

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

Школа ИШНПТ

Направление подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

Отделение школы Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование пространственно-временных характеристик плазмы дугового разряда низкого давления в ускорителе электронов с сетчатым плазменным катодом

УДК 537.533: 621.384.6.038.612

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ71	Дорошкевич Сергей Юрьевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	Воробьёв Максим Сергеевич	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОСГН	Жаворонок А.В.	—		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель ООД	Романова С.В.	—		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроника и наноэлектроника	Яковлев В.Ю.	д.ф.-м.н.		

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>технико-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 <i>оборудование</i> ; 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 работ

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

Школа ИШНПТ

Направление подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

Отделение школы Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

(Подпись) _____ Яковлев В.Ю.

(Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ71	Дорошкевичу Сергею Юрьевичу

Тема работы:

Исследование пространственно-временных характеристик плазмы дугового разряда низкого давления в ускорителе электронов с сетчатым плазменным катодом

Утверждена приказом директора

№ 3265/с от 24.04.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объект исследования – Ускоритель электронов «Дуэт» с сетчатым плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления и выводом пучка в атмосферу.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none">1) Обзор литературы по теме диссертации2) Разработка и монтаж одиночного зонда Ленгмюра для измерения параметров плазмы3) Измерение параметров плазмы дугового разряда низкого давления в зависимости от тока разряда, давления, рода газа4) Анализ полученных данных и сравнение их с известными в литературе

Перечень графического материала	Презентация, выполненная в MS PowerPoint
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Романова Светлана Владимировна
Финансовый менеджмент	Жаворонок Анастасия Валерьевна
Раздел на английском языке	Аксёнова Наталия Валерьевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Обзор литературы	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	Воробьев Максим Сергеевич	Кандидат технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ71	Дорошкевич Сергей Юрьевич		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ71	Дорошкевичу Сергею Юрьевичу

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	Отделение материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	11.04.04 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>	Реализация исследования на базе лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН. В исследовании задействованы 2 человека: руководитель и магистрант
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов»; ГОСТ Р 8.740-2011 ГСИ «Расход и количество газа»; ГОСТ 33073-2014 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная»
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Налоговый кодекс Российской Федерации

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1 <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	– Анализ потенциального рынка и потребителей; – Оценка конкурентоспособности укорителей электронов с плазменным катодом; – SWOT-анализ
2 <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Составление календарного плана проекта; Определение бюджета НТИ
3 <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Расчет интегрального показателя финансовой эффективности научного исследования; определение критериев финансовой эффективности; расчет финансовых показателей (ЧД, ЧДД, ИД и др.)

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Матрица SWOT
5. График проведения и бюджет НТИ
6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
7. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	19.02.19
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОСГН	Жаворонок А.В.	–		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
---------------	------------	----------------	-------------

4НМ71	Дорошкевич Сергей Юрьевич		
-------	---------------------------	--	--

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ71	Дорошкевичу Сергею Юрьевичу

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	Отделение материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	11.04.04 Электроника и наноэлектроника

Тема ВКР:

Исследование пространственно-временных характеристик плазмы дугового разряда низкого давления в ускорителе электронов с сетчатым плазменным катодом

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является широкоапертурный ускоритель электронов с сетчатым плазменным катодом и выводом пучка в атмосферу. Ускоритель находит применение как в обработке пучком различных материалов, так и исследовательской области эмиссионной плазмы дугового разряда.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. 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>Трудовой кодекс РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019); ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ; ГОСТ EN 894-3-2012.</p>
<p>2. Производственная безопасность:</p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Повышенное значение напряжения; уровень статического электричества; сосуды с повышенным давлением; уровень ионизирующего излучения; уровень электромагнитных полей и излучений; отклонение микроклимата; недостаточная освещенность; повышенный уровень шума</p>
<p>3. Экологическая безопасность:</p>	<p>Воздействовать на окружающую среду могут электронные компоненты, части проводов и бытовые отходы. Для предотвращения загрязнения происходит предварительная сортировка отходов и их дальнейшая утилизация.</p>

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Наиболее типичной ЧС является короткое замыкание электрической цепи с последующим возгоранием.
--	--

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романова Светлана Владимировна	–		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ71	Дорошкевич Сергей Юрьевич		

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

Школа ИШНПТ

Направление подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

Уровень образования магистратура

Отделение школы Отделение материаловедения

Период выполнения весенний семестр 2018/2019 учебного года

Форма представления работы:

магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.05.2019	<i>Основная часть</i>	60
07.05.2019	<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	15
30.05.2019	<i>Социальная ответственность</i>	10
20.05.2019	<i>Приложение на иностранном языке</i>	15

Составил руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	Воробьев М.С.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроника и наноэлектроника	Яковлев В.Ю.	д.ф.м.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 111 с., 30 рис., 27 табл., 50 источников.

Ключевые слова: ускоритель электронов, дуговой разряд, плазма, зонд Ленгмюра, зондовая характеристика.

Объектом исследования является ускоритель электронов «Дуэт» с сетчатым плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления и выводом пучка в атмосферу.

Цель работы – определение параметров эмиссионной плазмы дугового разряда в зависимости от тока разряда, давления и рода газа.

В ходе работы были проведены зондовые измерения плазмы дугового разряда низкого давления с помощью автоматизированной системы измерения, которая находится в непосредственной близости с зондом и самой плазмой (внутри вакуумной камеры). По полученным зондовым характеристикам были определены параметры плазмы (потенциал и концентрация плазмы, температура электронов) в зависимости от амплитуды тока разряда, давления и рода рабочего газа при разной удаленности от катода разряда.

Полученные параметры плазмы дугового разряда, а так же их зависимости от разных условий генерации, привносят большее понимание физических процессов, происходящих внутри плазменного эмиттера, что необходимо как для расширения диапазона параметров электронного пучка, так и для повышения стабильности

СОДЕРЖАНИЕ

1	ВВЕДЕНИЕ.....	12
2	ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	14
2.1	Ускорители электронов на основе термокатодов	14
2.2	Ускорители электронов на основе взрывоэмиссионных катодов.....	18
2.3	Ускорители электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР)	23
2.4	Ускорители электронов на основе плазменного эмиттера	26
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	33
3.1.	Описание экспериментальной установки.....	33
3.2	Схемы электропитания ускорителя электронов «ДУЭТ».....	36
3.3	Схема измерения зондовой характеристики	38
3.4	Получение зондовых характеристик дугового разряда	41
4	ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	50
4.1	Предпроектный анализ.....	50
4.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования	50
4.1.2	Анализ конкурентных решений	51
4.1.3	SWOT-анализ	53
4.1.4	Оценка готовности проекта к коммерциализации	56
4.1.5	Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	57
4.2	Инициация проекта.....	57
4.2.1	Цели и результаты проекта	58
4.2.2	Ограничения и допущения проекта.....	58
4.3	Планирование управления научно-техническим проектом.....	59
4.3.1	Иерархическая структура работ проекта	59
4.3.2	Иерархическая структура работ проекта	60
4.3.3	План проекта	60
4.4	Бюджет научного исследования	62
4.4.1	Расчет материальных затрат НИИ.....	62
4.4.2	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ и амортизация	63
4.4.3	Заработная плата.....	64
4.4.4	Отчисления на социальные нужды	65
4.4.5	Накладные расходы	65
4.4.6	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	65
4.5	Организационная структура проекта	66
4.5.1	План управления коммуникациями проекта	67
4.5.2	Реестр рисков проекта	67
4.6	Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	68
4.6.1	Оценка абсолютной эффективности исследования	68
4.6.2	Оценка сравнительной эффективности исследования	72

4.7 Вывод по разделу.....	75
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	77
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	78
5.2 Профессиональная социальная безопасность. Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования	78
5.2.1 Повышенное значение напряжения в электрической цепи	79
5.2.2 Повышенный уровень ионизирующего излучения.....	80
5.2.3 Повышенный уровень статического электричества	82
5.2.4 Повышенный уровень электромагнитных полей и излучений	82
5.2.5 Сосуды с повышенным давлением	83
5.2.6 Отклонение показателей микроклимата в помещении	83
5.2.7 Недостаточная освещенность рабочей зоны	84
5.2.8 Превышение уровней шума.....	85
5.3 Экологическая безопасность.	86
5.4 Защита литосферы	86
5.5 Защита атмосферы	86
5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.	87
5.7 Вывод по разделу.....	89
6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	90
7 СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	91
ПРИЛОЖЕНИЕ I.....	96

1 Введение

Ускорители электронов, позволяющие осуществлять генерацию электронных пучков большого сечения с выводом их в атмосферу, находят все большее применение в промышленности, медицине, сельском хозяйстве и иных сферах деятельности человека [1-3]. Именно поэтому такие ускорители электронов постоянно совершенствуются, а их разработка и модернизация в первую очередь направлены на расширение предельных параметров генерируемого пучка и стабильность работы таких ускорителей электронов в целом.

По принципу действия можно выделить три основных типа ускорителей электронов: на основе термоэмиссии, взрывной эмиссии и эмиссии электронов из газоразрядной плазмы. У каждого из них есть свои ниши в области применения. Так ускорители с термокатадами позволяют получать электронные пучки в непрерывном режиме или импульсы большой длительности с неоднородностью по сечению меньше 10% [1]. Ускорители электронов с взрывоэмиссионными катодами генерируют пучки с наибольшими значениями плотности тока в течение наносекундной длительности [4]. Однако эмиссия электронов из газоразрядной плазмы отличается независимостью параметров (ток пучка, длительность импульса, энергия электронов, частота следования импульсов) друг от друга, что позволяет использовать такие ускорители электронов в более широком диапазоне применений, а особенно в экспериментальных (поисковых) целях. Одним из ускорителей такого типа является объект исследования данной работы – ускоритель электронов «Дуэт» с сетчатым плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления и выводом пучка в атмосферу. Поскольку плазменный катод является сложным газонаполненным устройством, стабильность работы которого зависит от множества факторов (габаритных размеров, размеров эмиссионных отверстий, типа используемых плазмогенераторов, параметров разряда, чистоты электродной системы и пр.) и стабильность работы которого непосредственно определяет стабильность

работы ускорителя электронов в целом, то предметом исследования данной работы является процесс генерации эмиссионной плазмы в плазменном катоде на основе дугового разряда низкого давления путем определения пространственно-временных характеристик этой плазмы, из которой впоследствии осуществляется отбор электронов, их ускорение и вывод в атмосферу через выпускное фольговое окно.

2 Литературный обзор

Изучение возможности применения электронно-лучевых технологий началось в XX столетии, во время успешного развития вакуумной техники и появления технических задач по соединению, обработке и получению новых материалов [5]. По сегодняшний день проводится работа по поиску новых применений электронных пучков и внедрению их в производственную сферу. Поскольку принадлежность электронного ускорителя к определенной сфере применения напрямую зависит от его конструкции и принципа работы, рассмотрим методы получения электронных пучков:

2.1 Ускорители электронов на основе термокатодов

Первые электронные пучки были получены способом, основанным на явлении термоэлектронной эмиссии, которая заключается в испускании электронов поверхностью нагретых проводящих тел. Зачастую, термоэлектронные пушки применяют для модифицирования поверхностных слоев материалов, сварки, резки, пайки и т.п. Поток электронов эмитируется термокатодом, имеющим прямой или косвенный подогрев, и ускоряется электрическим полем. Так, например, для сварки используется пучки с энергиями 20– 150 кэВ [5]. Величина тока электронного пучка регулируется путем подачи отрицательного относительно катода потенциала на управляющий электрод. Плотность мощности пучка управляется при помощи фокусирующих электромагнитных линз.

Типы термоэлектронных катодов по их физическим и электрическим свойствам разделяются на следующие группы [6,7]:

- Катоды из чистых металлов
- Односоставные керамические катоды
- Полупроводниковые катоды
- Керамические тугоплавкие соединения на основе карбидов и боридов
- Комплексные катоды

Среди множества материалов, которые используются в катодной технике, выделяется гексаборид лантана LaB_6 . Его преимущества перед традиционными материалами заключаются в более низкой работе выхода, высокой температуре плавления, а также повышенной устойчивости в агрессивных средах [8].

Недостаток термоэлектронных пушек заключается в работе катода в неблагоприятных для него условиях: «отравление» остаточными газами и парами, бомбардировка ускоренными положительными ионами. Все это приводит к разрушению поверхности катода и ухудшению его эмиссионных свойств. Также для решения разных технологических задач (резка, сварка, плавка) на электронной пушке, чтобы обеспечить необходимую мощность электронного луча, приходится использовать катоды разного типа, что дополнительно приносит неудобства в работе. Однако в работе [9] приводится описание электронно-лучевой пушки с термокатодом, в которой возможно создавать электронный луч с мощностью от 2 до 60 кВт. Это достигается с помощью наличия в конструкции пушки сменных картриджей, представляющих собой узел с прямонакальным катодом или катодом косвенного подогрева. Смена картриджей без развакуумирования рабочей камеры в течение нескольких минут позволяет менять мощность электронного луча и применять его для разных технологических задач.

Использование термоэлектронной эмиссии находит свое место и для формирования электронных пучков большого сечения (ПБС). Источники электронов с термокатадами, позволяющие генерировать ПБС, предназначены в основном для работы в непрерывном режиме и на импульсах значительной длительности, что обусловлено как инерционностью, так и ограниченной эмиссионной способностью термокатодов [10]. В связи с тем, что создание термокатодов с большой эмиссионной поверхностью технологически затруднено, для формирования широкого пучка используют многоэлементные катоды – отдельные протяженные нити. Поскольку площадь сечения пучка превосходит эмитирующую поверхность примерно на порядок, то нитевидные

катоды должны обеспечивать достаточно высокую плотность эмиссии. При этом достижение высокой плотности тока возможно при соответствующей большой температуре нитей, которая приводит к сокращению их срока службы. Для снижения мощности и температуры накала оптимизируют диаметр нити.

Наиболее простую конструкцию электронно-оптической системы (ЭОС) с многоэлементными катодами имеют трехэлектродные ускорители. Они состоят из нитевидных эмиттеров, помещенных в поле диода, образованного плоским анодом и отражательным электродом (спредер). Пример трехэлектродного ускорителя описан в работе [11], конструктивная схема которого приведена на рисунке 1. В вакуумной камере 1 ускорителя на проходном изоляторе 2 установлен катодно-сеточный блок 3. Последний содержит плоский тепловой экран 4, ряд прямонакальных эмиттеров 5 из вольфрамового сплава, размещенных с определенным шагом, и сетку 6 в виде параллельных стержней из вольфрама диаметром 3 мм, расположенных с шагом 9 мм. Геометрия сетки рассчитана таким образом, чтобы управление ускорителем осуществлялось в области отрицательных сеточных потенциалов. Элементы катодного блока заключены в электростатический экран 7. С целью уменьшения тепловых деформаций при работе ускорителя конструкция катодного блока выполнена секционированной. Выводное окно сечением $50 \times 40 \text{ см}^2$, состоящее из опорной решетки 8 и фольги 9 из алюминиевого сплава толщиной 30 мкм, является анодом ускорителя.

