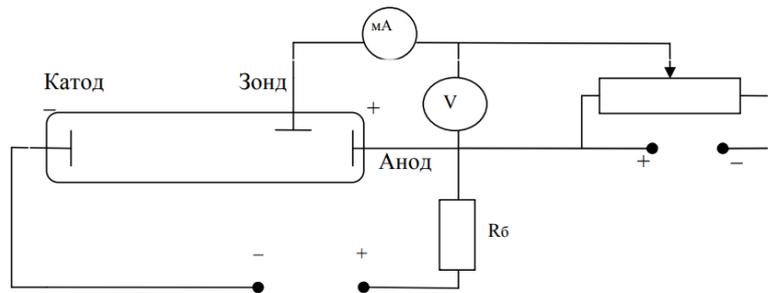


Рисунок 15 – Принципиальная схема измерений зондовой ВАХ

В данном случае зондовый ток замыкается через анод, поэтому полярность источника напряжения для зонда выбрана так, чтобы потенциал зонда был промежуточным между потенциалами анода и катода, как в плазме [32]. В схеме эксперимента по снятию характеристик плоского зонда в электрическую цепь газоразрядного прибора необходимо вводить балластное сопротивление для задания тока разряда и предотвращения выхода из строя прибора и источника напряжения. Ток разряда должен обеспечивать поддержание в приборе самостоятельного тлеющего разряда и формирование положительного столба разряда, плазма которого исследуется зондовым методом. Ток разряда выбирается из условия равенства величины плотности тока на электродах порядка $0,5 \text{ mA/cm}^2$.

Потенциал зонда складывается из двух величин: $U_3 = U_n + U$, где U – разность потенциалов между плазмой и зондом. ВАХ зонда, получаемый при варьировании величины U_3 , показана на рисунке 16.

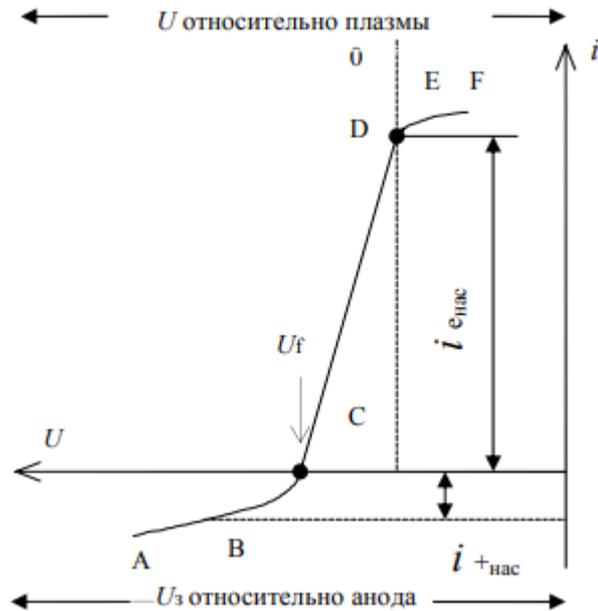


Рисунок 16 – Идеализированная зондовая ВАХ

Качественная интерпретация ВАХ заключается в следующем. При введении заряженного металлического тела – зонда в плазму (рисунок 17) происходит процесс поляризации.

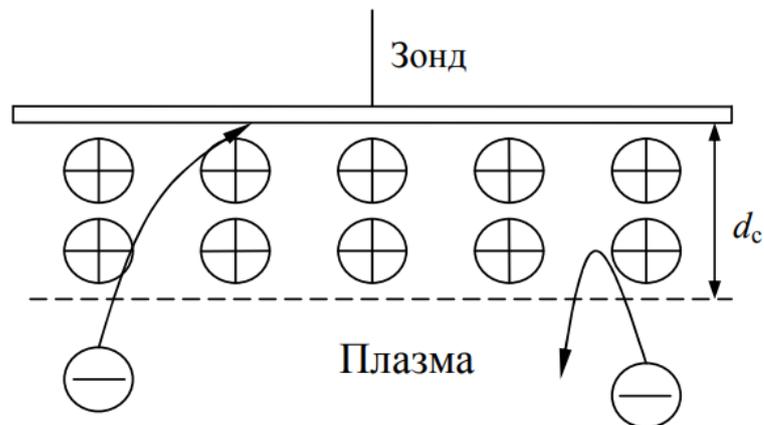


Рисунок 17 – Расположение зонда в плазме

Около зонда образуется слой ионов, общий заряд которых равен отрицательному заряду зонда. За пределами расположена невозмущенная плазма. Слой объемного заряда образуется движущимися ионами, которые дают ионную составляющую зондового тока. На зонд проникает и некоторое

количество быстрых, «энергичных», электронов, преодолевающих тормозящее поле перед зондом.

При большом отрицательном потенциале на зонде преобладает ток положительных ионов, определяемый параметрами плазмы и мало зависящий от потенциала зонда (рисунок 16, АВ). По мере уменьшения U_z , электроны будут падать на зонд во все возрастающем числе. В точке С собираемые зондом электроны компенсируют ионный ток, $I_z = 0$. В силу высокой энергетичности электронов плазмы выравнивание составляющих зондового тока происходит при некотором отрицательном потенциале U_f . Такой потенциал («плавающий») приобретает помещенное в плазму изолированное тело. При дальнейшем снижении U_z общий ток I_z резко увеличивается за счет электронной составляющей. В точке D электронный ток достигает максимума. Далее зависимость приобретает иную закономерность, что связано с изменением знака потенциала зонда относительно плазмы. Теперь ионы отталкиваются зондом, и в точке E ионный ток спадает до нуля. В области EF полный ток почти постоянен: зонд здесь собирает все доступные электроны.

Толщина объемного слоя d_c возрастает при увеличении приложенной разности потенциалов между зондом и плазмой. Поведение слоя очень похоже на действие вакуумного диода в режиме ограничения тока пространственным зарядом. В областях насыщения АВ и EF плотность тока на зонд будет описываться соотношением:

$$j = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{U^{3/2}}{d_c^2}, \quad (1)$$

называемым законом Чайлда-Ленгмюра или «законом трех вторых». Заряд e , масса m и температура T относятся к ионам или электронам в зависимости от ситуации. Это уравнение определяет значение d_c . Следует отметить, что данная теория применима к слою зонда в случае, когда d_c меньше средней длины свободного пробега частиц. Электроны и ионы движутся как в вакууме, без столкновений. Обычно это условие выполняется при $p < 13—133$ Па. Определить толщину слоя d_c можно визуально, так как в этом случае не

происходят возбуждение и ионизация атомов, и слой темнее окружающей его плазмы из-за отсутствия свечения возбуждения и рекомбинации.

Анализ ВАХ дает информацию о потенциале плазмы у зонда, температуре T_e и плотности n_e электронов.

На участке характеристики ВД электроны, достигающие зонда, должны преодолеть тормозящее поле. Для этого скорость электрона должна удовлетворять неравенству $mv_x^2/2 > eU$, где v_x – составляющая скорости по нормали к поверхности зонда. При максвелловском распределении скоростей электронов доля высокоэнергетичных частиц определяется выражением

$$(n_e)_U = n_e \exp(-eU / kT_e) \quad (2)$$

Отсюда получается, что плотность электронного тока на зонд, направленного против замедляющего потенциала U , выражается формулой:

$$j_e(U) = j_{e_{хаот}} \exp(-eU / kT_e), \quad (3)$$

где $j_{e_{хаот}}$ – плотность хаотического тока в плазме.

Домножая выражение для тока на площадь зонда S и логарифмируя, получаем:

$$\ln i_e = \ln i_e \cdot (-eU / kT_e), \quad (4)$$

Где i_e – ток электронов на зонд при условии, что зонд имеет отрицательный потенциал U (относительно плазмы; $i_{e_{нас}}$ – электронный ток насыщения через поверхность S . Ток i_e , достигает значения $i_{e_{нас}}$ в точке D, где $(U=0$. Таким образом, график зависимости $\ln i_e$ от напряжения на зонде на участке характеристики ВД должен быть прямой линией с наклоном e/kT_e (рисунок 18).