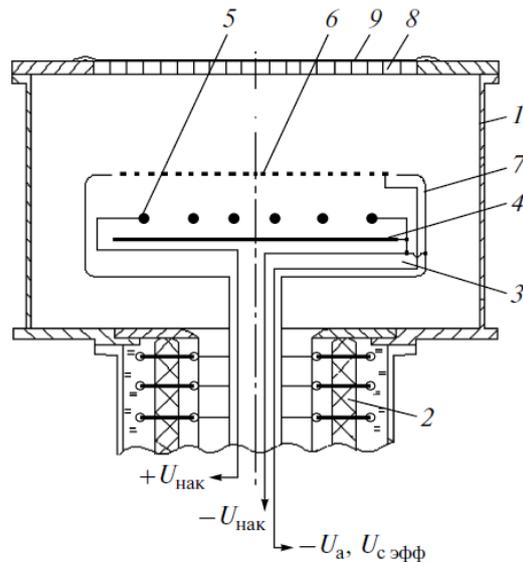


Рисунок 1 — Принципиальная схема ускорителя. $+U_{\text{нак}}$, $-U_{\text{нак}}$, $U_{\text{с эфф}}$ — напряжения питания накала термоэмиттеров и сетки, подаются под общим ускоряющим напряжением $-U_a$ относительно земли. 1— вакуумная камера, 2— проходной высоковольтный изолятор, катодно-сеточный блок, 4— тепловой экран, 5— термоэмиттеры, 6— сетка, 7— электростатический экран, 8— опорная решетка, 9— фольга

Постоянный ток обеспечивает накал термоэмиттеров, при этом в двух соседних нитях ток протекает встречно, что позволяет снизить величину образующегося магнитного поля и его влияние на угловые характеристики электронного пучка, падающего на опорную решетку. Широкоапертурный ускоритель генерирует в непрерывном режиме электронный пучок с энергией до 200 кэВ. Максимальная плотность тока выведенного пучка составляет 100 мкА/см^2 , а неоднородность распределения по сечению не превышает 10%.

Формирование ПБС триодными ЭОС имеет ряд недостатков, таких как: влияние ускоряющего поля на геометрические и токовые характеристики пучка, достаточно жесткие требования к размерам и форме управляющего электрода. Поэтому зачастую применяют четырехэлектродные системы. Дополнительный электрод, установленный между нитевидными катодами и анодом, разделяет область ускорения и область формирования ПБС. В работе [12] представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований широкоапертурного термоэмиссионного ускорителя с ЭОС триодного и тетродного типа и проведено их сравнение. Преимущество тетродной системы

заключается в независимости регулировки тока и энергии пучка. Также сравнение распределения плотности тока по сечению выведенного пучка показывает, что в ускорителе с тетродной ЭОС может быть обеспечена более высокая однородность распределения ($\Delta j/j \leq \pm 10\%$). По мнению авторов это связано с тем, что в ЭОС тетродного типа краевые эффекты оказывают значительно меньшее влияние на характеристики пучка (по периметру апертуры) вследствие наличия двух сеток. В ускорителе с триодной ЭОС вытягивание тока электронов обеспечивается полем анода, провисающим сквозь управляющую сетку на краях апертуры катодно– сеточного блока провисание электрического поля слабее. В тетродной ЭОС вытягивание электронов производится за счет потенциала управляющей сетки и влияние провисание поля анода сквозь две сетки значительно слабее.

Термоэлектронные ускорители продолжают занимать определенные производственные ниши, а их исследование и модернизация также актуальна. Однако ряд особенностей: ограниченная эмиссионная способность катода, а, следовательно, низкая плотность тока пучка, сложность расчета ЭОС, использование дополнительных электродов и необходимость в системах управления ими, недостаточное время жизни термокатодов – привносит сложности в расширении области применения источников такого типа, в частности, при формировании ПБС.

2.2 Ускорители электронов на основе взрывоэмиссионных катодов

Явление взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ) было открыто Г.А. Месяцем и по своей сути является термоэлектронной эмиссией из участков катода, нагретых до высоких температур за счет их микровзрывов [13]. Электрический взрыв микроострий на поверхности металла сопровождается эмиссией электронного тока, на порядки превосходящий ток автоэлектронной эмиссии. Согласно механизму Месяца [14] ВЭЭ происходит отдельными порциями электронов, получивших название эктоны (Explosive center или Electron claster).

Мощные (10^8 – 10^{13} Вт) электронные пучки наносекундной длительности, получаемые с помощью диодных электронных пушек со взрывоэмиссионными катодами, широко применяются для генерации СВЧ-колебаний, мощного рентгеновского излучения, возбуждения рабочей среды лазеров, коллективному ускорению частиц, в технологии и т.д. [13]. Время существования ВЭЭ определяется временем распространения плазмы от катода до анода разрядного промежутка и обычно не превосходит 10^{-7} – 10^{-6} с. Каждый акт такой эмиссии сопровождается необратимыми изменениями состояния поверхности катода. С каждым новым импульсом анодного напряжения взрываются другие эмитирующие центры катода, и, следовательно, возникают другие конфигурации плазменных сгустков. Поэтому при одном и том же значении анодного напряжения эмиссионные токи могут быть различны.

На данный момент существует огромное количество конструкций катодов для ВЭЭ, каждая из которых предназначена для определенных целей: повышение однородности пучка, достижение высокой плотности тока эмиссии, увеличение срока службы катода и т.д. Наиболее распространенными являются многострийные катоды, в которых большое число острий служит для появления многочисленных зон эктонов. Проблема многострийных катодов заключена в стабильности и долговечности катода. Для снижения влияния данных недостатков подбирают наиболее подходящий материал, определяют токовую нагрузку, геометрию электрода, величину прикладываемого напряжения и межэлектродный зазор. Выбор геометрии эмиттеров носит в себе два противоречивых требования. Одно из них – достижение такой величины напряженности электрического поля, при которой время запаздывания взрыва острий будет много меньше длительности фронта. Второе требование – обеспечение необходимого ресурса катода. Поскольку увеличение напряженности поля достигается уменьшением радиуса острия, а меньший радиус в свою очередь приводит к большему уносу массы, то эти два требования носят противоречивый характер, что приводит к дополнительным трудностям при создании ускорителей такого типа. При разработке долговечных

катодов возникают задачи выбора наиболее подходящего материала. В работе [15] проведены испытания эмиттеров из разных материалов с идентичными геометрическими параметрами в одинаковых вакуумных условиях. Эксперименты проводились при давлении $1,33 \times 10^{-4}$ Па при следующих параметрах: межэлектродное расстояние 0,6 см, амплитуда 30 кВ, длительность 50 нс, частота 25 Гц. В результате исследования сделан вывод, что наибольшую эрозионную стойкость имеют медные эмиттеры. Однако эмиттеры из графита и олова, при меньшей эрозионной стойкости, производят наибольшее число стабильных включений тока.

С целью создания долговечных взрывоэмиссионных катодов широко распространены эмиттеры с постоянным поперечным сечением по высоте (фольговые и проволочные). Из них более популярны эмиттеры из фольги [16], которые в наносекундном диапазоне длительностей импульсов обеспечивают ресурс 10^6 – 10^7 включений тока. Однако такие эмиттеры обладают рядом недостатков. Так неконтролируемость числа и местоположения эмиссионных центров на рабочей кромке фольги приводит к появлению значительной неоднородности электронного пучка. Также локализация тока в ограниченном числе эмиссионных центров вызывает убыстрение электрического пробоя ускоряющего промежутка. Последнее пытаются устранить, применяя очень тонкие металлические фольги, с целью повышения напряженности электрического поля на катод. Однако тонкая фольга механически неустойчива, а появление лидирующих эмиссионных центров при создании катодов большой площади оказывает неблагоприятное влияние на формирование пучка.

Необходимость повышения однородности пучка привела к созданию металлодиэлектрических катодов. Работа таких катодов основана на возбуждении ВЭЭ в тройной точке металл – диэлектрик – вакуум. Повышенная однородность достигается за счет большей скорости распространения плазмы по диэлектрику относительно скорости распространения катодного факела в вакууме. К тому же достоинством металлодиэлектрических катодов служит возможность управления источником с помощью разряда по поверхности

диэлектрика. Конструкции катодов с тройными точками носят различный характер. Так используются металлические катоды с инкрустированной пластмассой, медные проволоки с армированием диэлектриком, катоды волоконные (вельветовые), керамические катоды из нанопорошков и др [13]. Недостатком металлодиэлектрических катодов является металлизация поверхности диэлектрика за счет жидкого металла, плазмы и пара, испускаемых экатодом, что затрудняет функционирование таких систем. Также сказывается разрушение диэлектрика при длительной работе.

Взрывоэмиссионные катоды большой площади применяют для формирования ленточных электронных пучков, которые в свою очередь используются для инициирования плазмохимических процессов в различных газовых смесях. Так импульсные электронные пучки с повышенной плотностью тока позволяют снизить энергетические затраты при удалении из воздуха вредных химических соединений, таких как диоксид серы, сероводород [17] и др. Примером формирования ленточного пучка может послужить импульсно-периодический наносекундный ускоритель электронов, описанный в работе [18]. Ускоритель состоит из двух основных элементов: генератора СМ-3Н и вакуумного диода, устройство которого приведено на рисунке 2.

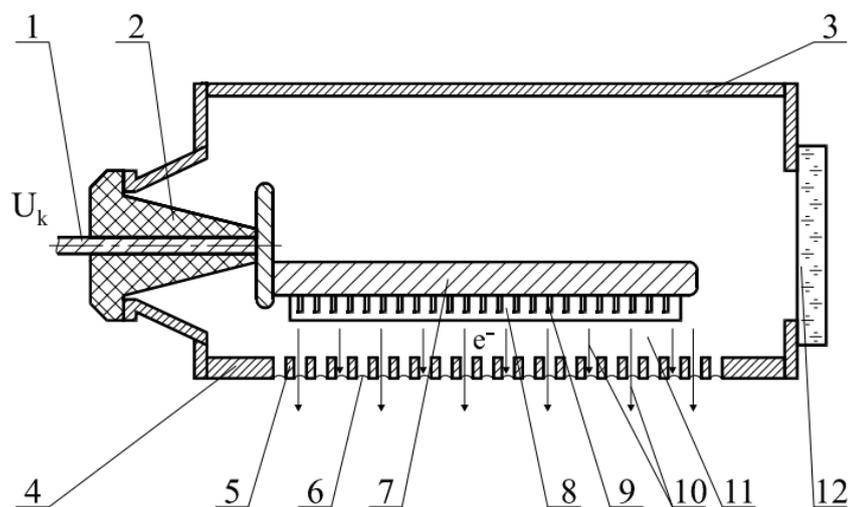


Рисунок 2— Устройство вакуумного диода. 1— высоковольтный токоввод; 2— проходной изолятор; 3— вакуумная камера; 4— опорная плита; 5— водоохлаждаемая решетка; 6— фольга; 7— катод; 8— керамическая пластина; 9— металлические острия; 10— поток электронов; 11— ускоряющий промежуток; 12— окно из оргстекла

Катод представляет собой дюралюминиевый стержень длиной 80 см, в котором закреплены два ряда керамических пластин и два ряда металлических острий, находящихся в упругом контакте с этими пластинами. При подаче импульса напряжения на концах острий возникает ВЭЭ. Выводным окном является медная решетка $85 \times 5 \text{ см}^2$, перекрытая алюминий-магниевой фольгой толщиной 50 мкм. В ускорителе возможно варьировать ток пучка до 1130 А, энергию электронов до 410 кэВ с длительностью на полувысоте 40нс. На частоте 200 Гц средняя мощность пучка достигает 1 кВт при длительной работе ускорителя электронов.

Главным достоинством ускорителей на основе ВЭЭ является возможность получения высоких плотностей тока ($j > 1-10 \text{ А/см}^2$) [10]. Однако за счет дискретности эмиссионных центров и неравномерного заполнения плазмой прикатодной части, в ПБС имеются значительные мелкомасштабные неоднородности. Ограничение длительности импульса временем закорачивания ускоряющего промежутка не позволяет создавать пучки большой длительности, что необходимо в некоторой области применения. Взаимозависимость параметров пучка (энергия электронов, ток пучка, частота следования

импульсов и их длительность) так же затрудняет применение источников электронов на основе ВЭЭ в некоторых научных и промышленных сферах.

2.3 Ускорители электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР)

Относительной простотой конструкции и отсутствием нагревательных элементов обладают ускорители электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда ВТР. Принцип действия таких ускорителей основан на явлении ионно-электронной эмиссии. Существует разновидность несамостоятельного и самостоятельного ВТР. В газонаполненных ($p = 0.1-10$ Па) диодах для генерации самостоятельного ВТР основная часть напряжения, приложенного к диоду, сосредотачивается на слое положительного пространственного заряда, между катодом и анодной плазмой. Условия ($pd \leq 0.1$ Па·м, $E/p \geq 10^3$ кВ/Па·м) обеспечивают большую направленную скорость движения зарядов [19]. Ионы, ускоренные в катодном падении потенциала, а также высокоэнергетичные нейтралы, получаемые перезарядкой ионов, осуществляют бомбардировку катода 1 (рисунок 3). Поступление ионов в область катодного падения потенциала происходит из прианодной плазмы, которая в самостоятельном ВТР образуется в результате взаимодействия с газом электронов, ускоренных в катодном падении, отраженных от стенок камеры и анода 4, и образовавшихся при ионизации.

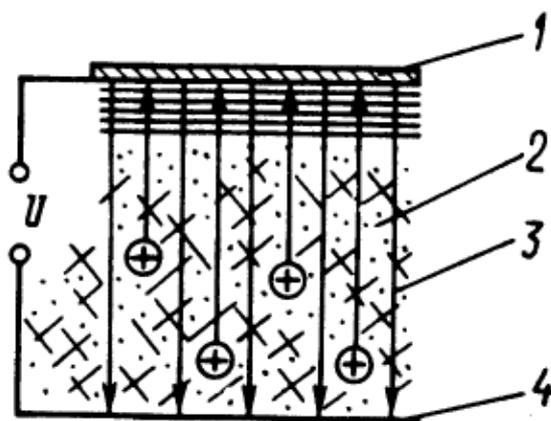


Рисунок 3— Схема плазменного ускорителя электронов на основе самостоятельного ВТР: 1- катод; 2- плазма; 3- пучок электронов; 4- ускоряющий электрод (анод)

Пример ускорителя электронов с несамостоятельным ВТР описан в работе [20]. Генерация электронов в таких ускорителях осуществляется при бомбардировке плоского металлического катода основного ВТР (рисунок 4) быстрыми ионами и нейтралами, извлекаемыми из прианодной плазмы вспомогательного разряда.

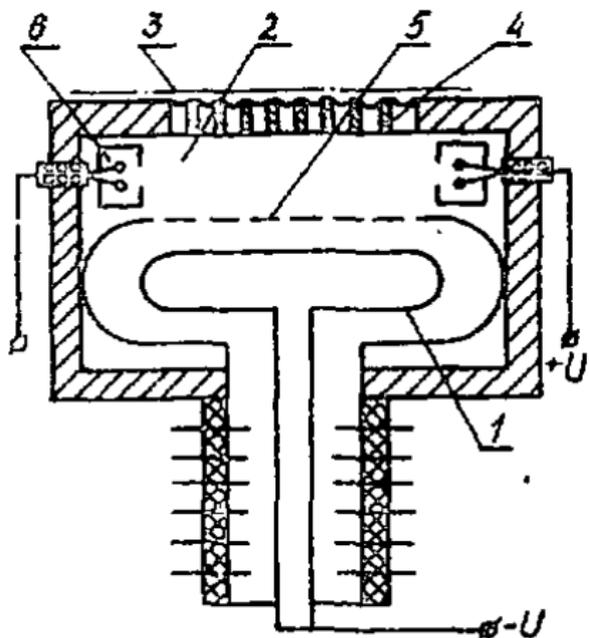


Рисунок 4— Схема ускорителя с несамостоятельным ВТР: 1— Катод ВТР; 2— прианодная дрейфовая полость; 3— фольга; 4— опорная решетка; 5— анод ВТР; 6— проволочный анод вспомогательного разряда

Ионы вытягиваются сквозь перфорированный анод основного разряда и ускоряются к катоду, имеющему потенциал до 300 кВ. Электроны, возникшие в результате ионно-электронной эмиссии, этим же полем ускоряются к аноду и, проходя сквозь его отверстия и опорную решетку с фольгой, выводятся из ускорителя. Генерация прианодной плазмы обеспечивается тонкопроволочным самостоятельным тлеющим разрядом, иногда называемым орбитронным. Вспомогательный разряд поджигается в прианодной дрейфовой полости между анодами – тонкими проволочками и стенками камеры, являющимися катодом для вспомогательного разряда. Разряд может гореть как в импульсно-периодическом (с частотой сотен герц и длительностью до 70 мкс), так и в

непрерывном режиме. В данном ускорителе был получен за фольгой электронный ток 30 А с плотностью превышающей 15 мА/см^2 при следующих параметрах: длительность импульса 25 мкс, ток в ускоряющей промежутке 70 А, величина ускоряющего напряжения 250 кВ. Управление несамостоятельным ВТР (изменение его параметров и характера горения) осуществляется вспомогательным тлеющим разрядом.

В работе [21] описан импульсный источник электронов на основе ВТР, в котором вспомогательным является дуговой контрагированный разряд (рисунок 5). При рабочем напряжении 130 кВ, длительности импульса тока вспомогательного разряда 35 мкс ($I = 40 \text{ А}$) и давления $\text{He} \approx 1 \text{ Па}$ средняя плотность тока в межэлектродном промежутке ВТР достигла 1 А/см^2 .

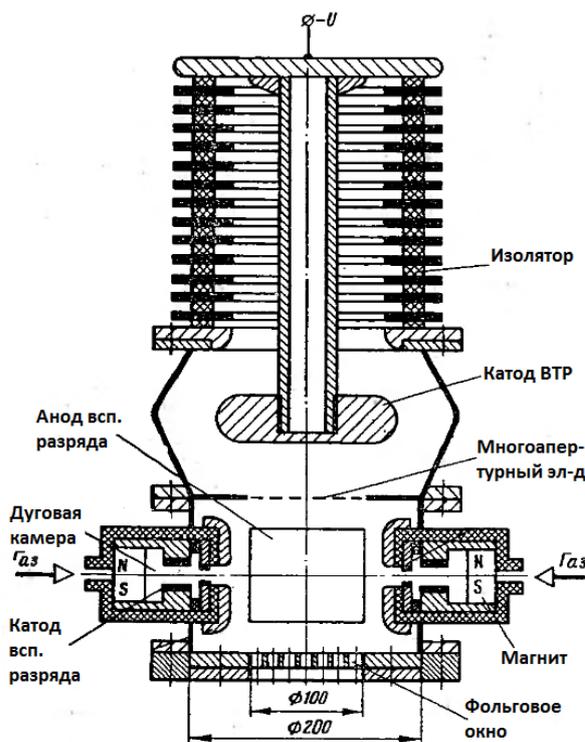


Рисунок 5— Конструкция ускорителя с дуговым вспомогательным разрядом

Срок службы холодного катода в ВТР обратно пропорционален плотности тока разряда и зависит от средней напряженности электрического поля в разрядном промежутке, так как в этом случае при постоянном давлении газа растет средняя кинетическая энергия ионов и быстрых атомов, бомбардирующих катод. Глубина слоя эмиссии составляет $10^{16} - 10^{17} \text{ ат/см}^2$, или

100 200 атомных слоев, что обуславливает большую чувствительность ионно-электронной эмиссии к изменению температуры эмиттера, давления и рода остаточного газа, плотности тока ионов, так как эмиссия под действием ионов может происходить и из слоя адсорбированных атомов газа.

В системах с ВТР особо важным является вопрос электрической прочности промежутка. Наиболее подходящим способом повышения электрической прочности является снижение давления газа, поскольку уменьшение длины промежутка при увеличении напряжения диода резко повышает напряженность электрического поля и увеличивает вероятность вакуумного пробоя диода. Однако снижение давления в диоде уменьшает интенсивность ионизационных и перезарядных процессов в промежутке и их влияние на ток диода, а также ухудшает условия зажигания вспомогательного разряда и уменьшает его ток. По этой причине возникает ограничение по достижению в совокупности высоких значений напряжения и тока диода с ионно-электронной эмиссией.

2.4 Ускорители электронов на основе плазменного эмиттера

В ускорителях с плазменным эмиттером эмиссия заряженных частиц происходит из объемной плазмы, ограниченной мелкоструктурной сеткой. Плазма в объеме создается различными типами газовых и вакуумных разрядов. Ускорение эмитированных частиц происходит полем ускоряющего электрода. Достоинствами ускорителей с таким типом эмиссии являются: простота и механическая надежность конструкции, нечувствительность к загрязнениям и случайным напускам газа, возможность широкого изменения параметров пучка, путем регулирования параметров газоразрядной плазмы, малое время включения, ограниченное формированием разряда, высокая однородность пучка по сечению и др.

В работе [22] описан источник электронов на основе объемного тлеющего разряда с полым катодом (рисунок 6). Образование плазмы происходит между полым катодом 4 и плоским перфорированным анодом 3. Управляющая сетка 2 способствует извлечению электронов из прианодной

области и дальнейшему их ускорению в поле электрода 1. Значительная прозрачность электродов 2 и 3 приводит к равенству давлений в разрядном и ускоряющем промежутках. Работоспособность в таких условиях достигается выбором такой длины ускоряющего промежутка, чтобы предотвратить вакуумный пробой и ограничить зажигание самостоятельного газового разряда. Для зажигания тлеющего разряда с полым катодом при относительно низком давлении в разрядную камеру помещают поджигающий электрод 5 в виде тонкой проволоки. Благодаря малому диаметру поджигающего электрода и нарушению осевой симметрии электрического поля электроны совершают несколько колебаний относительно этого анода, прежде чем попадают на него. При этом достигается увеличение средней длины пролета электронов, что обеспечивает более стабильное зажигание разряда при низком давлении.

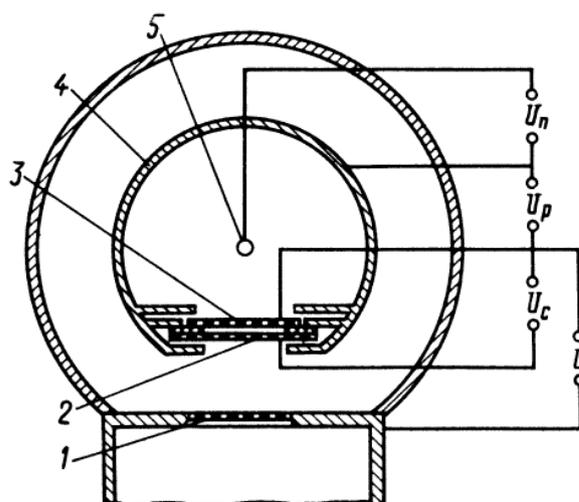


Рисунок 6— Плазменный источник электронов с полым катодом: 1— ускоряющий электрод; 2— управляющая сетка; 3— анод; 4— полый катод; 5— поджигающий электрод

Недостатком такой системы является отсутствие перепада давления между областями генерации плазмы и ускорения электронов, что сужает рабочий диапазон давления и ограничивает электрическую прочность. Регулируемое повышение давления для увеличения плотности плазмы или неконтролируемое повышение давления при работе ускорителя снижает предельное ускоряющее напряжение или сокращает длительность

высоковольтной стадии горения разряда. Снижение давления для повышения электрической прочности ускоряющего промежутка приводит к ухудшению условий зажигания разряда, необходимого для генерации плазмы, и уменьшению разрядного тока. Именно эти факторы объясняют небольшие значения высокого напряжения (около 150 кВ) в системах подобного типа.

Повышенные значения ускоряющего напряжения достигаются в системах с сетчатым плазменным эмиттером на основе объемного дугового разряда с катодным пятном. Это достигается генерацией плазмы необходимой плотности при более низких давлениях и наличием перепада давления между разрядной камерой и ускоряющим промежутком. К тому же, благодаря использованию в эмиттере низковольтной дуги такие ускорители электронов обладают сравнительно высокой энергетической эффективностью и могут обеспечивать ток пучка до 10^3 А.

Существует несколько систем инициирования дугового разряда (рисунок 7) [23]. В варианте, представленном на рисунке 7а, применен контрагированный разряд с холодным катодом в магнитном поле. При подаче напряжения на электроды между полюсными наконечниками магнитной цепи – катодами 1 и рамочным промежуточным электродом 2 зажигается отражательный разряд, переходящий в дугу с катодным пятном, которая вследствие ограничения тока промежуточного электрода 2 перебрасывается через контрагирующий канал в ферромагнитной вставке 3 на полый анод 4 с сетчатым торцом. Благодаря вставке 3 поперечное к оси контрагирующего канала магнитное поле приводит к дополнительному контрагированию разряда неоднородным магнитным полем и практически устраняет отклонение анодной плазмы. Контрагирование разряда обеспечивает постоянство параметров анодной плазмы при миграции катодных пятен по поверхности катодов. В результате напуска газа в катодную часть и перепада давления газа в контрагирующем канале облегчается зажигание вспомогательного отражательного разряда и обеспечивается электрическая прочность ускоряющего промежутка. В разряде на входе в канал контрагирования

образуется двойной электростатический слой с напряжением на нем 40- 60 В. Плазма в анодной полости формируется в результате взаимодействий с газом электронов, ускоренных в этом слое. Увеличение тока выше некоторого предельного значения, зависящего от напуска газа, приводит к обрывам дуги. Причиной обрывов при высокой плотности разрядного тока является интенсивный вынос нейтралов из контрагирующего канала в результате упругих взаимодействий с нейтралами электронов и ионов. Вследствие снижения концентрации нейтралов в канале уменьшаются скорость ионизации и поступление ионов в двойной электростатический слой, что приводит к нарушению условия его стабильности ($I_e/I_i \sim (m_e/m_i)^{1/2}$) и неустойчивому горению дуги [24].

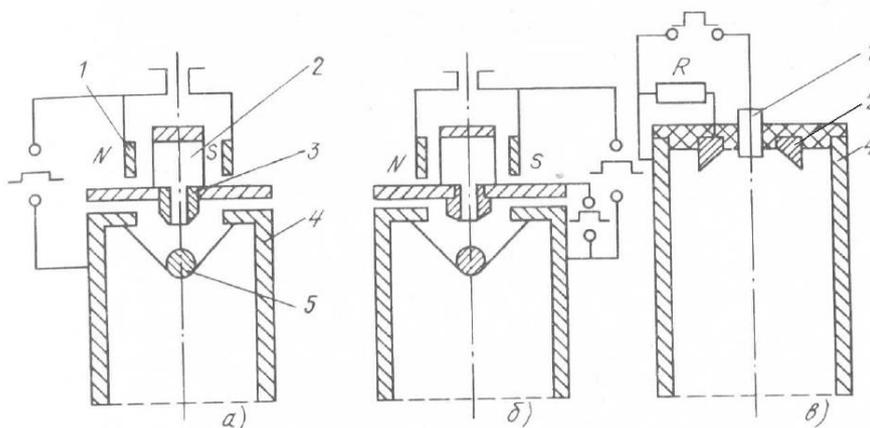


Рисунок 7— Схемы дуговых плазменных эмиттеров: 1– катод; 2– промежуточный электрод; 3– ферромагнитная вставка; 4– полый анод; 5– дополнительный электрод

Другой способ инициирования и режима горения дугового разряда осуществляется электродной системой с дополнительным источником питания между промежуточным электродом и полым анодом (рисунок 7б). Было установлено, что при токах, существенно превышающих ток возникновения обрывов контрагированного разряда, достижение некоторой пороговой плотности плазмы на выходе контрагирующего канала и возникающее при обрывах перенапряжение приводят к образованию катодного пятна на промежуточном электроде вблизи отверстия контрагирующего канала со

стороны полого анода. При этом зажигается и устойчиво горит каскадная дуга, в которой разряд между катодами и полым анодом замыкается через две последовательно горящие дуги: между катодом и промежуточным электродом и между промежуточным электродом и полым анодом [25].

В обоих рассмотренных выше вариантах плазменного эмиттера необходим напуск газа в катодную часть разряда, хотя во втором случае после инициирования дуга может гореть в парах материала электрода. В эмиттере, схема которого приведена на рисунке 7в, дуга между стержневым катодом 1 и полым анодом 4 иницируется разрядом по поверхности диэлектрика между катодом 1 и кольцевым промежуточным электродом, который электрически соединен с полым анодом через резистор R. Зажигание разряда может происходить без специального напуска газа при давлениях $10^{-4} - 10^{-1}$ Па и напряжении 600 В [26]. При R=0 разряд замыкается между электродами 1 и 2 с напряжением горения 40 В. Ток в цепи полого анода при этом не превышает 1% полного тока разряда. По мере увеличения R разрядный ток перераспределяется между электродами 2 и 4 и при R= 10^2 Ом переключается почти полностью на полый анод. В установившемся режиме разряд горит при напряжении 150 – 160 В диффузно во всем объеме полости. Плазма, как и в контрагированной дуге, имеет положительный потенциал относительно анода.

На рисунке 8 представлена конструкция электронного ускорителя для поверхностной модификации материалов [27]. В вакуумной камере 2 на проходном изоляторе 1 установлен плазменный катод 3, в котором реализуется контрагированная сужением или каскадная дуга. Отбор электронов из плазмы происходит через эмиссионное окно диаметром 60 мм, перекрытое сеткой 4 с ячейками $0,5 \times 0,5$ мм. Питание разряда осуществляется от формирующей линии. Постоянное ускоряющее напряжение 200 кВ прикладывается между эмиттером 3 и вакуумной камерой 2. Ускоренный электронный пучок можно принимать на медный коллектор, транспортировать в специальную камеру, где осуществляется поверхностная обработка материалов, или выводить в атмосферу. При транспортировке пучка использовали ЭОС с плазменным

анодом 5, в котором применяются два плазмогенератора 6 на основе дугового разряда, инициируемого разрядом по поверхности диэлектрика.

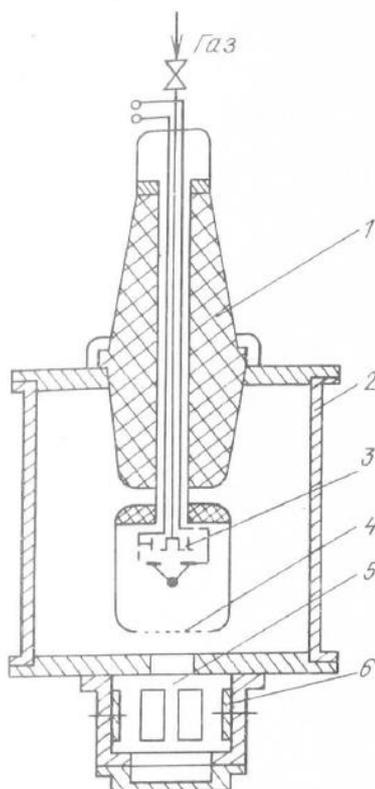


Рисунок 8— Устройство ускорителя электронов: 1— изолятор; 2— вакуумная камера; 3— плазменный катод; 4— сетка; 5— плазменный анод; 6— плазмогенератор

В работе [28] описан источник электронов с пучком большого сечения. Для генерации плазмы использовались два плазмогенератора, оси которых почти перпендикулярны направлению извлечения электронов (рисунок 9). Разрядные камеры 1 с дуговым контрагированным разрядом установлены на торцах анодной полости 2, которая закреплена к вакуумной камере 6 через проходные изоляторы 5. В нижней части анодной полости имеется прямоугольное окно размером 600×150 мм закрытое сеткой 3 с ячейками 0,4×0,4 мм. Параллельность потока электронов обеспечивается прикатодным электродом 4 высотой 30 мм. Электроны выводятся в атмосферу через фольгу 7, наложенную на медную опорную решетку 8, охлаждаемую водой. В ускорителе используется постоянное ускоряющее напряжение (до 300 кВ) при импульсном горении разряда. С помощью этого исключается появление

низкоэнергетичных электронов, возникающих при импульсном ускоряющем напряжении на фронте и спаде импульса.