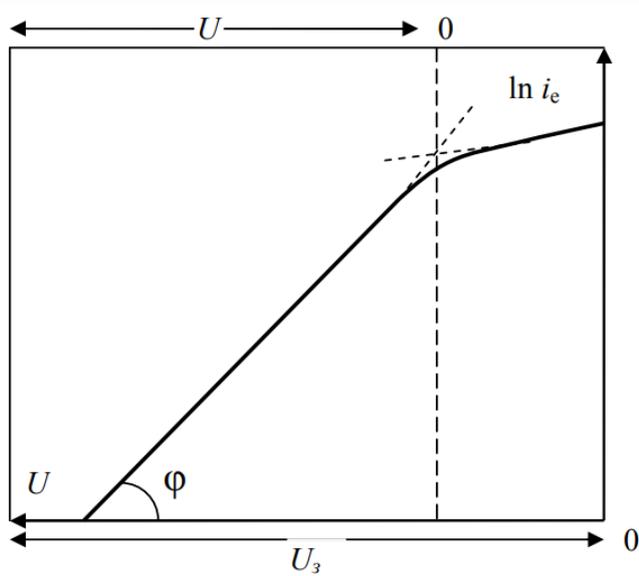


Рисунок 18 – Полулогарифмическая характеристика зондового тока

По логарифмическому графику определяется также потенциал плазмы. Тем самым можно определить по точке перегиба потенциал плазмы в точке, в которую введен зонд. Когда частица входит в слой со сравнительно высокой энергией, а ее траектория не проходит вблизи зонда, она не попадет на зонд, если он притягивает ее не слишком сильно. Поэтому ток зонда зависит от напряжения даже в тех областях, где плоский зонд принимает токи насыщения. Этот же механизм приводит к тому, что излом зависимости не всегда бывает достаточно резким для точного определения потенциала плазмы. В таких случаях за соответствующую точку принимают место пересечения продолжений прямолинейных участков (рисунок 18).

2.3. Методика измерения параметров плазмы эмиссионным зондом

Зачастую оказывается завышенным потенциал пространства вследствие возмущения плоским зондом окружающей плазмы, которое становится уже существенным в условиях собирания большого электронного тока. Для точного определения потенциала плазмы служит метод эмитирующих зондов.

Способ измерения потенциала пространства заключается в

использовании накаливаемого зонда под плавающим потенциалом, впервые предложенный в работе Кемпа и Селлена [28]. Здесь при увеличении тока эмиссии с изолированного эмиссионного зонда, его потенциал растет за счет ухода все большего и большего количества электронов, а затем выходит на насыщение. Потенциал, при котором характеристики горячего и холодного зондов начинают различаться, есть потенциал плазмы, как изображено на рисунке 19.

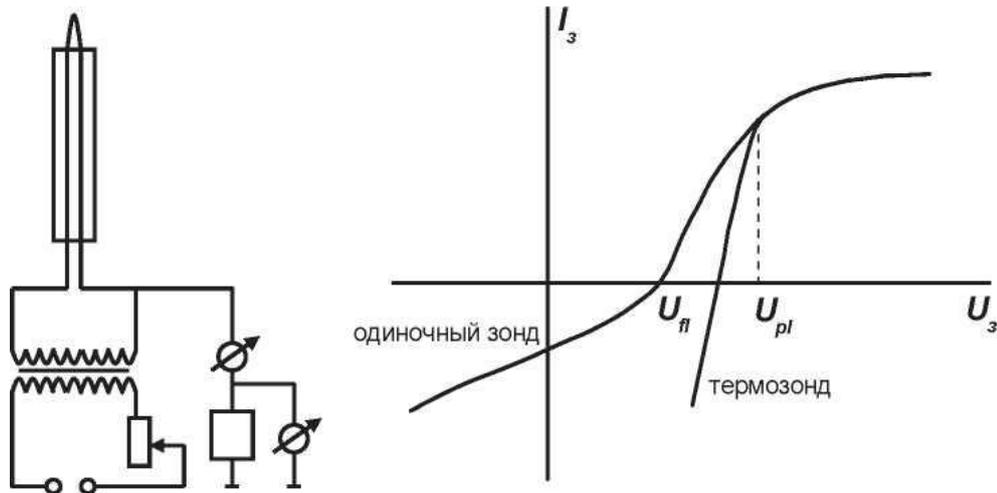


Рисунок 19 – Простейшая схема включения и вольтамперные характеристики

Напряжение выхода U_{fl} на насыщение принимают за значение U_{pl} . Однако, потенциальный барьер для эмитируемых электронов имеет величину порядка kT_0 , где T_0 – температура зонда, и равен обычно приблизительно 0,2 эВ. В случае плавающего зонда потенциальный барьер для плазменных электронов имеет порядок kT_e ; поскольку $T_e > T_0$, увеличение эмиссии не приближает существенно U_{fl} к U_{pl} . Другими словами, максимальный эмитируемый ток не может компенсировать собираемый ток, так как плазменные электроны имеют гораздо большие скорости. Таким образом, значения U_{pl} , определяемые данным методом, оказываются заниженными на величину порядка kT_e/e от реальных значений. Присутствие положительных ионов способствует компенсации объемного заряда, поэтому эмитируемый

ток в плазме значительно превышает ток эмиссии в вакууме.

Тем не менее, из-за своей простоты данный метод определения потенциала плазмы очень часто применяется в установках по исследованию управляемого термоядерного синтеза [29-30].

Для того, чтобы минимизировать влияние объемного заряда на измерения потенциала пространства была разработана более точная методика определения U_{pl} по точке перегиба ВАХ накаливаемого зонда в пределах нулевой эмиссии [31]. Поясняет этот метод рисунок 20.

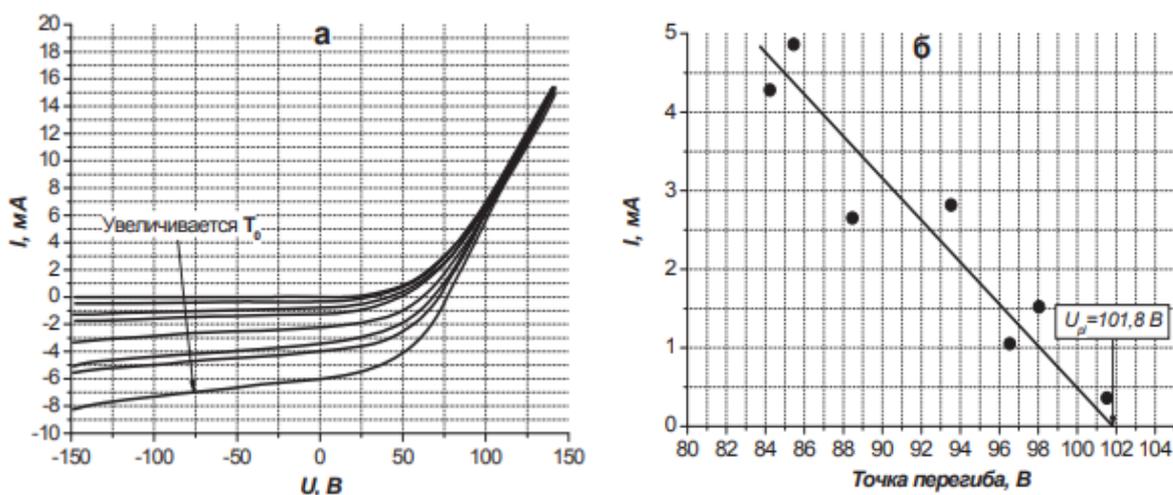


Рисунок 20 – Типичные вольт-амперные характеристики накаливаемого зонда (а) и соответствующие точки перегиба (б)

Если снять семейство ВАХ эмиссионного зонда при разных токах эмиссии (ток эмиссии не должен превышать электронный ток насыщения) и линейно экстраполировать точки перегиба в область нулевых значений тока эмиссии (как это показано прямой на рисунке 20 (б)), то влияние пространственного заряда на измеренное значение U_{pl} существенно уменьшается.

3. Методика эксперимента

В работе для определения потенциала катодной плазмы использовалась зондовая методика. Выбор данной методики связан с тем, что потенциал плазмы можно измерить только контактным методом. Преимущества зондового метода заключаются в том, что он позволяет проводить измерения локальных параметров плазмы, при этом зонд обладает относительно небольшими размерами (длина 5 – 12 см, диаметр 0,5 – 1 см), что удовлетворяет размерам ячейки.

Недостатками использования метода электрического зонда являются: высокая погрешность измерений (порядка 20 – 30%). Кроме того, существует ряд технических трудностей по обеспечению электромагнитной совместимости измерительных узлов системы зондовой диагностики плазмы с узлами электропитания импульсного источника электронов: импульсные помехи могут приводить к выходу из строя измерительных узлов, ошибочному срабатыванию систем синхронизации, искажению результатов измерения или «зашумлению» полезного сигнала, не позволяющему достоверно его выделить на уровне помехового фона. Усугубляет ситуацию то, что в стандартной конфигурации при обработке изделий электронным пучком последние находятся на заземленном манипуляторе, а электроды разрядной ячейки плазменного катода, в которой необходимо произвести измерения, находится под высоким ускоряющим потенциалом до 25 кВ относительно земли, что не позволяет произвести заземление измерительных узлов системы зондовой диагностики.

Данные недостатки не являются неисправимыми, их можно избежать, например, использованием клеток Фарадея, экранов, специальных схемотехнических решений, подбором топологии расположения токоведущих и сигнальных линий, применением защитных «срезающих» элементов, фильтров сигналов. Погрешность понижают также повышением объема выборки, то есть количества измерений при неизменных условиях, тщательной обработкой результатов эксперимента, если правильно

сконструировать зонд соблюдая все требования. А влияние помех при правильно построенной системе измерений минимально.

3.1. Система измерения параметров плазмы плазменного источника электронов «СОЛО»

3.1.1. Контроль и измерение токов в цепях электронного источника

Электронный источник, используемый в установке, генерирует импульсный электронный пучок микросекундной длительности. Контролировать и измерять параметры таких импульсных пучков (амплитуда тока, форма импульса тока) можно лишь при использовании осциллографа. В качестве датчиков тока для измерения тока инициирующего разряда, основного разряда, и полного тока пучка использовались пояса Роговского чувствительностью 50А/В, расположение которых отображается на рисунке 12.

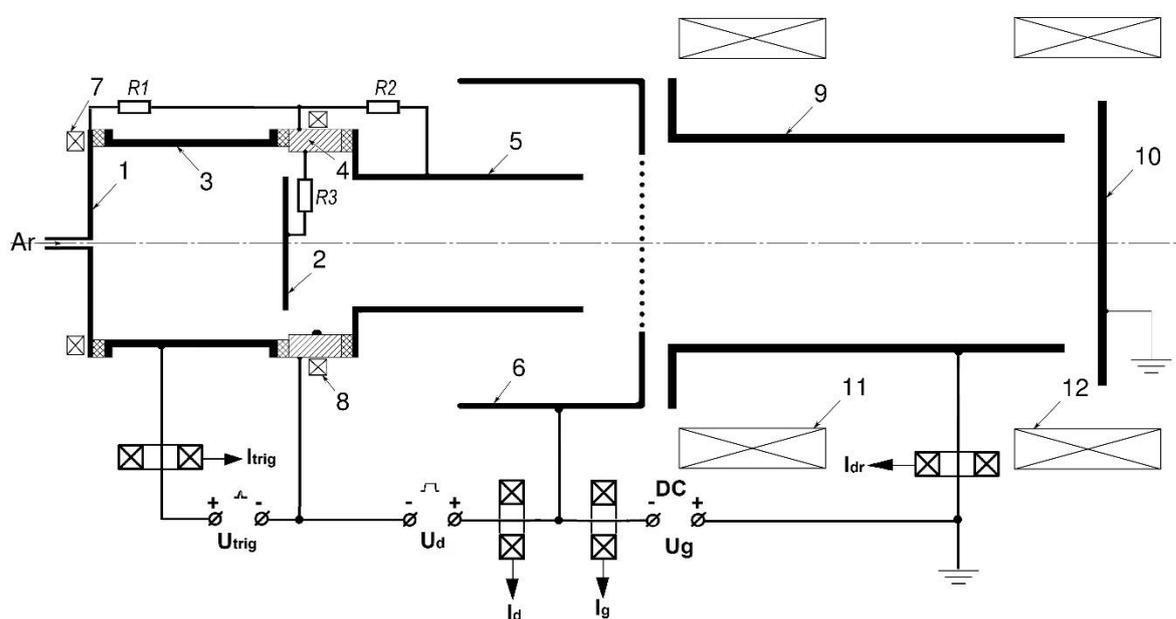


Рисунок 21 – Система измерения параметров плазмы: 1 – катод вспомогательного разряда, 2 – диафрагма, 3 – анод вспомогательного разряда, 4 – катодная вставка, 5 – полый катод основного разряда, 6 – эмиссионный электрод с выходным отверстием, перекрытым сеткой (анод основного разряда), 7, 8 – магниты, 9 – труба дрейфа, 10 – коллектор, 11,12

– катушки магнитного поля.

Ускоряющее напряжение измерялось с помощью резистивного делителя 1/10000 и высоковольтного щупа Актаком АСА-6039 1/1000. Для контроля токов в магнитных катушках используются датчики Холла. Все сигналы с датчиков выведены на разъемы, установленные на передней панели блоков питания электронного источника.

3.1.2. Контроль ускоряющего напряжения

В установке используется источник ускоряющего напряжения с накопительными емкостями (суммарная емкость около 6 мкФ), которые заряжаются между импульсами тока пучка до заданного напряжения. Напряжение на емкостях можно проконтролировать по индикатору, установленному на передней панели источника ускоряющего напряжения (индикатор установлен в стойке БП электронного источника). При выполнении работ по обслуживанию электронного источника отсутствие напряжения на высоковольтных емкостях контролируется по стрелочному вольтметру, установленному на блоке конденсаторов. Во время формирования импульса тока электронного пучка напряжение на накопительных конденсаторах уменьшается тем сильнее, чем больше была амплитуда и длительность тока пучка, согласно соотношению:

$$U_g(t) = U_0 - I(t)R - \frac{1}{C_0} \int_0^t I(\tau) d\tau \quad (5)$$

Осциллограмма напряжения на ускоряющем промежутке может быть получена расчетным путем. Исходными данными для расчета являются зарядное напряжение, осциллограмма тока пучка, величина суммарной емкости источника ускоряющего напряжения (6 мкФ) и величина балластного сопротивления ($R_6 \sim 1$ Ом). На один из контрольных разъемов стойки БП выведен сигнал с делителя напряжения, установленного в источнике ускоряющего напряжения. При контроле этого сигнала следует учитывать, что

делитель подключен на выход этого источника и, следовательно, истинное напряжение на ускоряющем промежутке электронного источника во время формирования тока пучка будет отличаться от сигнала с делителя на величину падения напряжения на балластном и зарядном сопротивлениях. Высоковольтный щуп измерял напряжение непосредственно на эмиссионном электроде.

3.1.3. Система газового питания электронного источника

Данная система состоит из газового баллона (Ar), газового редуктора, установленного на газовом баллоне, защитного редуктора РДФ-3 и газового дистанционно управляемого натекателя РРГ-10. Максимальный расход газа обеспечиваемый управляемым газовым натекателем при максимальном сигнале управления 5 В – не менее 0,9 л/час. Максимальное допустимое избыточное давление на входе натекателя РРГ-10 не должно превышать 0,3 МПа. Питание регулятора ± 15 В (ток не менее 0,2 А при пульсациях менее 20 мВ) формирование сигнала управления расходом газа (0 – 5В) и подача-снятие сигнала, обеспечивающего полное закрытие натекателя (-15В) при любом управляющем сигнале (0 – 5В) обеспечивается блоками стойки управления. Вход и выход натекателя РРГ-10 соединен с газовыми редукторами и электронной пушкой токонепроводящей толстостенной трубкой из черного полиэтилена. Внутри газовой трубки от натекателя до электронной пушки помещается кварцевый песок для предотвращения возникновения газового разряда по разряженному газу при подаче на электронную пушку ускоряющего напряжения.