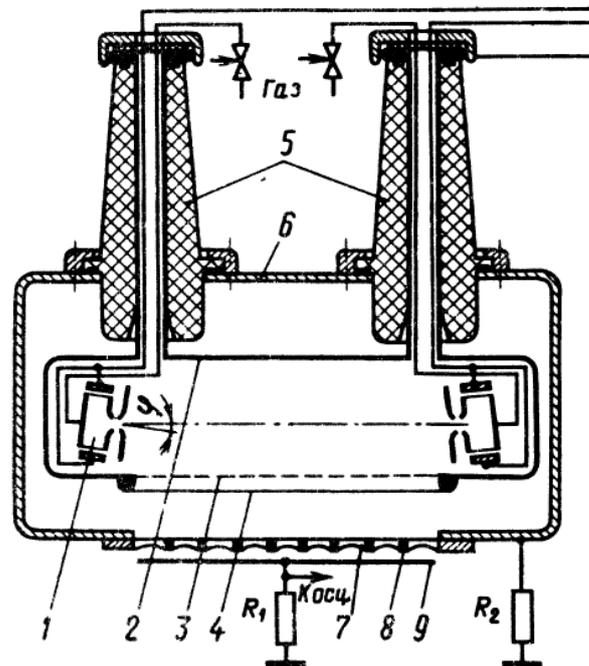


Рисунок 9— Упрощенная конструкция ускорителя электронов

К особенностям эмиттеров электронов на основе дугового разряда низкого давления по сравнению, например, с взрывоэмиссионными катодами следует отнести возможность устойчивой работы в широком диапазоне длительностей импульсов, бóльший ресурс, в частности при дуговом контрагированном разряде, стабильность эмиссионного тока во время импульса и хорошую его воспроизводимость при импульсно-периодическом режиме.

3 Экспериментальная часть

3.1. Описание экспериментальной установки

Исследование проводилось на модернизированном импульсном широкоапертурном ускорителе электронов «ДУЭТ» с сетчатым плазменным катодом. Принципиальная схема ускорителя приведена на рисунке 10.

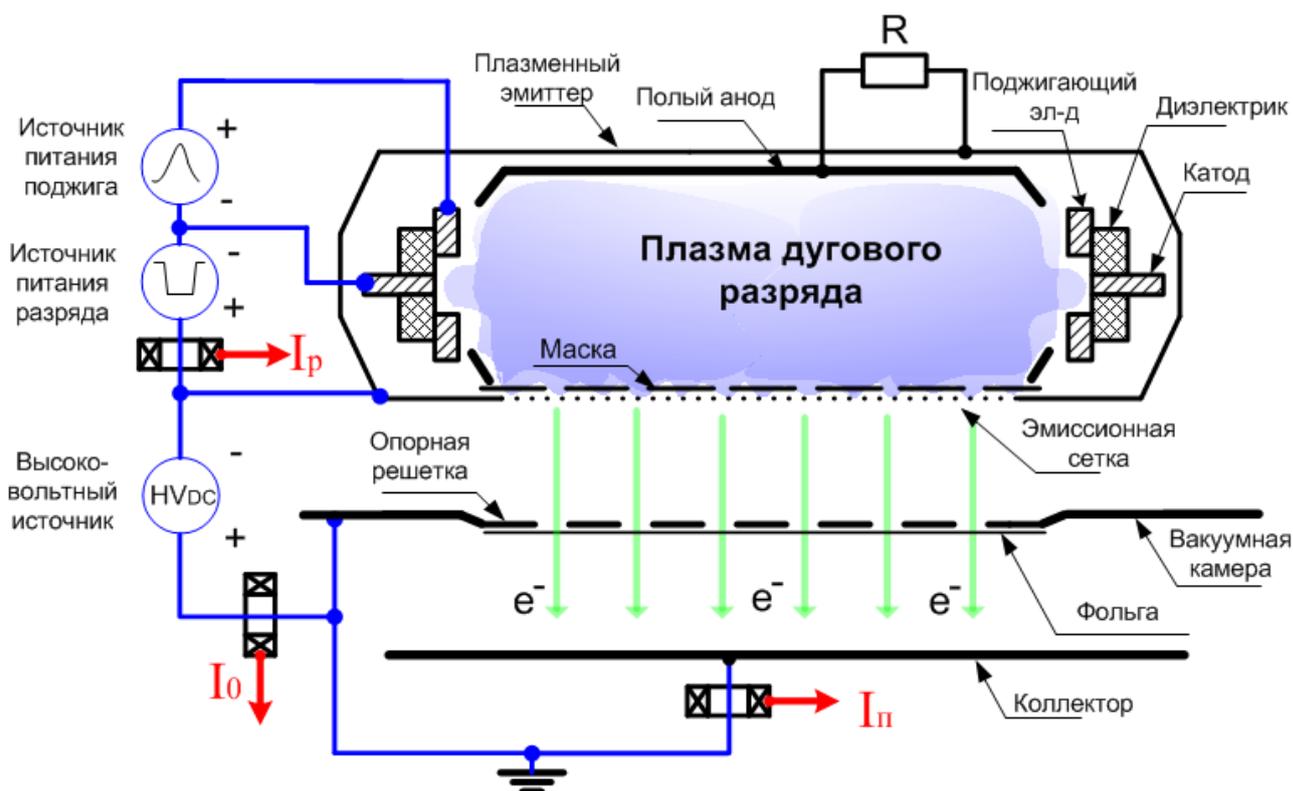


Рисунок 10— Схема ускорителя электронов с сетчатым плазменным эмиттером

В вакуумной камере с размерами 130×80 см на проходном изоляторе закреплен сетчатый плазменный эмиттер, на торцах которого расположены два катодных узла на основе дуги низкого давления с инициированием катодного пятна разрядом по поверхности диэлектрика. Внутренняя поверхность полуцилиндра играет роль общего полого анода для двух катодных узлов. На нижней стороне плазменного эмиттера имеется эмиссионное окно размерами (15×75) см, перекрытое эмиссионной сеткой из нержавеющей стали с размером ячейки (0.4×0.4) мм. Электроны извлекаются из плазмы через ячейки сетки и ускоряются под действием высокого напряжения величиной до 200 кВ, приложенного между эмиссионной сеткой и выпускным фольговым окном,

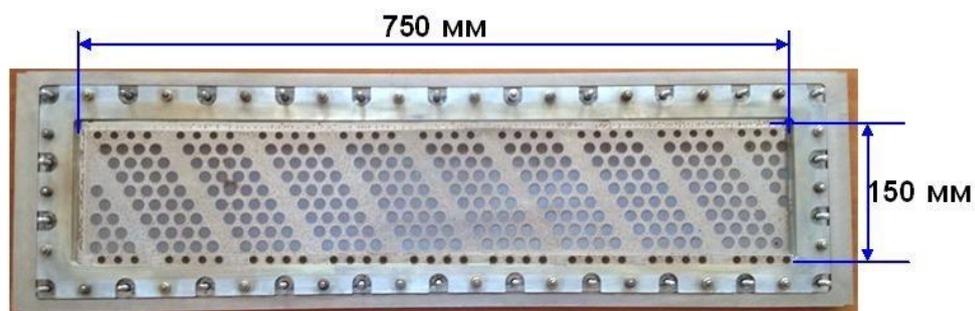
которое представляет собой опорную решетку размерами (15×75) см, перекрытую алюминий-магниевой фольгой толщиной 30 мкм, проходя которую ускоренные электроны выводятся из вакуума в атмосферу. С помощью поясов Роговского измеряется ток дугового разряда, ток эмиссии и ток пучка, выведенный в атмосферу. Внешний вид ускорителя «ДУЭТ» приведен на рисунке 11.



- Энергия электронов (100÷200) кэВ
- Ток пучка (в атмосфере) (2÷30) А
- Длительность импульса (10÷100) мкс
- Частота следования импульсов до 50 с⁻¹
- Поперечные размеры пучка (150×750) мм
- Неравномерность плотности тока по сечению пучка ±10%
- Средняя мощность пучка 4кВт
- КПД ≈60%

Рисунок 11— Внешний вид и параметры ускорителя электронов с сетчатым плазменным катодом

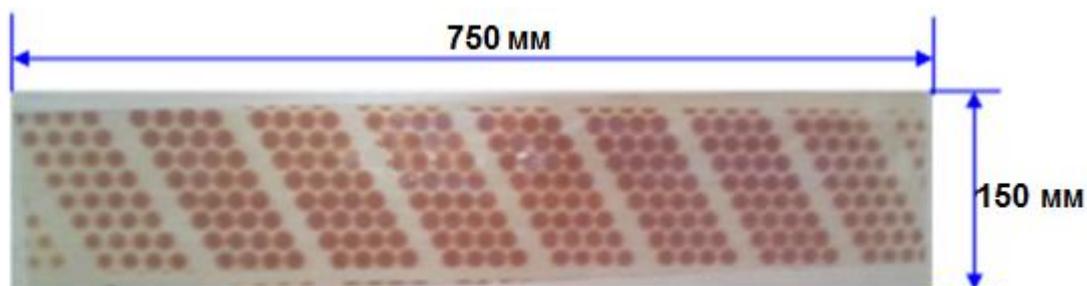
На эмиссионную сетку из нержавеющей стали с размером ячейки 0.4×0.4 мм и геометрической прозрачностью 44% уложена маска из нержавеющей стали толщиной 200 мкм. Маска (рисунок 12а) разделяет эмиссионную поверхность на 344 ячейки диаметром 8-12 мм, которые являются отдельными эмиссионными структурами плазменного эмиттера. В опорной решетке (рисунок 12б) с общей геометрической прозрачностью в 56% имеется такое же количество отверстий, как и в маске, но большего диаметра (15мм). Юстировка отверстий в маске и решетке с достижением соосности позволяет минимизировать потери пучка в опорной решетке выпускного фольгового окна. Таким образом, широкий электронный пучок представляет собой суперпозицию элементарных пучков (рисунок 12в), сформированных отдельными эмиссионными структурами, граница плазмы в которых имеет слоевую (сеточную) стабилизацию.



а)



б)



в)

Рисунок 12— Внешний вид эмиссионного электрода с маской (а) и опорной решетки (б).
Отпечаток электронного пучка на листе винипроза (в)

Рассматриваемый в настоящей работе электронный источник с многоапертурным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы [29] позволяет формировать электронные пучки с заранее прогнозируемой структурой, и достигать за счет этого высоких значений коэффициента вывода тока пучка из вакуума в атмосферу $\beta = I_{IV}/I_0$ и сравнительно низкой неоднородности распределения плотности тока по сечению пучка ($\pm 10\%$) [30].

3.2 Схемы электропитания ускорителя электронов «ДУЭТ»

Источник электропитания разряда построен по схеме «косой полумост» (рисунок 13). При открывании транзисторов однотактного инвертора I напряжение, выпрямленное с помощью выпрямителя R прикладывается от фильтрующей емкости F к двум двухобмоточным дросселям L (на рисунке 13 для упрощения представлен только один дроссель), намотанных с коэффициентом трансформации $n=1$, что позволяет достигать напряжения около $U=300$ В на промежутке катод 4 – полый анод 7 (см. рисунок 10).

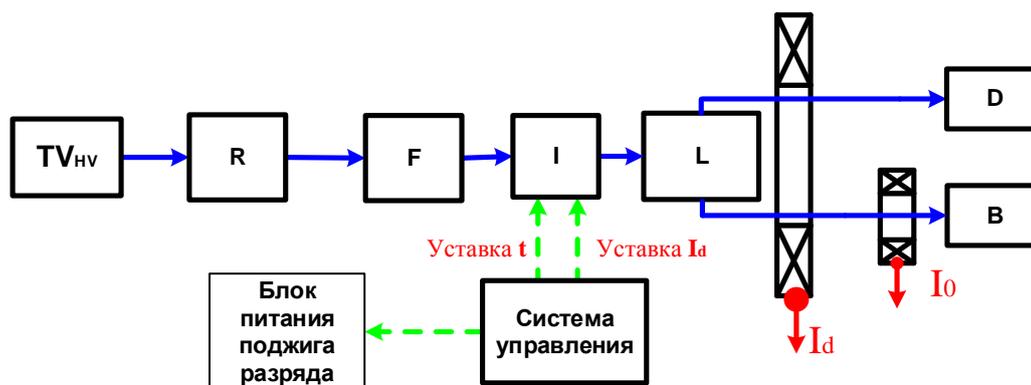


Рисунок 13— Блок-схема источника электропитания разряда: TV_{HV} – высоковольтный разделительный трансформатор; R – выпрямитель; F – фильтр; I – инвертор; L – дроссель; D – нагрузка, когда ток разряда замыкается через полый анод; B – нагрузка, когда ток разряда замыкается через ускоряющий промежуток (электронный пучок). Пунктирными линиями отмечена связь по оптоволокну.

На рисунке 14 индуктивные накопители, обеспечивающие горение дугового разряда, обозначены источниками тока $E1$ и $E2$. Для осциллографирования токов в эмиттере и напряжения горения разряда используются пояса Роговского. Регистрируется ток катода I_1 , I_2 , ток разряда I_d (50 А/В), и ток на полый анод $I_{НА}$ (5 А/В). Для фиксирования напряжения горения разряда U_d используется резистор $R1$ величиной 100 Ом, при чувствительности пояса 4,5 А/В.

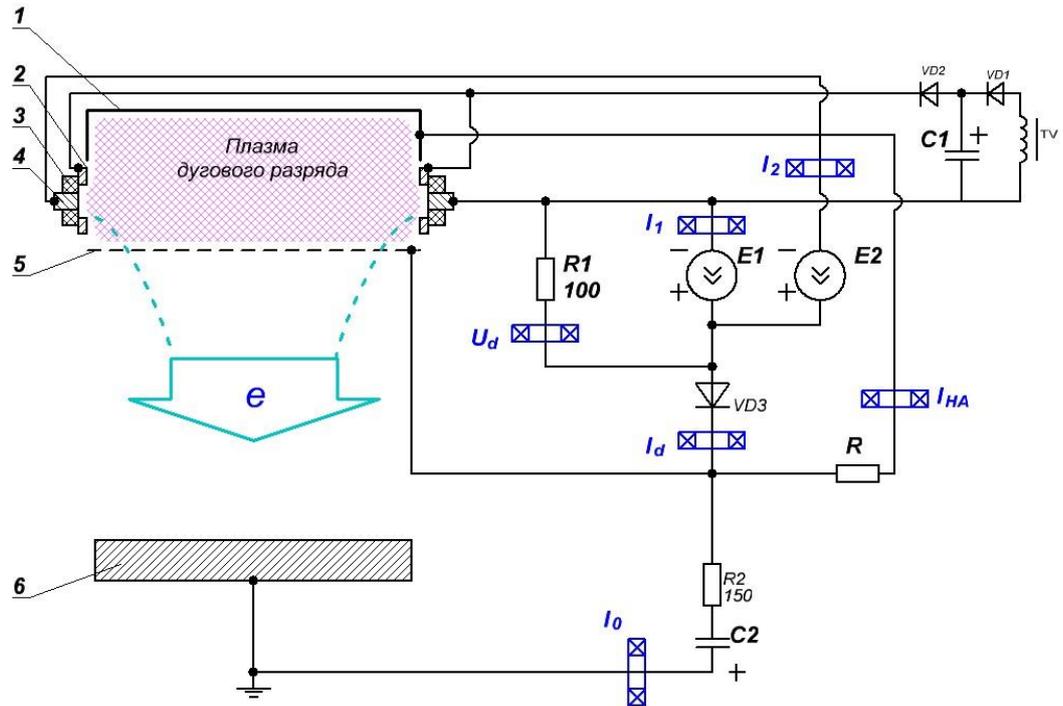


Рисунок 14— Схема работы ускорителя электронов «ДУЭТ»: 1 – полый анод основного разряда; 2 – поджигающий электрод; 3 – диэлектрическая вставка; 4 – катод; 5 – эмиссионная сетка; 6- ускоряющий электрод (коллектор).

Характерная осциллограмма токов и напряжения при работе плазмодгенератора приведена на рисунке 15, из которой видно линейное снижение тока разряда (CH1) и также снижение тока на полый анод (CH3), связанное с переключением дугового разряда в область эмиссионной сетки.

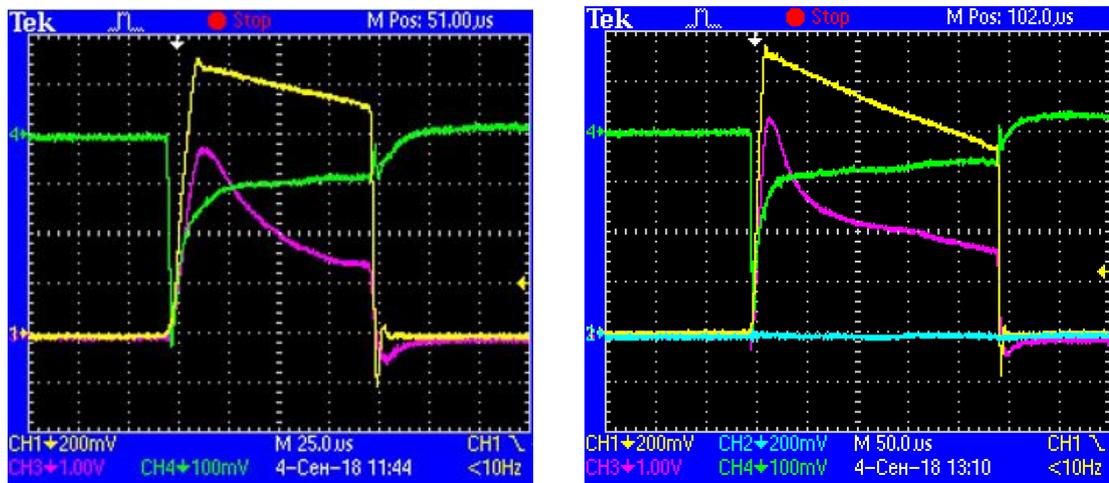


Рисунок 15— Характерные осциллограммы дугового разряда в плазменном эмиттере при длительности импульса 100 и 250 мкс. CH1– Ток разряда I_d , CH3– ток полоого анода I_{HA} , CH4– напряжение разряда. Давление в рабочей камере 40мПа (Ar); $R=0$ Ом

3.3 Схема измерения зондовой характеристики

Сложность построения измерительной системы во многом обусловлена особенностями функционирования электронного ускорителя. Так, для проведения измерений параметров плазмы при извлечении электронов необходимо обеспечить гальваническую развязку как измерительного блока, так и источника смещения потенциала зонда на полную величину ускоряющего напряжения. Для этого было использовано две линии пластикового оптического волокна. Также потребовался дополнительный преобразователь из оптического сигнала в RS-232 для связи измерительной системы с ПК.

Поскольку длина кабеля, соединяющего плазменный катод с его схемами электропитания, достаточно большая (8 м), то за счет наличия паразитных емкостей и индуктивностей этого кабеля это приводит к существенным искажениям зондовых характеристик, полученных автоматизированной системой зондовых измерений, которая обычно находится с атмосферной стороны (в эквипотенциальном экране-чашке – на высоковольтной стороне конденсаторной батареи вместе со схемами электропитания плазменного катода). Поэтому была предложена и смонтирована следующая схема измерения зондовых характеристик (рисунок 16). В вакуумной камере сверху полого анода находилась плата с микроконтроллером (МК) (в металлическом корпусе) и измерительные сопротивления. С помощью МК измерялось напряжение и ток зонда на сопротивлениях R_2 и $R_{ш}$ соответственно. По проводам, подающим питание на МК величиной 3,5 В, происходила передача данных в цифровом виде, чтобы избежать наводок. Второй МК, принимающий данные от МК, установленного в вакууме, находился в чашке на высоковольтной конденсаторной батарее. Также в чашке были размещены плата питания 3.5 В и источник смещения напряжения на зонде, представляющий собой ЛАТР и развязывающий трансформатор TV. Далее по оптоволоконным каналам связи данные переходили на персональный компьютер (ПК) и обрабатывались. На выходе получалась зависимость тока зонда от напряжения смещения на зонд. Синхронизация работы

микроконтроллеров для передачи данных производилась с помощью двух трансформаторов тока, установленных в цепи поджигающего электрода с двух сторон высоковольтного кабеля (один со стороны атмосферы, второй в вакууме).

К зонду прикладывалось импульсное напряжение смещения, что позволяло не только исключить искажения в распределении потенциала пространства в плазменном эмиттере до зажигания разряда, но и снизить габаритную мощность измерительного делителя напряжения разряда R1–R2 (рисунок 16), который вместе с системой измерения расположен в вакуумной камере. Смещение напряжения на зонд подавалось за 30 мкс до измерения рабочей точки и снималось через 30 мкс после измерения. Все зондовые измерения проводились на длительности импульса тока разряда 100 мкс при его общей длительности импульса $t=120$ мкс. Измерение параметров плазмы на меньшей длительности импульса тока разряда было затруднено из-за влияния на измерительные цепи высоковольтного импульса поджига, приводящего к появлению различных электрических наводок.

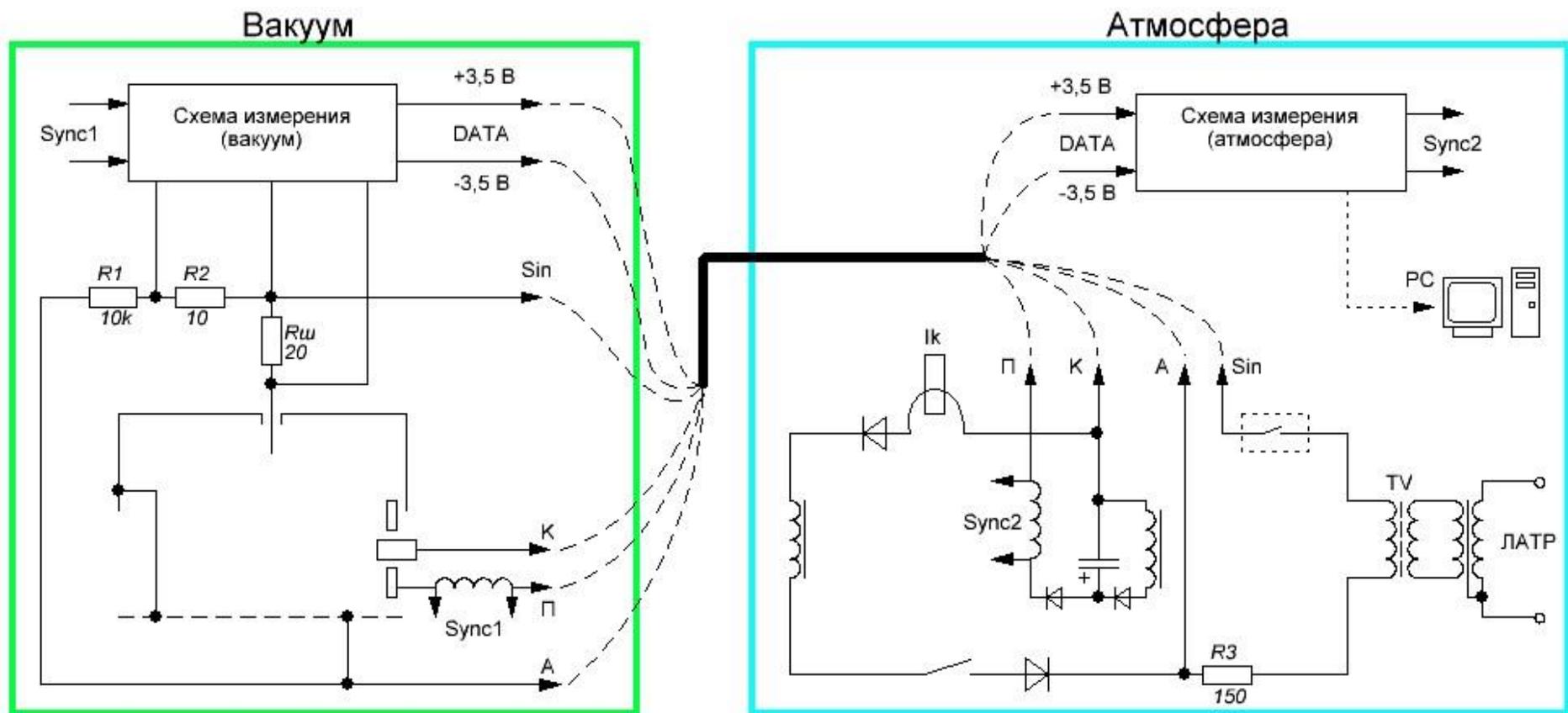


Рисунок 16— Схема измерения зондовых характеристик эмиссионной плазмы

3.4 Получение зондовых характеристик дугового разряда

Определение продольного распределения параметров эмиссионной плазмы осуществлялось с помощью автоматизированной системы измерения и одиночного медного зонда Ленгмюра длиной 5 мм и диаметром 0,3 мм. Для исследования параметров эмиссионной плазмы использовался один плазмогенератор с иницированием катодного пятна разрядом по поверхности диэлектрика. Маска сверху эмиссионной сетки отсутствовала. Зонд устанавливался со стороны полого анода плазменного эмиттера на глубину 60 мм на различных расстояниях от плазмогенератора в единой плоскости параллельной эмиссионной сетке.

Для снятия каждой зондовой характеристики фиксировалось около 2000 точек. За один импульс тока разряда проводилось измерение одной точки. Так, при частоте следования импульсов тока разряда 3 с^{-1} для получения одной зондовой характеристики требовалось около 10 минут. После снятия достаточного количества точек проводилось их усреднение по каждому 10 точкам, и далее строилась конечная зондовая ВАХ разряда (рисунок 17). Расчет параметров плазмы производился по электронной ветви зондовой характеристики. Для получения температуры электронов строилась зависимость натурального логарифма электронного тока от потенциала зонда.

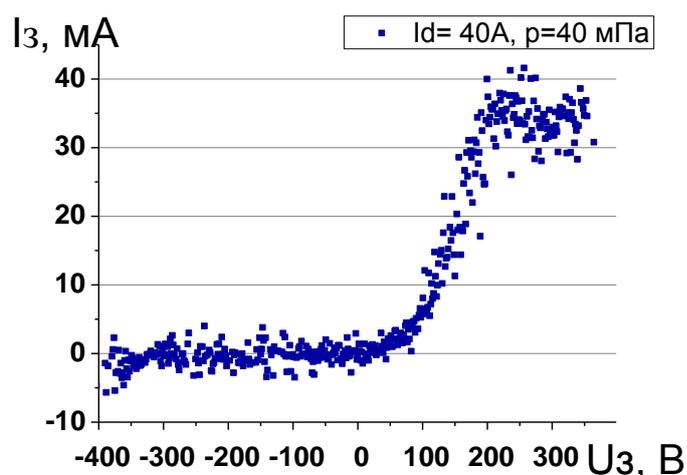


Рисунок 17— Зондовая ВАХ дугового разряда низкого давления: ток разряда $I_d = 40 \text{ А}$, давление в камере $p = 40 \text{ мПа}$ при напуске газа Ar.

При обсчете полученных зависимостей типичное значение концентрации плазмы составило $n \approx 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, при этом температура электронов достигала $T_e \approx 80 \text{ эВ}$. Такие высокие значения температуры объясняются наличием в разряде потока высокоэнергетичных электронов. Также из ВАХ видно, что потенциал плазмы относительно анода разряда является положительным, а его типичная величина составляет $\phi \approx 150 \text{ В}$. Высокий положительный потенциал плазмы, прежде всего, связан с ее высокой температурой, а так же с высоким отношением площади анода к площади катода ($S_a/S_c \geq 3000$) [31].

В работе [32], посвященной исследованию работы электронных ускорителей с эмиттером на основе дугового разряда низкого давления, с помощью экранирования зонда и измерения энергетического спектра было доказано наличие в эмиссионной плазме потока высокоэнергетичных электронов, рожденных, вероятнее всего, в прикатодной области разряда. Наличие потока быстрых электронов приводит к затруднению определения параметров плазмы, вследствие чего было предложено произвести экранирование зонда от потока электронов со стороны плазмогенератора.

Экран был выполнен из фольги из нержавеющей стали, толщиной 50 мкм (рисунок 18, 19). Экран, находящийся под плавающим потенциалом, был удален от коллекторной части зонда на 30 мм с целью отсечь поток высокоэнергетичных электронов без возмущения плазмы вблизи зонда.

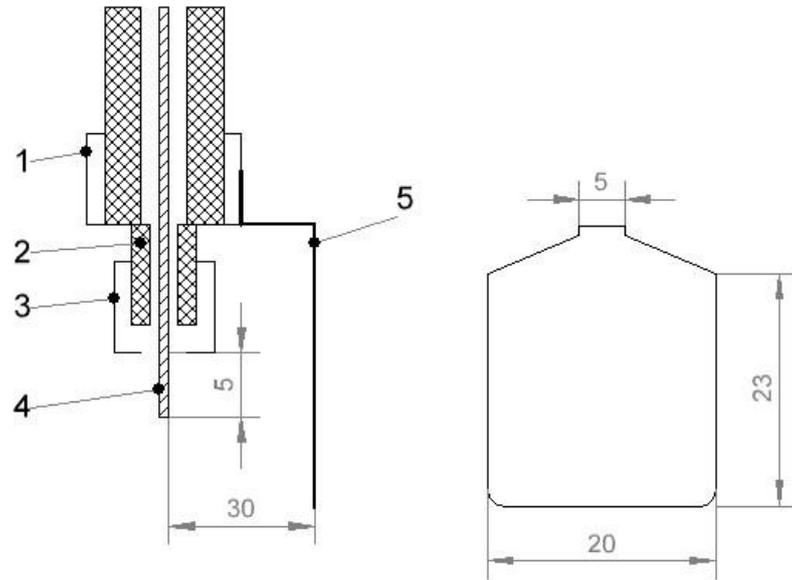


Рисунок 18— Конструкция цилиндрического зонда с экраном: 1—трубка из фольги нержавеющей стали; 2— керамика; 3— трубка из нержавеющей стали; 4— зонд; 5— экран из фольги нержавеющей стали



Рисунок 19— Внешний вид зонда с экраном

В зависимости от режима генерации плазмы в результате экранирования зонда была получена концентрация от 1 до $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, температура электронов снизилась до диапазона (20 – 45) эВ, потенциал плазмы составил (90 – 100) В (рисунок 20). В связи со снижением как температуры электронов, так и потенциала плазмы, можно также сделать вывод о присутствии в плазме дугового разряда потока высокоэнергетичных электронов, энергия которых превышает напряжение горения разряда, что вероятнее всего, связано с наличием горба потенциала в прикатодной области, описанного в работах [33,34].