3.1.4. Контроль импульсных сигналов в цепях электронного источника

Контроль импульсных сигналов может производиться с помощью USB-осциллографа входящего в состав стенда. В этом случае измерения проводятся

в специальном окне управляющей программы. Также для контроля может использоваться запоминающий осциллограф. Для сохранения данных использовали функции драйвера Ultra Sigma и среду VBA создали скрипт, который получает данные с осциллографа Rigol DS1052 удаленно через оптоволоконный кабель на персональном компьютере, расположенным внутри пульта дистанционного управления энергокомплекса «СОЛО». Сохраняли данные тока разряда и напряжения измерения в CSV формате на четырехлучевом осциллографе Agilent DSO1102B. Управление всеми режимами установки производились с консоли оператора (экран ПК).

3.2. Методика измерения плоским зондом с охранным кольцом

Система измерения потенциала плазмы включает в себя: плоский зонд, блок смещения зонда, осциллограф и систему синхронизации. Плоский зонд подключали по схеме, изображенной на рисунке 22.

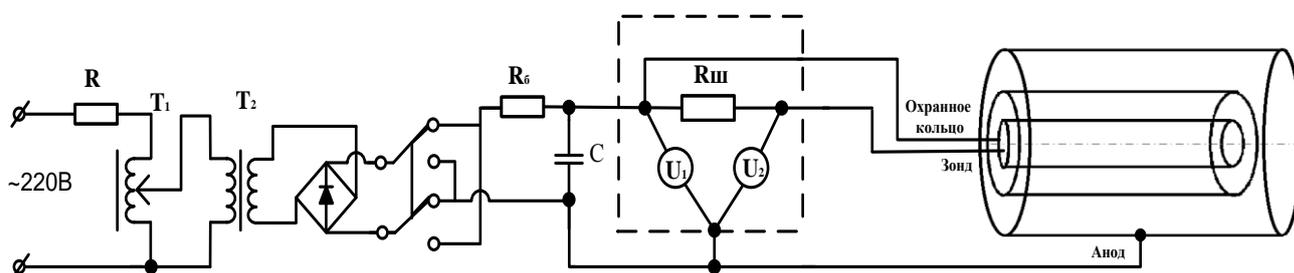
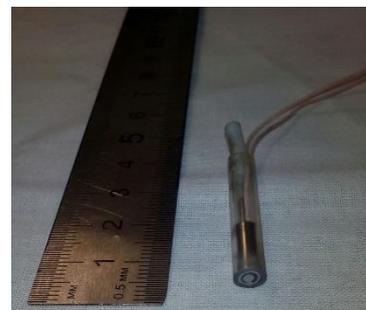
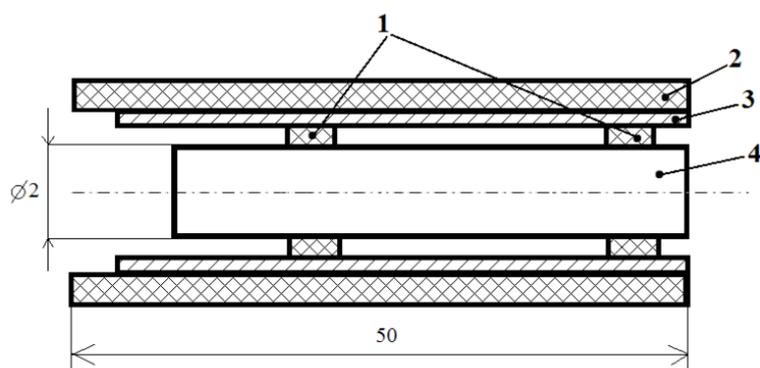


Рисунок 22 – Схема эксперимента по подключению плоского зонда с охранным кольцом в плазменный источник

Изготавливали плоский электрический зонд с охранным кольцом таким образом: центральная – собирающая часть зонда **4** (рисунок 23) имеет форму цилиндра длиной 50 мм, диаметром 2 мм, изготовлена из нержавеющей стали 12X18Н10Т. При этом рабочей поверхностью является только торец этого цилиндра [33]. Центральная часть расположена внутри трубки из нержавеющей стали, играющей роль охрannого кольца **3**. Изоляция зонда от охрannого кольца произведена с помощью стеклянных вставок в виде сегментов колец **1**. Конструкция помещена внутрь стеклянного кожуха **2**,

чтобы вносить меньше возмущений в плазму дугового разряда и уменьшить величину тока в цепи охранного кольца. Зонд крепили внутри разрядной ячейки на направляющей оснастке из нержавеющей стали через фторопластовую втулку.

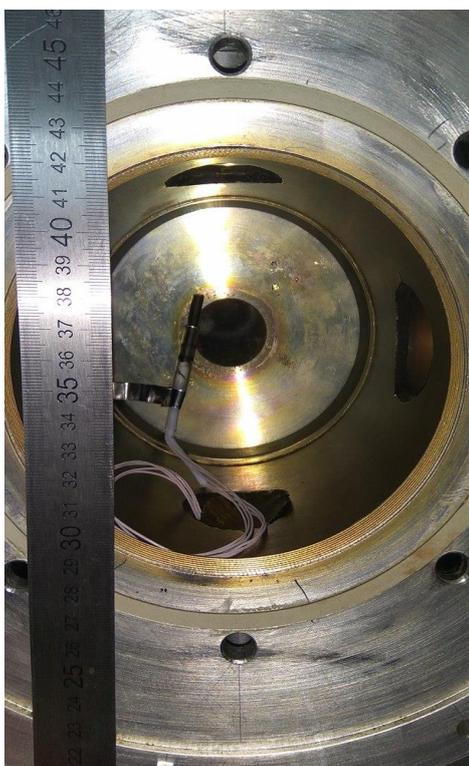


а)

б)

Рисунок 23 – Плоский зонд с охранным кольцом: а) конструкция:
1 – стеклянные диэлектрические кольца; 2 – стеклянный кожух; 3 –
охранное кольцо; 4 – цилиндрический стальной собирающий проводник;
б) внешний вид

В проведенных исследованиях зонд устанавливали сбоку от выходного отверстия плазменного катода и в центре разрядной ячейки, то есть собирающая поверхность зонда была расположена на оси симметрии разряда как изображено на рисунке 24.



а)



б)

Рисунок 24 – Размещение зонда в разрядной ячейке: а) сбоку; б) по центру

Методика эксперимента основывается на методике измерения плоским зондом с охранным кольцом. Измеряли потенциал плазмы плоским зондом с охранным кольцом при ускоряющем напряжении равном 14кВ и без ускоряющего напряжения посредством метода точки перегиба электронной ветви ВАХ, как указано в литературном обзоре во второй главе.

Обработка данных производилась в программах Microsoft Excel с использованием макросов на языке программирования VBA и в Origin 8 Pro.

Произвели анализ ВАХ зонда на 150 мкс с момента начала импульса основного разряда (рисунок 25).

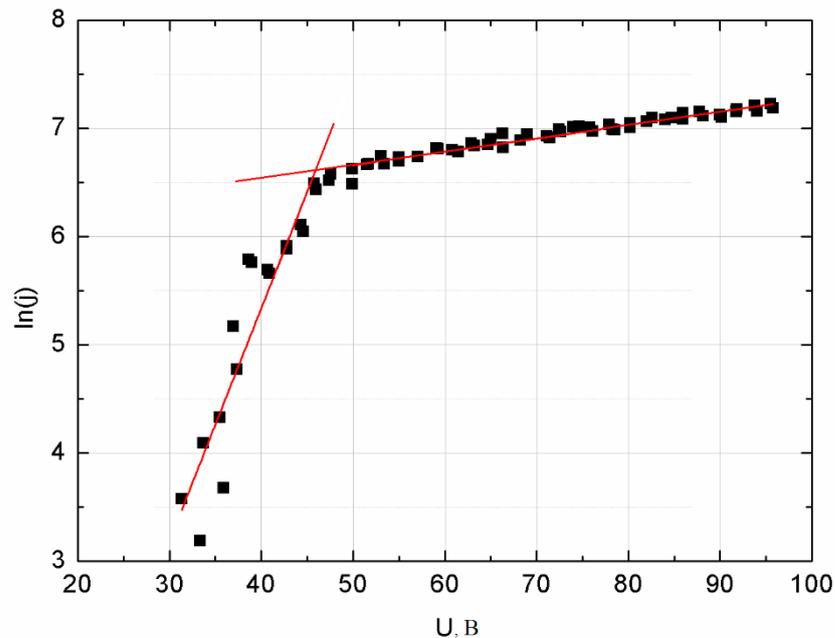


Рисунок 25 – Зависимость логарифма плотности тока от напряжения на зонд

Точка перегиба – это точка, в которой разность потенциалов между зондом и плазмой равна нулю, т. е. наиболее достоверное значение потенциала плазмы в точке перегиба зондовой характеристики.

Точка пересечения была получена путем аппроксимации линейных участков электронной ветви ВАХ в логарифмическом масштабе. Достоверное значение потенциала плазмы без включения в электрическую цепь ускоряющего напряжения рассчитано в соответствии с решением системы уравнений аппроксимированных участков электронной ветви ВАХ. После определения точки пересечения на графике визуально на логарифмической зависимости и расчетов сравниваем полученные значения потенциала плазмы дугового разряда.

Уравнения прямых преобразуем в линейный масштаб и накладываем на ВАХ, для уточнения полученной аппроксимации (рисунок 26). Полученные результаты по измерению отображены на ВАХ.

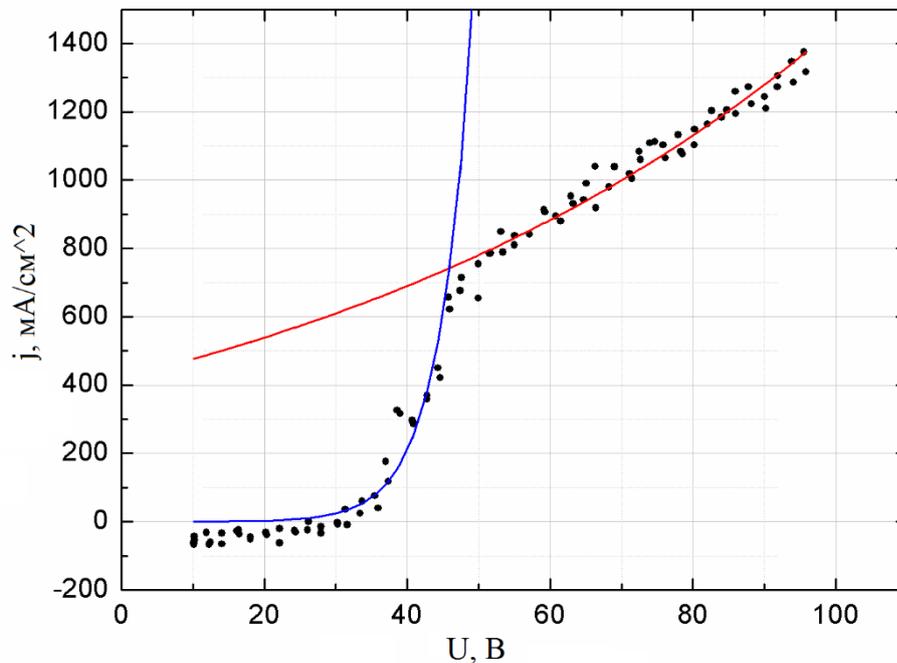


Рисунок 26 – Зависимость тока на зонд от напряжения смещения

3.3. Методика измерения эмиссионным зондом

Исследование и определение потенциала плазмы в течение импульсного тока разряда плазменного источника электронов с сеточной стабилизацией эмиссионной границы методом эмиссионного накаливаемого зонда.

Данный метод является более выгодным, так как является наиболее удобным по сравнению с методикой измерения плоским зондом с охранным кольцом.

В ходе проведения эксперимента были получены осциллограммы напряжения поджига, напряжения горения и тока разряда. Измерялась вольтамперная характеристика системы. Зонд, погруженный в плазму, окружается электрическим слоем (призондовый слой) и, фактически, ВАХ зонда является ВАХ слоя [34].

Измерительный блок для измерения накаливаемым зондом включает в себя блок накала зонда по схеме одноканального прямоходового преобразователя, осциллограф, систему синхронизации, управляющий контроллер и накаливаемый зонд (рисунок 27).

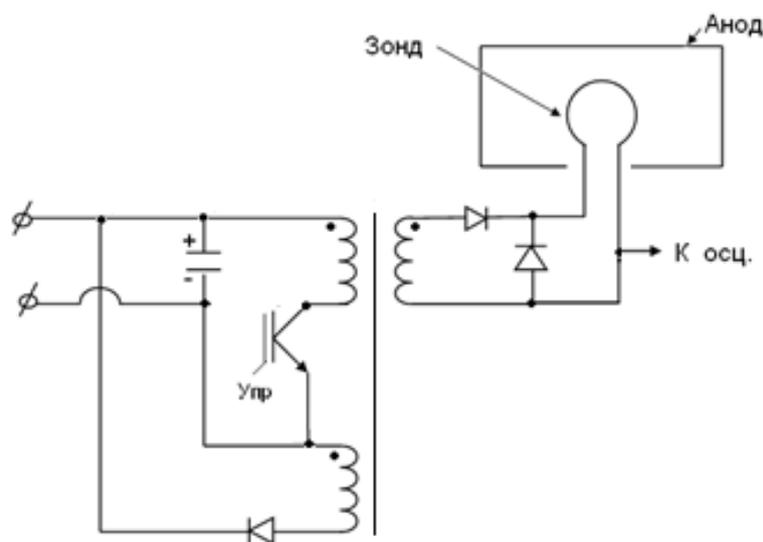


Рисунок – Схема эксперимента по подключению накаливаемого зонда в плазменный источник

Значимой величиной, представляющей интерес для диагностики плазмы, является потенциал плазмы. Плавающий потенциал – это потенциал зонда относительно плазмы, при котором ток на зонд равен нулю [35].

Ясно, что плавающий потенциал всегда отрицателен. Величина напряжения плавающего потенциала может быть определена при известных зависимостях ионного тока насыщения и электронного тока от потенциала зонда [36].

В работе использовался электрический накаливаемый зонд, процесс изготовления которого заключался в том, что в полость керамики продевались провода с термостойкой фторопластовой изоляцией, которые были связаны с вольфрамовой или молибденовой нитями и выведены за пределы изоляции. Для прочности конструкции данные провода частично изолировались полым стеклом, а экранировка вывода нити накаливаемого зонда осуществлялось с помощью металлической фольги.

Изготовленный зонд устанавливался в зону горения дугового разряда за 2 см от торца анода и за 2 см от образующей анода, с дополнительным нагревом до температур эмиссии от независимого источника напряжения,

подобным образом как на рисунке 28.



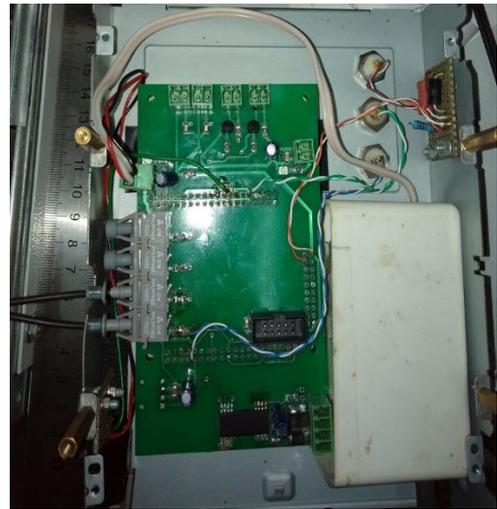
Рисунок 28 – Фотография установленного в катодную полость зонда

По мере решения задач, требовалось создать автоматический контроллер для плавной подачи напряжения на зонд и накала его до температур термоэмиссии, а также служащего для кратковременного отключения источника накала зонда на время измерения и последующего плавного снижения тока накала до нуля.

В ходе выполнения работы создали контроллер, в состав которого входили разработанные ранее печатные платы, которые удалось адаптировать под решение наших задач. Внешний вид контроллера, показан на рисунке 29. Данный манипулятор отображал на дисплее действующие значения напряжения горения разряда.



а)



б)

Рисунок 29 – Внешний вид контроллера: а) вид спереди; б) вид сзади

Схема работы используемого контроллера показана на рисунке 30.