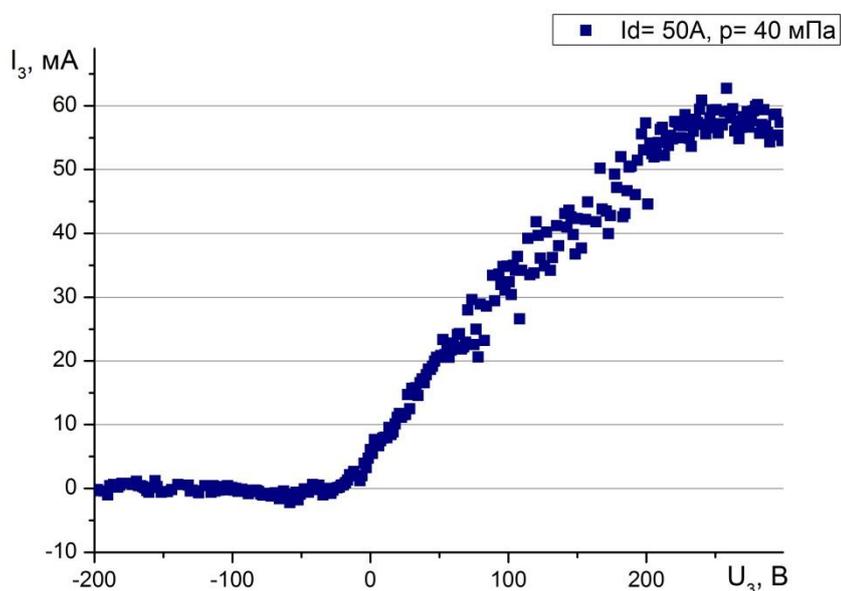


Рисунок 20– Зондовая ВАХ плазмы дугового разряда низкого давления: ток разряда $I_d= 50\text{А}$, давление в камере $p= 40 \text{ мПа}$ при напуске газа Ar. Без экранирования зонда.

Увеличение амплитуды тока разряда приводит к повышению концентрации плазмы, что подтверждается возрастанием тока насыщения зонда (рисунок 21). Повышение концентрации плазмы связано с возрастанием количества заряженных частиц в объеме эмиттера. Вследствие повышения концентрации плазмы происходит снижение температуры электронов, которое подтверждается увеличением угла наклона зондовой характеристики (рисунок 21).

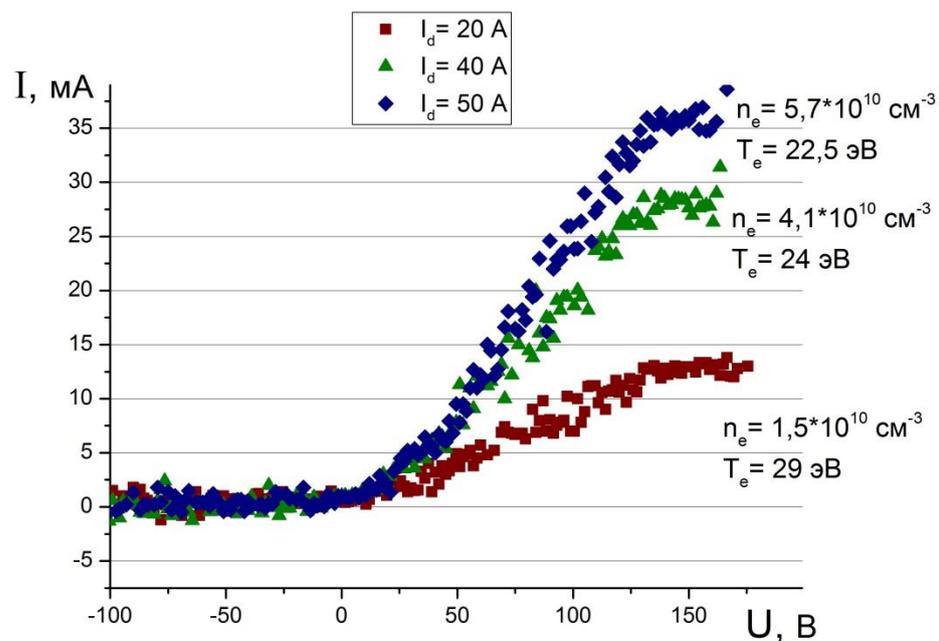


Рисунок 21— Зондовые ВАХ при изменении амплитуды тока разряда I_d , давление рабочего газа Ar $p=40$ мПа.

Изменение давления газа при неизменной амплитуде тока разряда приводит к небольшому увеличению концентрации плазмы. Однако температура электронов в данном диапазоне изменяется незначительно (рисунок 22).

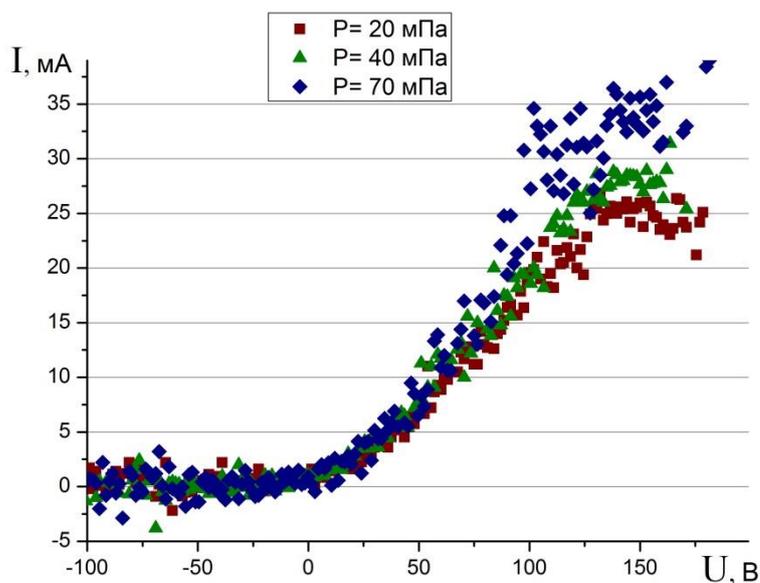
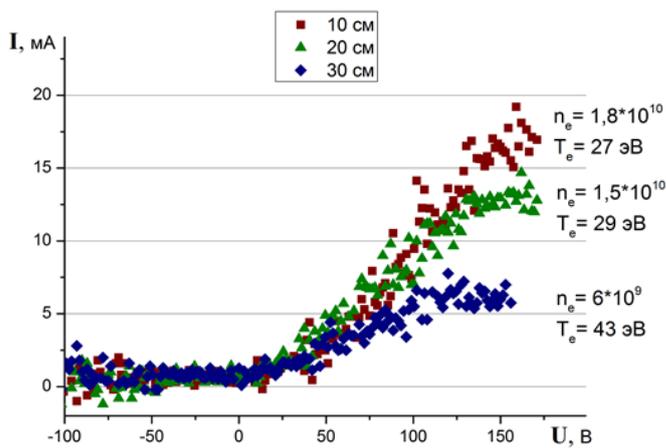
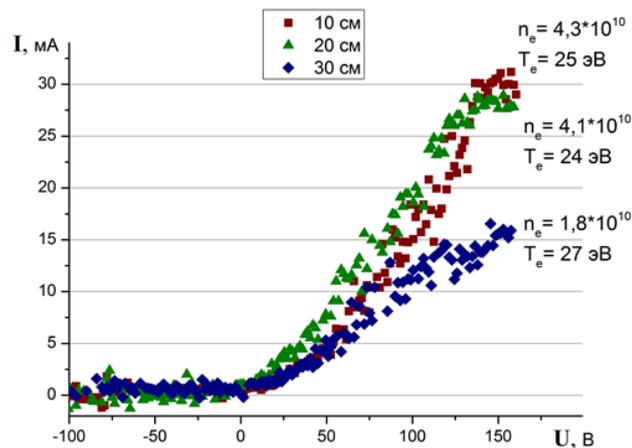


Рисунок 22— Зондовые ВАХ при изменении давления рабочего газа Ar , амплитуда тока разряда $I_d=40$ А.



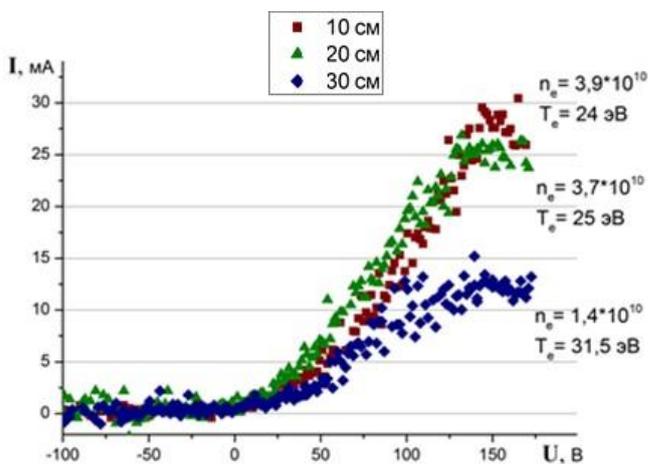
а)



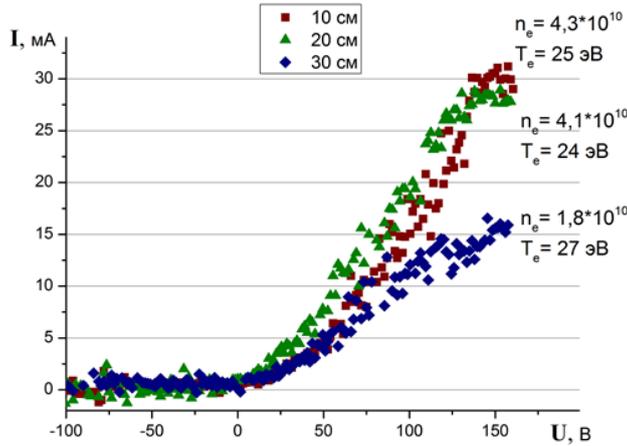
б)

Рисунок 24— Зондовые ВАХ на разном расстоянии от катода дугового разряда: а) $I=20$ А, $p=40$ мПа (Ar); б) $I=40$ А, $p=40$ мПа (Ar)

При изменении давления рабочего газа наблюдается небольшое повышение концентрации плазмы и соответствующее незначительное изменение температуры электронов (рисунок 25).



а)



б)

Рисунок 25— Зондовые ВАХ на разном расстоянии от катода дугового разряда: а) $I=40$ А, $p=20$ мПа; б) $I=40$ А, $p=40$ мПа

Зондовые характеристики при использовании азота в качестве рабочего газа показали такой же характер изменения концентрации и температуры плазмы при удалении зонда от катода (рисунок 26).

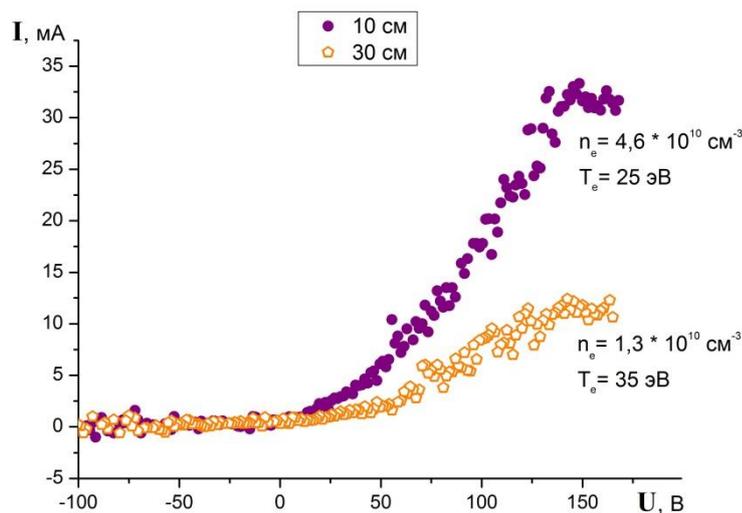


Рисунок 26 — Зондовые ВАХ на разном расстоянии от катода при токе разряда $I = 40$ А, давлении рабочего газа $N_2 = 40$ мПа.

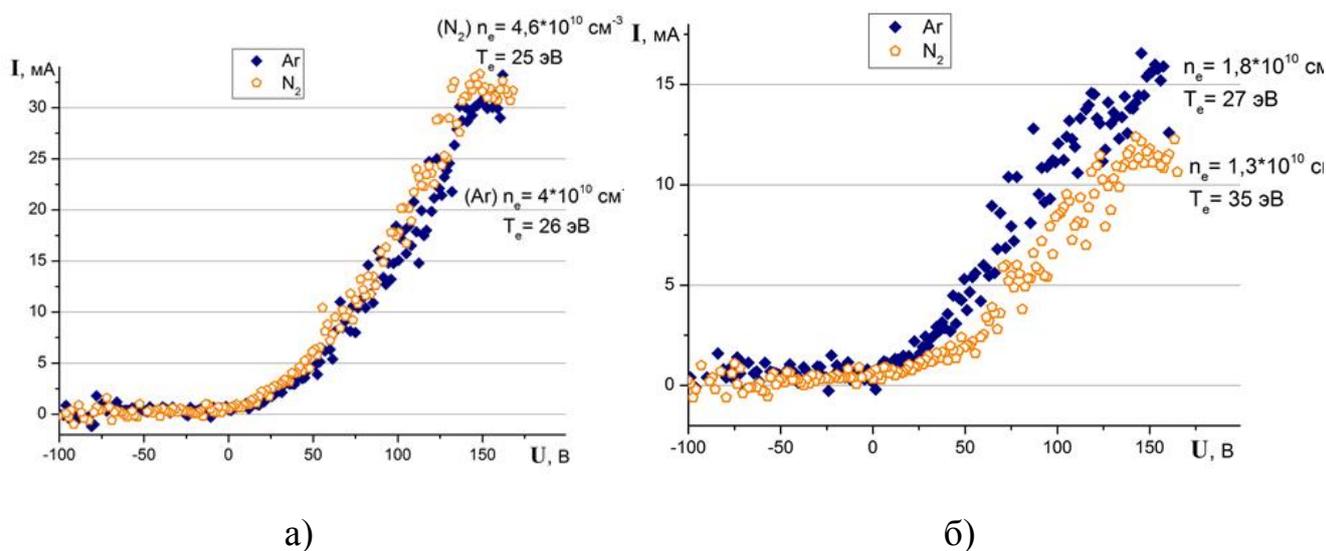


Рисунок 27— Зондовые ВАХ при рабочем газе Ar и N_2 , $p = 40$ мПа, $I = 40$ А на разных расстояниях от катода: а) 10 см; б) 30 см

При сравнении зондовых характеристик с двумя рабочими газами (Ar и N_2) было показано, что на расстоянии 10 см от катода (рисунок 27а) параметры плазмы слабо отличаются. Вероятно, схожесть параметров связана с определяющим действием ионизованных паров металла (Mg) вблизи катода разряда. Однако при удалении на расстояние 30 см (рисунок 27б) наблюдается различие как в концентрации плазмы, так и температуре электронов. Данное поведение параметров может объясняться бóльшим вкладом газовой

составляющей плазмы и связано с отличием в сечении ионизации атомов (рисунок 28) при близких значениях потенциалов ионизации: $U_i(\text{Ar}) = 15,8 \text{ эВ}$; $U_i(\text{N}_2) = 15,6 \text{ эВ}$ [35].