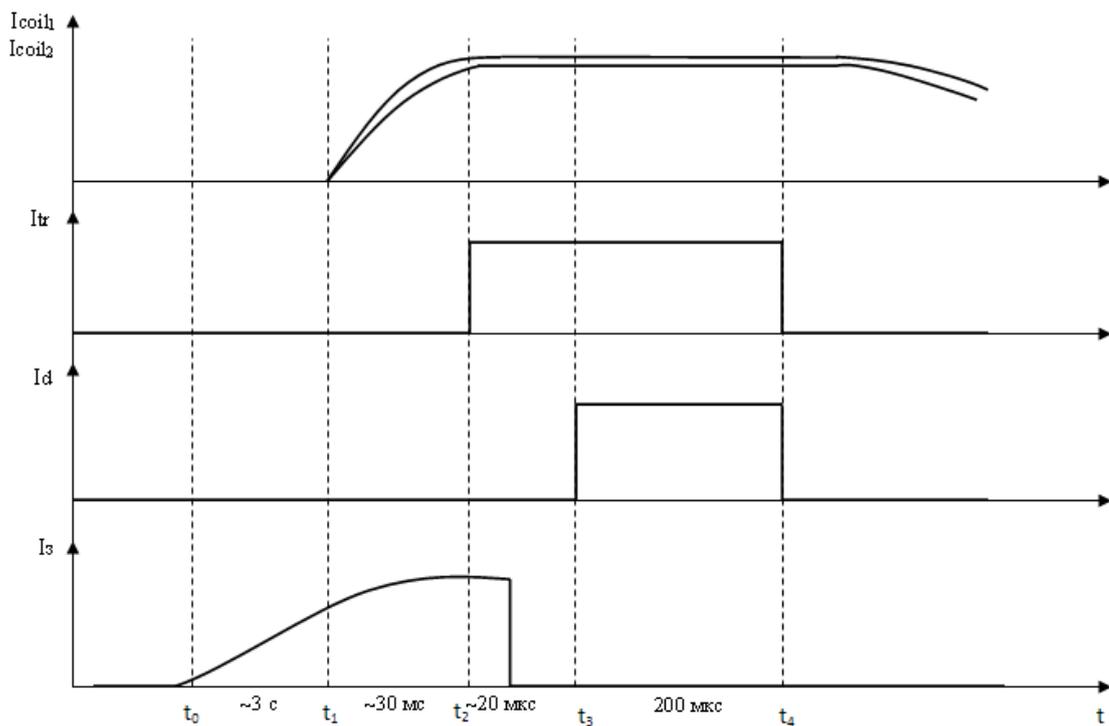


Рисунок 30 – Схема работы контроллера

Работа контроллера заключается в том, что первоначально с момента t_0 накаляют зонд в течении 3-х секунд до температуры термоэмиссии. Через время равное ~ 3 с подключают катушки к источнику питания и ток постепенно

нарастает и выходит в насыщение. Далее подключают поджиг и затем отключают накал зонда от источника, чтобы не вносить в измерения искажения и электромагнитные помехи.

Электрический зонд, выполненный в виде петли из вольфрама, нагреваемой проходящим по ней током до высокой температуры. Температура проволоки должна быть достаточно большой, чтобы плотность термоэмиссионного тока была близка к тепловому току плазменных электронов или даже превосходила его (рисунок 31).

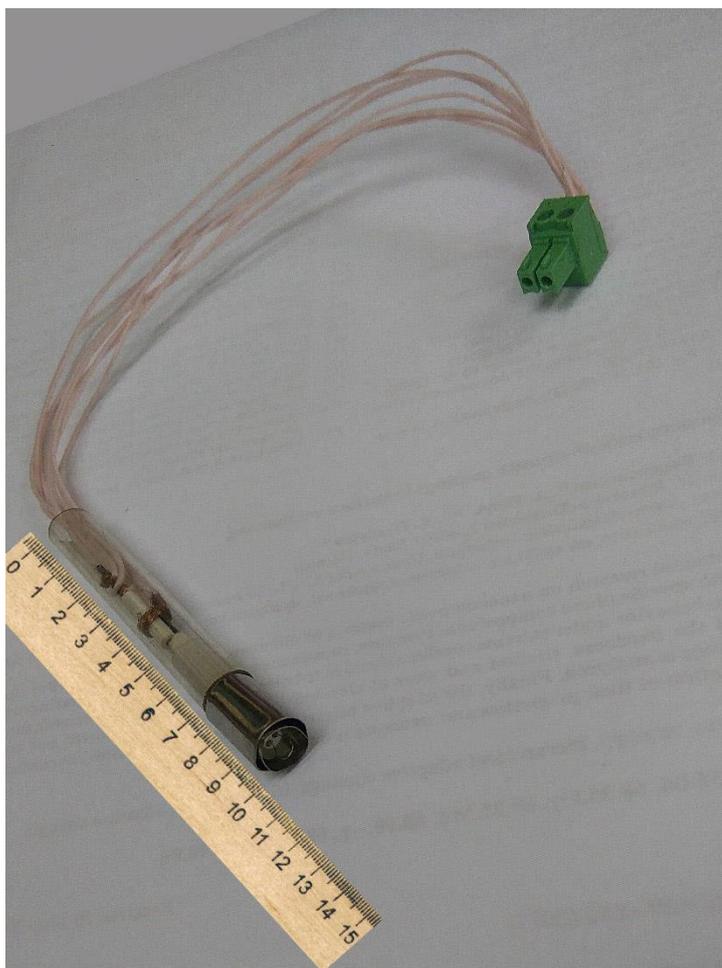


Рисунок 31 – Внешний вид эмиссионного зонда

Измерив плавающий потенциал такого эмиттирующего зонда, можно определить потенциал пространства.

Также требовалось подготовить место и соорудить систему измерения, предусмотренную для измерения потенциала плазмы и отслеживания

осциллограмм напряжения на электрическом зонде, которая изображена на рисунке 32.



Рисунок 32 – Система измерения потенциала плазмы электрическим зондом

Для выставления значений и регулирования процессом пользовались контроллером управления, который обеспечивает управление следующими устройствами: источником питания магнитной катушки 1 (ИПМ1), источником питания магнитной катушки 2 (ИПМ2), источником питания дугового разряда (ИПД), источником питания поджига (ИПП), высоковольтным источником питания (ВИП). Внешний вид контролера управления изображен на рисунке 33.



Рисунок 33 – Контроллер

Параметры, необходимые для устойчивого горения разряда: давление в камере выставили равным $1,2 \cdot 10^{-4}$ Па, значение тока на источнике питания установили равным 100 А, ток, протекаемый в катушках магнитного поля, составил 5,0 А, 5,0 А, время задержки срабатывания поджигающего разряда относительно момента включения катушек магнитного поля 32 мс, порога 20 А/В, резистор для измерения напряжения разряда 100 Ом.

Осциллограммы, полученные в ходе данного эксперимента представлены на рисунке 34.

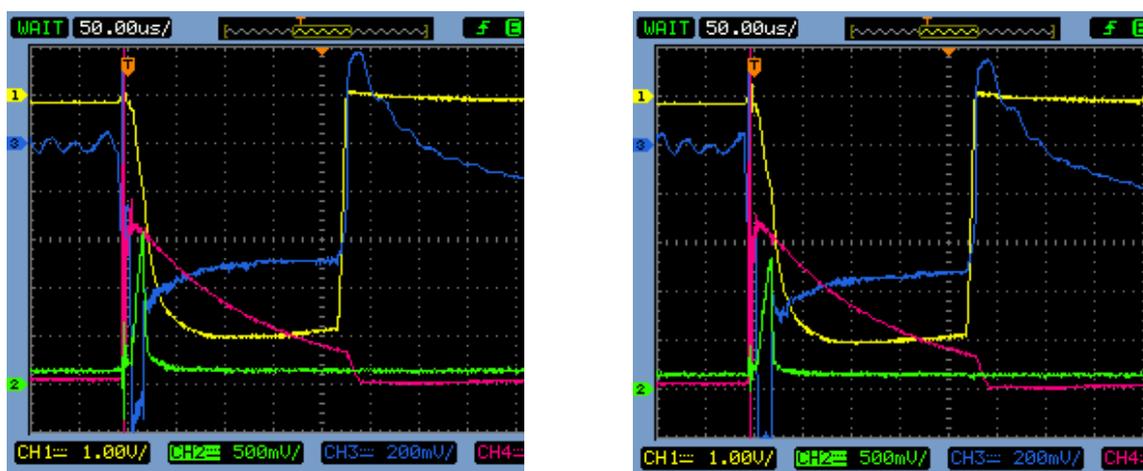


Рисунок 34 – Осциллограммы: 1 – Ток разряда, 2 – Ток второго катода поджига, 3 – Напряжение горения, 4 – Ток поджига.

Масштаб пояса 20 А/В; резистор для измерения напряжения разряда 100 Ом.

По изображенным осциллограммам можно заметить, что от импульса к импульсу значения напряжения горения не изменяются или изменяются незначительно, как и другие параметрами на осциллограммах.

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Оценка коммерческой ценности (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 техническими параметрами изделия, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет удовлетворить требования заказчика, бюджет исследования и т.д.

Целью данного раздела магистерской диссертации является проектирование и создание конкурентоспособных разработок и технологий, отвечающих предъявляемым требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Данная процедура рассмотрена на примере модифицирования металлов и металлокерамических изделий. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать общую экономическую идею проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

5.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Целевой рынок – НИИ, юбилейная, шахта, АО "Топпром", организации на котором будет продаваться в будущем разработка.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга). Карта сегментирования приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию результатов исследований

		Направление деятельности	
		Модифицирование металлов и металлокерамики	Фундаментальные исследования
Вид деятельности компании	Шахта АО "Топпром"	+	–
	НИИ	+	+

Потенциальными потребителями данной технологии являются различные промышленные организации, занимающиеся модифицированием свойств металлических и металлокерамических изделий, а также научно-исследовательские институты.

5.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;
- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, пример которой приведен в таблице 3. Для этого необходимо отобрать не менее трех-четырех конкурентных товаров и разработок.

Таблица 3 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерии	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Длительность процессов модифицирования	0,2	5	2	4	1	0,4	0,8
2. Автоматизация установки	0,05	5	3	4	0,2	0,15	0,2
3. Энергоэкономичность	0,05	4	2	3	0,2	0,1	0,15
4. Надежность	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
5. Безопасность	0,05	5	1	1	0,25	0,05	0,05
6. Потребность в расходных материалах	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
7. Простота эксплуатации	0,05	4	3	3	0,2	0,15	0,15
Экономические критерии оценки эффективности							

1. Конкурентоспособность продукта	0,1	5	2	2	0,5	0,2	0,2
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	4	3	3	0,2	0,15	0,15
3. Цена	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
5. Послепродажное обслуживание	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
6. Финансирование научной разработки	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
7. Срок выхода на рынок	0,05	5	3	2	0,25	0,15	0,1
Итого	1	66	43	45	4,7	2,85	3,25

К1 – первый конкурент, это установки газового азотирования.

К2 – второй конкурент, азотирование из растворов электролитов.

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 2, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Основываясь на знаниях о конкурентах, следует объяснить:

- чем обусловлена уязвимость позиции конкурентов и возможно занять свою нишу и увеличить определенную долю рынка;
- в чем конкурентное преимущество разработки.

Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ,

которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей посредством предложения товаров, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя.

Таким образом, конкурентоспособность научно-исследовательской работы составила 4,7, в то время как двух других аналогов 2,85 и 3,25 соответственно. Результаты показывают, что данная научно-исследовательская работа является конкурентоспособной.

5.3. SWOT-анализ

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

В таблице 4 представлена итоговая матрица SWOT-анализа.

Таблица 4 – Итоговая матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	Слабые стороны научно-исследовательского проекта:
	С1. Высокая технологичность установок.	Сл1. Высокие временные затраты на изготовление оборудования.
	С2. Экологичность технологии.	Сл2. Большой срок поставок материалов и комплектующих,
	С3. Сравнительно не высокая стоимость оборудования.	используемые при проведении научного исследования.
	С4. Высокая развитость технологии.	Сл3. Нехватка квалифицированного
	С5. Наличие бюджетного финансирования.	персонала из-за высокой востребованности технологий.

		Сл4. Медленный процесс вывода на рынок.
<p>Возможности:</p> <p>В1. Востребованность в областях машиностроения и авиастроения.</p> <p>В2. Увеличивающийся интерес к пучково-плазменным технологиям (ППТ).</p> <p>В3. Появление государственной программы по импортозамещению.</p> <p>В4. Повышение стоимости подобных установок у конкурентов.</p>	<p>Высокая конкурентоспособность проекта на рынке в связи с господдержкой по импортозамещению и модернизации производства.</p>	<p>Нехватка квалифицированного персонала из-за высокой востребованности ППТ.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</p> <p>У2. Развитие отечественного сегмента рынка высоких технологий и повышение конкуренции.</p> <p>У3. Внешнеполитические факторы, влияющие на экономику.</p> <p>У4. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции.</p> <p>У5. Изменение курса иностранной валюты.</p>	<p>Повышение себестоимости научного проекта в связи с нестабильной ситуации на рынке.</p>	<p>Происходит сдача своих позиций конкурентам в связи с увеличением срока выполнения проекта.</p>

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

Основными рекомендациями по направлению развития исследования являются:

- четкое распределение ответственности и полномочий на каждый этап проведения работ, развитие маркетинговой политике, поиск каналов и сбыта;
- стимулирование развития работ по улучшению качества, систематическое совершенствование методов и средств обеспечения и контроля качества, стимулирование научно-исследовательской деятельности;
- повышение производительности труда, сокращение себестоимости продукции, привлечение средств на исследование из научных фондов.

5.4. План проекта

5.4.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Разработка ТЗ на ВКР	Руководитель
	2	Составление технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	3	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, студент
	4	Выбор направления исследований	Руководитель
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, студент
Проведение серии экспериментов и их теоретическое объяснение	6	Разработка методики исследований	Руководитель, студент
	7	Проведение экспериментов	Студент
	8	Анализ и обработка полученных результатов	Студент
	9	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями и ранее полученными результатами	Студент
Обобщение и оценка результатов	11	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, студент
Оформление отчета по НИР	12	Составление пояснительной записки	Руководитель, студент
	13	Подготовка к защите	Студент

5.5. Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев 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 $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (6)$$

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

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

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

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{ч_i}, \quad (7)$$

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

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

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

5.6. 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:

$$T_{ki} = T_{pi} * k_{\text{кал}}, \quad (8)$$

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

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

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (9)$$

где $T_{\text{кал}} = 365$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}} = 104$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}} = 14$ – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48$$

График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе таблицы 4 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования.

При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу (таблицы 6 и 7).

Таблица 6 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ			Исполнитель	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ожг}$, чел-дни			
Разработка ТЗ на ВКР	2	4	3	Руководитель	1	4
Составление технического задания	2	4	3	Руководитель	1	4
Подбор и изучение материалов по теме	6	10	8	Студент	4	6
Выбор направления исследования	8	10	9	Студент	9	13
Календарное планирование работ по теме	2	4	3	Руководитель, Студент	1.5	2
Разработка методики исследований	12	16	14	Студент	7	10
Проведение экспериментов	20	22	21	Студент	21	31
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями и ранее полученными результатами	4	6	5	Студент	5	7
Анализ и обработка полученных результатов	4	186	5	Студент	5	7
Оценка эффективности	6	10	8	Руководитель, Студент	4	6

полученных результатов						
Составление и оформление ПЗ	14	16	15	Студент	15	22
Подготовка к защите	25	30	27	Студент	13.5	20

Таблица 7 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				февр.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Разработка ТЗ на ВКР	Руководитель	4	█													
2	Составление технического задания	Руководитель	4	█													
3	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	6	█	█												
4	Выбор направления исследования	Студент	13	█	█	█											
5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, студент	2		█	█											
6	Разработка методики исследований	Студент	10		█	█	█										
7	Проведение экспериментов	Студент	31			█	█	█	█								
8	Сопоставление результатов экспериментов	Студент	7			█	█	█	█	█							

- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

5.7.1. Расчет материальных затрат НИИ

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

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

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

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

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

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) * \sum_{i=1}^m C_i + N_{расхi}, \quad (10)$$

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

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

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

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Величина коэффициента (k_T), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 8.

Таблица 8 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы(Z_m), руб.
Баллон рабочего газа	шт.	2	1700	3400
Резисторы различных сопротивлений	шт.	10	91	910
Материалы для изготовления зонда	шт.	8	100	800
Пояс Роговского	шт.	4	3750	15000
Измерительный щуп	шт.	4	480	1920
Измерительные кабели	шт.	9	530	4770
Итого				26800

Из затрат на материальные ресурсы, включаемых в себестоимость продукции, исключается стоимость возвратных отходов.