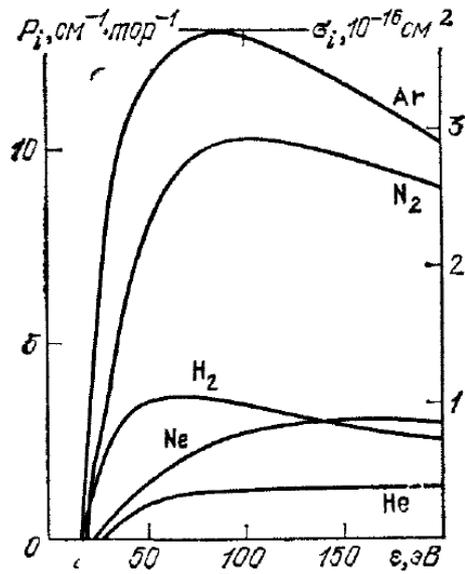


Рисунок 28— Вероятности и сечения ионизации атомов электронным ударом

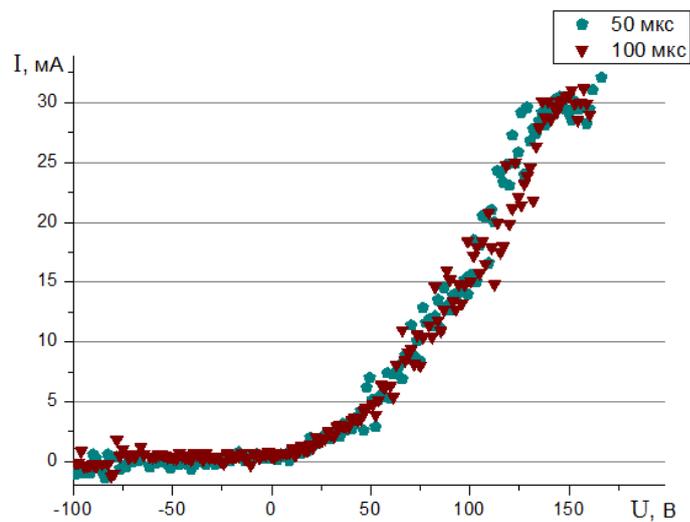


Рисунок 29— Зондовые ВАХ на разной длительности импульса тока разряда

Измерение зондовых характеристик на длительностях импульса тока разряда 50 и 100 мкс показало, что параметры плазмы в этих точках одинаковы в пределах погрешности измерений, что свидетельствует об установившемся режиме работе плазменного эмиттера в данном временном диапазоне (рисунок 29).

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Суть магистерской диссертации заключается в изучении параметров эмиссионной плазмы дугового разряда в широкоапертурном ускорителе электронов «ДУЭТ» с плазменным катодом и выводом пучка в атмосферу. Изучение параметров эмиссионной плазмы необходимо для дальнейшего повышения стабильности работы ускорителя.

Ускорители электронов, позволяющие осуществлять генерацию электронных пучков большого сечения с выводом их в атмосферу, находят все большее применение в промышленности, медицине, сельском хозяйстве и иных сферах деятельности человека. Именно поэтому такие ускорители электронов постоянно совершенствуются, а их разработка и модернизация в первую очередь направлены на расширение предельных параметров генерируемого пучка и на стабильность работы ускорителя в целом.

Целевым рынком для исследуемого ускорителя являются коммерческие и государственные предприятия, нуждающиеся в оборудовании для радиационной обработки различных материалов. Также интерес к таким ускорителям проявляют федеральные и зарубежные институты для проведения научных исследовательских работ.

Сегментировать рынок услуг можно по типу компаний (учреждений) и их принадлежности к стране. Результат сегментирования представлен на таблице 1. Ускоритель электронов «ДУЭТ» ориентирован на российские коммерческие предприятия, нуждающиеся в ускорительной технике для радиационной обработки материалов. Также рассматривается продажа ускорителя в зарубежные страны.

Таблица 1 – Карта сегментирования рынка услуг по необходимости компаний (учреждений) в ускорительной технике

		Тип компаний (учреждений)		
		Коммерческие предприятия	Государственные предприятия	Исследовательские институты
Принадлежность к стране	Россия			
	Зарубежные страны			



Фирма А



Фирма Б



Фирма В

4.1.2 Анализ конкурентных решений

Ускорители, позволяющие создавать электронные пучки большого сечения и при этом выводить их в атмосферу являются привлекательными для производственной сферы. Такие ускорители позволяют увеличить производительность за счет большого сечения пучка, и при этом упрощают технологию обработки за счет вывода пучка в атмосферу.

Существует несколько методов получения электронных пучков. Метод получения определяет конструкцию ускорителя его характеристики. В качестве конкурирующих будем рассматривать два метода:

1. На основе термоэмиссионного катода
2. На основе взрывоэмиссионного катода

Проведем анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 2.

Таблица 2 – оценочная карта сравнения конкурентных технических решений

№	Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
			Бф	Бк1	Бк2	Кф	К1	К2
	1	2	3	4	5	7	8	9
Технические критерии оценки ресурсоэффективности								
1	Ресурс катода	0,2	4	3	3	0,8	0,6	0,6
2	Удобство в эксплуатации	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
3	Габаритные размеры	0,03	3	3	4	0,09	0,09	0,12
4	Энергоэкономичность	0,05	4	3	4	0,2	0,15	0,2
5	Стабильность параметров пучка	0,05	4	5	3	0,2	0,25	0,15
6	Варьирование параметров пучка	0,09	5	2	2	0,45	0,18	0,18
7	Постоянный/ частотно-импульсный режим работы	0,1	5	2	2	0,5	0,2	0,2
8	Сложность конструкции	0,05	5	2	2	0,25	0,1	0,1
Экономические критерии оценки эффективности								
1	Конкурентоспособность продукта	0,06	4	4	4	0,24	0,24	0,24
2	Уровень проникновения на рынок	0,01	2	3	2	0,02	0,03	0,02
3	Цена	0,15	3	3	3	0,45	0,45	0,45
4	Послепродажное обслуживание	0,07	4	3	3	0,28	0,21	0,21
5	Финансирование научной разработки	0,04	4	4	4	0,16	0,16	0,16
	Итого	1	51	40	40	4,04	2,96	3,03

Б_ф– ускоритель с плазменным катодом; Б_{к1}– ускоритель с термокатодом;

Б_{к2}- ускоритель с взрывозмиссионным катодом.

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.

Исходя из проведенного анализа можно заключить, что уязвимость конкурентных технологических решений связана, прежде всего со сложностью варьирования параметров пучка и способностью работы как в частотно-импульсно, так и в постоянном режимах.

Ускорители с термо- и взрывоэмиссионными катодами хоть и имеют схожие коэффициенты конкурентоспособности, все таки владеют преимуществами в определенных качествах. Так ускорители на термокатодах позволяют получать достаточно однородные по сечению пучки и работать долгое время в постоянном режиме. В свою очередь взрывоэмиссионные катоды способны обеспечивать наибольшие значения плотностей тока в пучке.

Преимуществом ускорителей с плазменным катодом является возможность работы как в импульсно-периодическом, так и в постоянном режиме при способности независимо друг от друга изменять параметры пучка(амплитуда тока, частота, длительность) в широких пределах. При этом конструкция ускорителей такого типа является относительно простой.

4.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Матрица составляется на основе анализа рынка и конкурентных технических решений, и показывает сильные и слабые стороны проекта, возможности и угрозы для разработки.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Матрица SWOT представлена в таблице 3.

Таблица 3 – SWOT-анализ

		Сильные стороны	Слабые стороны
		<p>С1. Электронный пучок большого сечения</p> <p>С2. Электронный пучок выводится в атмосферу</p> <p>С3. Независимость параметров пучка друг от друга</p> <p>С4. Экологичность процесса обработки.</p> <p>С5. Высокая развитость технологии</p>	<p>СЛ1. Высокая стоимость ускорителя</p> <p>СЛ2. Большой срок изготовления оборудования в общем</p> <p>СЛ3. Большие суммарные габариты всех частей ускорителя</p>
Возможности		<p>В1С1С3С5. Пучок большого сечения, выведенный в атмосферу, позволяет увеличить скорость обработки и сделать ее удобной, что важно для внедрения в производство.</p>	<p>В1СЛ1. Высокая стоимость ускорителя ограничивает часть предприятий от внедрения технологии</p>
В1	Внедрение технологии обработки на производство		
В2	Законодательное урегулирование радиационной обработки в разных сферах	<p>В2С4. Экологичность процесса обработки является положительной стороной для разрешения и урегулирования законодательно.</p>	<p>В1СЛ3. Большие габаритные размеры ускорителя привносят неудобства для некоторых предприятий</p>
В3	Открытие новой сферы применения подобных ускорителей	<p>В3С3. Независимость параметров пучка расширяет режимы обработки, что позволяет искать новые применения таких ускорителей.</p>	
Угрозы		<p>У1С4 Экологическая безопасность при обработке противостоит ограничению радиационной обработки на законодательном уровне.</p>	<p>У2СЛ1 Значительное повышение комплектующих частей приведет к большей стоимости ускорителя</p>
У1	Законодательное ограничение радиационной обработки		
У2	Значительное повышение стоимости комплектующих частей	<p>У3С3С5 Независимость параметров пучка вместе с технологичностью оборудования способствуют поддержанию хорошего уровня конкурентоспособности</p>	<p>У3СЛ3 Большие габаритные размеры в некоторой степени снижают конкурентоспособность</p>
У3	Появление серьезного конкурирующего решения		

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. Соотношения параметров представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	+	+	+	+
	B2	-	-	-	+	-
	B3	-	+	0	+	-

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		СЛ1	СЛ2	СЛ3
	B1	+	0	+
	B2	-	-	-
	B3	-	-	-

Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	-	-	-	-	-
	У2	+	-	-	-	-
	У3	-	-	-	-	-

Слабые стороны проекта				
Угрозы проекта		СЛ1	СЛ2	СЛ3
	У1	-	-	-
	У2	+	-	-
	У3	+	-	+

Таким образом, исходя из полученной матрицы SWOT-анализа можно сказать, что все сильные стороны исследуемого ускорителя электронов с плазменным катодом способствуют его внедрению в производственную сферу, однако высокая стоимость оборудования и габариты установки могут этому мешать. Из этого можно сделать вывод, что модификация ускорителя должна быть направлена не только на расширение предельных параметров и повышение стабильности работы, но и на снижение габаритных размеров и суммарной стоимости оборудования.

4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

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

Продолжение таблицы 5

12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	2
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	4
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	3
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	50	47

Итоговые значения проработанности научного проекта и знания у разработчика лежат в диапазоне от 40 до 50, что говорит о средней перспективности проекта. Многие аспекты вывода продукта на рынок не были учтены, а также проявляется недостаток знаний. Следовательно, требуется дополнительные затраты на наём или консультации у соответствующих специалистов.

4.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Перспективность данного научного исследования выше среднего, поэтому не все аспекты рассмотрены и изучены. Основным методом коммерциализации является инжиниринг, который заключается в проектировании, строительстве и вводе объекта в эксплуатацию. Главная задача заключается в демонстрации результатов обработки электронным пучком в некоторой сфере и внедрении ускорителя на производство. Так же рассматривается организация совместных предприятий, работающих по схеме «российское производство– зарубежное распространение»

4.2 Инициация проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта.

4.2.1 Цели и результаты проекта

Перед определением целей необходимо перечислить заинтересованные стороны проекта. Информация по заинтересованным сторонам представлена в таблице 6:

Таблица 6 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
Молодые сотрудники и студенты	Получение квалификационного опыта
Поставщики комплектующих	Новые заказы на материалы и оборудование
Научный руководитель, студент	Выполненная магистерская диссертация
Сотрудники, работающие на ускорителе	Получение информации, которая послужит для повышения стабильности работы ускорителя
Лаборатория, к которой принадлежит ускоритель	Опубликование статей по проведенному исследованию

Цели и результат проекта представлены в таблице 7:

Таблица 7 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Исследование пространственно-временных характеристик плазмы дугового разряда низкого давления
Ожидаемые результаты проекта:	Получение характеристик плазмы (температура электронов, потенциал плазмы, концентрация плазмы) в различных условиях ее генерации (давление газа, сопротивление в цепи разряда, ток разряда).
Критерии приемки результата проекта:	Получение характеристик плазмы и их зависимостей, которые вписываются в придерживаемую модель и литературные данные
Требования к результату проекта:	Требование: Получение конечных параметров эмиссионной плазмы дугового разряда (температура электронов, потенциал плазмы, концентрация плазмы) Схожесть с литературными данными.

4.2.2 Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованы в рамках данного проекта. Эта информация представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения
1.2.3.1 Бюджет проекта	600 000 рублей
1.2.3.1.1 Источник финансирования	ЛПЭЭ ИСЭ
1.2.3.2 Сроки проекта	01.01.2018 – 31.05.2019
1.2.3.2.1 Фактическая дата утверждения плана управления проектом	10.11.2018
1.2.3.2.2 Плановая дата завершения проекта	31.05.2019

4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

4.3.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. На рисунке 1 представлен шаблон иерархической структуры.



Рисунок 29 – Иерархическая структура по ВКР

4.3.2 Иерархическая структура работ проекта

В рамках данного проекта определяются ключевые события проекта, определяются их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты.

Таблица 9 - Контрольные события проекта.

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат
1	Составление технического задания	10 ноября 2018 г.	Заключение договора
2	Изучение научной и технической литературы	10 января 2019 г.	Отчёт о проделанной работе
3	Изготовление зонда	5 февраля 2019 г.	Готовый зонд с экраном
4	Монтаж системы измерения	10 февраля 2019 г.	Подключенная система измерения
5	Проведение зондовых измерений плазмы	20 февраля 2019 г.	Зондовые характеристики
6	Расчет параметров плазмы по полученным данным	20 марта 2019 г.	Параметры плазмы
7	Интерпретация полученных зависимостей	15 апреля 2019 г.	Сформулированные закономерности

4.3.3 План проекта

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде таблицы 10 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 10 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Код работ (из ИСР)	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																	
				Янв.			Февр.			Март			Апр.			Май.			И юн ь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1		
1	Выбор направления исследования	Р, С	5	■																	
2	Описание требований	Р	10	▨																	
4	Составление технического задания	Р	10		▨																
5	Изучение литературы	С			■	■	■														
6	Подготовка ускорителя для исследуемых работ	С					■														
7	Изготовление зонда с экраном	С					■														
8	Монтаж системы измерения	С	20				■	■													
9	Проведение зондовых измерений плазмы	С	40					■	■	■											
10	Расчет параметров плазмы по полученным данным	С	80							■	■	■									
11	Интерпретация полученных зависимостей	С, Р	40									■	▨								
12	Написание документации	С	20											■	■						
13	Проверка работы	С, Р	20														▨				
14	Подготовка презентации	С, Р	50															■	▨		

▨ – Руководитель(Р)

■ – Студент (С)

4.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных работ;
- заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые фонды);
- накладные (прочие) затраты.

4.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье занесены в таблицу 11.