Под возвратными отходами производства понимаются остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, теплоносителей и других видов материальных

ресурсов, образовавшиеся в процессе производства научно-технической продукции, утратившие полностью или частично потребительские качества исходного ресурса (химические или физические свойства) и в силу этого используемые с повышенными затратами (понижением выхода продукции) или вовсе не используемые по прямому назначению.

5.7.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме.

Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. Расчет затрат по данной статье заносится в таблицу 9. При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НИИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений.

Накопление экспериментальных данных для выполнения ВКР проводилось за установкой «SOLO». Эксперименты проводились 12 дней по 4 часа (48 часов), мощность установки 12 кВт/час.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = Ц_{эл} \cdot P \cdot F_{об} \quad (11)$$

где $Ц_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (4 руб. за 1 кВт·ч); P – мощность оборудования, кВт; $F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

$$C_{эл} = 4 \cdot 12 \cdot 48 = 2304 \text{ руб.}$$

Таблица 9 – Расчет бюджета затрат на приобретение оборудования для научно-практических работ

Наименование оборудования	Количество единиц оборудования, шт	Единица измерения	Сумма
Установка «SOLO»	1	кВт·ч	2304
Осциллограф Agilent	2	шт.	68000
Мультиметр	3	шт.	1100
Паяльник	1	шт.	810
Итого			72214

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15 процентов от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НТИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений.

5.7.3. Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

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

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (12)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

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

$$Z_{\text{осн}} = T_p \cdot Z_{\text{дн}}, \quad (13)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d}, \quad (14)$$

где Z_M – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 10 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные - праздничные	118	118
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	32	32
Действительный годовой фонд рабочего времени	215	215

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} * (1 + k_{пр} + k_d) * k_p, \quad (15)$$

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

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{тс}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15- 20 % от $Z_{тс}$);

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

Тарифная заработная плата $Z_{тс}$ находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда $T_{с1} = 600$ руб. на тарифный коэффициент k_t и учитывается по единой для бюджетных организации тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии. Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 11.

Таблица 11 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, тыс. руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , тыс. руб.	$Z_{дн}$, тыс. руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, тыс. руб.
Руководитель	26,3	0,3	0,5	1,3	61,542	2,977	28	83,354
Студент	2,41	0,3	0,5	1,3	5,639	0,273	104	28,392
Итого								111,724

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор (см. «Положение об оплате труда», приведенное на интернет-странице Планово-финансового отдела ТПУ).

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

5.7.4. Дополнительная заработная плата исполнительской системы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} * Z_{\text{осн}} \quad (16)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Таблица 12 – Расчет дополнительной заработной платы

Исполнитель	$k_{\text{доп}}$	$Z_{\text{осн}}$, тыс. руб.	$Z_{\text{доп}}$, тыс. руб.
Руководитель	0,12	83 354	10,002
Итого			10,002

5.7.5. 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:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} * (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (17)$$

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

Таблица 13 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	$Z_{\text{осн}}$, тыс. руб.	$Z_{\text{доп}}$, тыс. руб.	$k_{\text{внеб}}$, %	$Z_{\text{внеб}}$, тыс. руб.
Руководитель	83,354	10,002	0,271	25,299
Студент	28,392	3,407	0,271	8,617
Итого				33,916

5.7.6. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы «Исследование генерации импульсного электронного пучка в плазменном эмиттере на основе дугового разряда низкого давления» является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком или научной организацией определяет в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 14.

Таблица 14 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.
1. Расчет материальных затрат научного исследования	99,014
2. Затраты по основной заработной плате	125,133
3. Затраты по дополнительной заработной плате	10,002
4. Отчисления на социальные нужды	33,916
Бюджет затрат НТИ	268,065

5.8. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (18)$$

где I_{Φ}^p - интегральный финансовый показатель разработки;

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

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

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p, \quad (19)$$

где I_m - интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

a_i - весовой коэффициент i – го варианта параметра;

b_i^a, b_i^p - бальная оценка i -го варианта параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Для аналогов затраты на выполнение проекта составляют 250380 и 280002 рубли соответственно.

В числителе берем затраты на свой проект, а в знаменателе берем только максимальное значение по аналогам, тогда:

$$I_{финр}^p = \frac{\Phi_p}{\Phi_{\max}} = \frac{268065}{280002} = 0,95;$$

Для аналогов соответственно:

$$I_{фина1}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{\max}} = \frac{250380}{280002} = 0,89; \quad I_{фина1}^{a2} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{\max}} = \frac{280002}{280002} = 1;$$

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 15. Выбор представленных в данной таблице критериев связан с тем, что в оценочной карте сравнения конкурентных технических решений данной разработки с аналогами они имеют наибольший вес, а следовательно, и большее значение.

Таблица 15 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Длительность процессов модифицирования	0,2	5	4	5
2. Автоматизация установки	0,05	5	3	3
3. Энергоэкономичность	0,05	5	4	4
4. Надежность	0,05	5	5	5
5. Безопасность	0,05	4	4	3
6. Потребность в расходных материалах	0,05	5	3	4
7. Простота эксплуатации	0,05	5	4	4
8. Конкурентоспособность продукта	0,1	5	5	5
9. Уровень проникновения на рынок	0,05	4	4	3
10. Цена	0,1	3	4	5
11. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	3	5
12. Послепродажное обслуживание	0,05	4	5	4
13. Финансирование научной разработки	0,1	5	3	3
14. Срок выхода на рынок	0,05	4	5	4
Итого	1	4,6	4	4,25

$$I_{\text{тп}}=5 \cdot 0,2+5 \cdot 0,05+5 \cdot 0,05+5 \cdot 0,05+4 \cdot 0,05+5 \cdot 0,05+5 \cdot 0,05+5 \cdot 0,1+4 \cdot 0,05+3 \cdot 0,1+5 \cdot 0,05+4 \cdot 0,05+5 \cdot 0,1+4 \cdot 0,05=4,6$$

Аналог 1 =

$$4 \cdot 0,2+3 \cdot 0,05+4 \cdot 0,05+5 \cdot 0,05+4 \cdot 0,05+3 \cdot 0,05+4 \cdot 0,05+5 \cdot 0,1+4 \cdot 0,05+4 \cdot 0,1+3 \cdot 0,05+5 \cdot 0,05+3 \cdot 0,1+5 \cdot 0,05=4$$

Аналог 2 =

$$5 \cdot 0,2+3 \cdot 0,05+4 \cdot 0,05+5 \cdot 0,05+3 \cdot 0,05+4 \cdot 0,05+4 \cdot 0,05+5 \cdot 0,1+3 \cdot 0,05+5 \cdot 0,1+5 \cdot 0,05+4 \cdot 0,05+3 \cdot 0,1+4 \cdot 0,05=4,25$$

Интегральный показатель эффективности разработки ($I_{\text{финр}}^p$) и аналога ($I_{\text{финр}}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p}; \quad I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\phi}^a}, \quad (20)$$

В результате:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p} = \frac{4,6}{0,95} = 4,8; \quad I_{\text{фина1}}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_{\phi}^{a1}} = \frac{4}{0,89} = 4,5; \quad I_{\text{фина2}}^{a2} = \frac{I_m^{a2}}{I_{\phi}^{a2}} = \frac{4,25}{1} = 4,25.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a}, \quad (21)$$

Таблица 16 – Сравнительная эффективность анализа

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,95	0,89	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,6	4	4,25
3	Интегральный показатель эффективности	4,8	4,5	4,25
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1,06	1,12

Таким образом, основываясь на определении ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования, проведя необходимый сравнительный анализ, можно сделать вывод о превосходстве выполненной разработки над аналогами.

Выводы

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были решены следующие задачи:

1. Проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования на примере SWOT-анализа, результат

которого показал большой потенциал применения методики, а также возможность быстрого выхода на внутренний рынок обеспечены актуальностью данного исследования.

2. Определена структура работ и количество исполнительской работы. Разработан календарный план – график для проведения НИР. Определен бюджет НИР, который составил 268 065 рублей.

3. Следует отметить важность для проекта в целом проведенных в данной главе работ, которые позволили объективно оценить эффективность проводимого научно-практического исследования.