Таблица 11– Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Плата управления	-	2	2200	4400
Вторичный источник питания	EPS- 15-15	1	600	600
Вторичный источник питания	EPS-15-3.3	1	500	500
Радиоэлементы для системы измерения	-	1	3000	3000
Баллон с аргоном	40 л	1	4800	4800
Баллон с азотом	40 л	1	4400	4400
Тороидальный сердечник	B64290L0659X830	2	150	300
Намоточный провод	ПЭТВ-2; 0,236 мм	1	630	630
Всего за материалы				18630
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				19561
Итого по статье C_m				19561

4.4.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ и амортизация

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по исследованию параметров эмиссионной плазмы ускорителя электронов. При покупке оборудования учитывались затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его стоимости. Данные по расчету спецоборудования приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Срок эксплуатации, кол-во лет	Амортизационные отчисления, за год тыс. руб.	Амортизационные отчисления на проект, тыс. руб
1.	Персональный компьютеры	40	6	6,64	3,32
2.	Корпус ускорителя электронов	3250	25	130	65
3.	Конденсаторная батарея с системой питания плазменного эмиттера	3900	25	156	78
4	Стойка управления	195	15	13	6,5
5	Вакуумная система	950	20	47,5	23,75
Итого				353,14	176,57

Амортизационные отчисления рассчитывались по линейному способу. Срок эксплуатации соответствует амортизационным группам, к которым принадлежит оборудование.

4.4.3 Заработная плата

Статья включает заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, включая премии и доплаты. Действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (в рабочих днях) (таблица 13).

Таблица 13 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистр
Календарное число дней	182	182
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	55	55
- праздничные дни		
Потери рабочего времени		
- отпуск	-	-
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	127	127

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + k_{пр} + k_d + k_p), \quad (2)$$

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

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

k_d – коэффициент доплат и надбавок 0,2

k_p – районный коэффициент 0,3 (для Томска).

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 14

Таблица 14 – Результаты расчета основной заработной платы

Исполнители	Z_{tc} , руб.	k_p	Z_m , Руб.	$Z_{п}$, (за время проекта) руб.
Руководитель	17000	1.3	30600	153000
Магистрант	2832	1,3	5097,6	25488
Итого по статье $Z_{п}$:				178488

4.4.4 Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot Z_{\text{п}} = 0,3 \cdot 178488 = 53546 \text{ руб.} \quad (3)$$

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

4.4.5 Накладные расходы

В эту статью относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. Для ИСЭ накладные составляют 15% от суммы всех статей

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = K_{\text{накл}} (C_{\text{м}} + C_{\text{об}} + Z_{\text{п}} + C_{\text{внеб}}) \quad (4)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

$$C_{\text{накл}} = 0,15 \cdot (19561 + 178488 + 176570 + 53546) = 64225 \text{ руб.}$$

4.4.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 15.

Таблица 15 – Бюджет затрат НТИ

№	Затраты по статьям					
	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Заработная плата	Накладные расходы	Отчисления на социальные нужды	Итого плановая себестоимость
1	19561	176570	178488	64225	53546	492390
2	30000	450000	250000	113250	82500	950750

В результате было получено, что бюджет затрат НТИ составит 492390 рублей. При этом затраты у конкурентов составляют 950750 рублей, из чего можно сделать вывод, что исследование является экономичнее, чем у конкурентов. В качестве конкурента здесь выступает ускоритель электронов на основе термокатода. Цены оборудования конкурентов брались из документации по ускорителю электронов с термокатодом, который находится в лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН.

4.5 Организационная структура проекта

В практике используется несколько базовых вариантов организационных структур: функциональная, проектная, матричная.

Для выбора наиболее подходящей организационной структуры можно использовать таблице 16.

Таблица 16 – Выбор организационной структуры научного проекта

Критерии выбора	Функциональная	Матричная	Проектная
Степень неопределенности условий реализации проекта	Низкая	Высокая	Высокая
Технология проекта	Стандартная	Сложная	Новая
Сложность проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимозависимость между отдельными частями проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Критичность фактора времени (обязательства по срокам завершения работ)	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимосвязь и взаимозависимость проекта от организаций более высокого уровня	Высокая	Средняя	Низкая

В данном случае выбор лежит к проектной структуре проекта из-за особенностей разработки. Составляющая проекта является модульные системы, работающие в постоянном взаимодействии с другими модулями. Также

основной причиной выбора проектной структуры является то, что технология проекта является новой, и имеются ограниченные сроки реализации.

4.5.1 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта. Пример плана управления коммуникациями приведен в таблице 17.

Таблица 17 – Пример плана управления коммуникациями

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
1	Статус проекта	Руководитель проекта	Представителю заказчика	Ежеквартально (первая декада квартала)
2	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель проекта	Участникам проекта	Еженедельно (пятница)
3	Документы и информация по проекту	Ответственное лицо по направлению	Руководителю проекта	Не позже сроков графиков и к. точек
4	О выполнении контрольной точки	Исполнитель проекта	Руководителю проекта	Не позже дня контрольного события по плану управления

4.5.2 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информацию по данному разделу необходимо свести в таблицу (таблица 18).

Таблица 18– Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Выход из строя системы измерения	2	2	5	средний	Иметь в наличии запасных комплектующих	Нежелательный контакт с токоведущими частями
2	Неточность полученных данных	2	3	4	средний	Наработать статистику измерений	Помехи в контуре измерения
3	Потеря осциллографических данных	4	1	4	средний	Производить копирование полученных данных	Потеря данных в связи с выходом из строя запоминающих устройств
4	Человеческий фактор	2	1	3	низкий	Дополнительное проведение инструктажей	Невнимательность персонала при работе
5	Недостаточная компетентность персонала	2	1	1	низкий	Работа в присутствии компетентных работников	Незнание персонала при проведении работы

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

4.6.1 Оценка абсолютной эффективности исследования

В основе проектного подхода к инвестиционной деятельности предприятия лежит принцип денежных потоков (cash flow). Особенностью является его прогнозный и долгосрочный характер, поэтому в применяемом подходе к анализу учитываются фактор времени и фактор риска. Для оценки общей экономической эффективности рекомендуется в качестве основных показателей использовать:

- Чистый доход (ЧД);
- Чистый дисконтированный доход (ЧДД);
- Внутренняя норма доходности (ВНД);
- Потребность в дополнительном финансировании (ПФ);
- Срок окупаемости;
- Индексы доходности затрат и инвестиций (ИД, ИДД).

Чистым доходом называется накопленный эффект (сальдо денежного потока) за расчетный период, где суммирование распространяется на все шаги расчетного периода. Другим важнейшим показателем эффективности проекта является чистый дисконтированный – накопленный дисконтированный эффект за расчетный период. Дисконтирование представляет собой приведение доходов и расходов будущих периодов к текущему моменту с учетом временной стоимости денежных средств. Коэффициент дисконтирования (Кд) определяется по формуле:

$$K_d = \frac{1}{(1+E)^t} \quad (5)$$

где E– ставка дисконтирования за период;

t– порядковый номер периода с начала реализации проекта.

Определим ЧД и ЧДД. Будем считать, что продолжительность шага расчета равна одному году. Предполагается, что поступления денежных средств заносятся в таблицу со знаком "+", а расходование (оттоки) - со знаком "-". Составим план денежных потоков:

Таблица 19– План денежных потоков

№	Показатель, тыс.руб	Номер шага (периода)расчета (t)					
		0	1	2	3	4	5
Операционная деятельность							
1	Выручка без НДС	0,0	650	730	820	925	1100
2	Полные текущие издержки, в том числе:	0,0	-512,4	-509	-520,3	-528,2	-536,1
3	Прямые материальные затраты	0,0	-19,6	-10,1	-10,3	-10,4	-10,1

Продолжение таблицы 19

4	ФОТ основных рабочих, включая взносы во внебюджетные фонды	0,0	-53,5	-54,5	-56,4	-57,6	-59,2
5	Электроэнергия	0,0	-20	-20	-23	-25	-26
6	Накладные расходы	0,0	-64,2	-67,4	-70,5	-72,2	-73,9
7	Расходы на з/п	0,0	-178,5	-180,4	-183,6	-186,4	-190,3
8	Расходы на спец. оборудование	0,0	-176,6	-176,6	-176,6	-176,6	-176,6
9	Денежный поток от производственной (операционной) деятельности (п.1-п.2)	0,0	137,6	221	299,7	396,8	563,9
Инвестиционная деятельность							
10	Поступление инвестиций	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	Капитало-вложения, обслуживание инвестиций	-600	-150	0,0	0,0	0,0	0,0
12	Сальдо от инвестиционной деятельности (п.10+п.11)	-600	-150	0,0	0,0	0,0	0,0
13	Сальдо суммарного потока (п.9+п.12)	-600	-12,4	221	299,7	396,8	563,9
14	Сальдо накопленного потока	-600	-612,4	-391,4	-91,7	305	868,9
15	Коэффициент дисконтирования при ставке дохода 10%	1,00	0,909	0,826	0,751	0,683	0,621
16	Дисконтированное сальдо суммарного потока (п.13*п.15)	-600	-11,3	182,5	225,1	271	350,2
17	Дисконтированные инвестиции (п.11*п.15)	-600	-136,4	0	0	0	0

Чистый доход (ЧД) из таблицы составляет 868,9 тыс. руб. Определим ЧДД проекта при норме дисконта $E=10\%$, приводя поток к шагу 0 ($t_0=0$). ЧДД определяется суммированием строки 16: $ЧДД= 417,5$. Таким образом, приведенный проект эффективен.

ВНД определяется по строке 13 подбором значения нормы дисконта. ВНД получается 26,8%, что тоже подтверждает эффективность проекта, так как $ВНД > E$. Потребность в финансировании (ПФ) определяется по 14 строке и равно 612,4 тыс. руб.

Из таблицы 19 видно, что момент окупаемости проекта лежит внутри 4 периода. Для более точного расчета воспользуемся формулой (6), при этом считаем, что сальдо накопленного потока меняется линейно. Время от начала периода до момента окупаемости рассчитывается:

$$t = \frac{-C_{нз}}{C_{сумм4}} = \frac{91,7}{396,8} = 0,23 \text{ года} \quad (6)$$

где $C_{сумм4}$ – сальдо суммарного потока 4 периода,

$C_{нз}$ – сальдо накопленного потока 3 периода.

Срок окупаемости, отсчитанный от начала нулевого периода, составляет 4.23 года, если же считать его от начала операционной деятельности (конец нулевого периода), он окажется 3.23 года.

Индекс доходности инвестиций (ИД) – отношение суммы доходов от производственной (операционной) деятельности к абсолютной величине капитальных вложений:

$$ИД = 1 + \frac{ЧД}{К} = 1 + \frac{868,9}{750} = 2,16 \quad (7)$$

Для определения дисконтированного индекса доходности (ИДД) найдем сумму дисконтированных инвестиций (ДК). Для всех инвестиций ДК равна абсолютной величине суммы элементов строки 17, т.е. $ДК= 736,4$ тыс. руб.

$$ИДД = 1 + \frac{ЧДД}{ДК} = 1 + \frac{417,5}{736,4} = 1,56 \quad (8)$$

Так как $ЧДД > 0$, то и $ИДД > 1$.

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в

целом или отдельных категорий населений или групп лиц, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты.

В таблице 20 приведена социальная эффективность исследуемого в работе ускорителя электронов при условии, что он будет внедрен в аграрную промышленность по радиационной обработке предпосевных зерновых культур.

Таблица 20– Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Уничтожение посевных зерен за счет насекомых и болезней.	Дезинсекция зерна увеличит объем проросшего зерна
Относительно долгое время всхожести зерна.	Радиационное стимулирование проростков уменьшит время всхожести в несколько раз
Относительно высокая цена на продукты питания, основанные на использовании зерновых культур	Цена на продукты питания, основанных на зерновых культурах, снизится за счет увеличения количества зерна
Негативное отношение общества на радиационную обработку пищевой продукции	Знание о положительных эффектах обработки общество станет более нейтрально относиться к радиационной обработке продуктов.

Таким образом, в ходе проведения анализа показателей инвестиций была получен чистый дисконтированный доход (ЧДД) – 417,5 тыс. руб. из которого следует, что проект можно считать выгодным, т.к. является положительным. Срок окупаемости от начала операционной деятельности составляет 3.23 года. Внутренняя норма доходности составляет 26,8%, что подтверждает инвестиционный проект оправданным, т.к. выполняется $ВНД > E$ (норма дисконта). Индекс доходности составляет 2,16 и вдобавок говорит о приемлемости инвестиции.

4.6.2 Оценка сравнительной 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. Рассматривается три типа исполнения, где исполнение 1– текущий проект; исполнение

2-применение другого типа высоковольтного кабеля меньшей длины, но с большим количеством токоведущих жил; исполнение 3– использование другого высоковольтного кабеля, а также дополнительных новых источников электропитания как самого разряда, так и системы измерения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (9)$$

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

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

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

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}1} = \frac{381394}{600000} = 0,635; \quad I_{\text{финр}}^{\text{исп}2} = \frac{450000}{600000} = 0,75; \quad I_{\text{финр}}^{\text{исп}3} = \frac{600000}{600000} = 1$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (10)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы (таблица 21).

Таблица 21 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта.

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Исп.1 Текущий проект	Исп.2 Аналог 1	Исп.3 Аналог 2
1. Удобство в эксплуатации	0,1	4	3	5
2. Надежность	0,15	4	3	3
3. Помехоустойчивость	0,15	4	3	2
4. Энергосбережение	0,05	5	3	3
5. Цена	0,2	5	4	2
6. Габариты	0,1	3	4	2
ИТОГО	1	25	20	17

$$I_{p-исп1} = 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,05 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 3 = 3,15$$

$$I_{p-исп2} = 0,1 \cdot 3 + 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 3 + 0,05 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 = 2,55$$

$$I_{p-исп3} = 0,1 \cdot 5 + 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 2 + 0,05 \cdot 3 + 0,2 \cdot 2 + 0,1 \cdot 2 = 2$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{испi}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{испi} = \frac{I_{p-испi}}{I_{финр}^{испi}} \quad (11)$$

$$I_{исп1} = \frac{3,15}{0,635} = 4,96; \quad I_{исп2} = \frac{2,55}{0,75} = 3,4; \quad I_{исп3} = \frac{2}{1} = 2;$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (таблица 22) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{ср}$) определяется из формулы (12):

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{испi}}{I_{исп\ max}} \quad (12)$$

Таблица 22 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Текущий проект (Исп.1)	Аналог 1 (Исп.2)	Аналог 2 (Исп.3)
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,635	0,75	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,15	2,55	2
3	Интегральный показатель эффективности	4,96	3,4	2
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,68	0,4

Сравнив значения интегральных показателей эффективности можно сделать вывод, что исследуемый метод исследования параметров эмиссионной плазмы является отличным вариантом работы с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Наилучшим из сравниваемых является исполнение 1, также основываясь на интегральных показателях эффективности.

4.7 Вывод по разделу

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» был выполнен анализ рынка ускорителей электронов, в котором показана достаточная конкурентоспособность исследуемого ускорителя с плазменным эмиттером. Определена коммерциализация НТИ вместе с бюджетом проекта, который составил 492 390 (четыреста девяносто две тысячи триста девяносто) рублей. Чистый дисконтированный доход (ЧДД) составил 417,5 тыс. руб. из которого следует, что проект можно считать выгодным. Внутренняя норма доходности составила 26,8%, что вдобавок подтверждает инвестиционный проект оправданным, т.к. выполняется $ВНД > E$ (норма дисконта 10%). Срок окупаемости от начала операционной деятельности составляет 3.23 года. Индекс доходности составляет 2,16 и подтверждает приемлемость инвестиций. В качестве социального эффекта рассмотрена возможность использования ускорителя в сельском хозяйстве, что позволит повысить урожайность зерна и в итоге повысить прибыль сельхоз предприятий в этой сфере. На основе

интегрального показателя эффективности сделан вывод, что наилучшим выбором является исполнение 1, которое и имеется в данном исследовательском проекте. Также исходя из проведенного SWOT-анализа можно сделать вывод, что исследуемый ускоритель нуждается в модификациях, направленных на уменьшение как габаритов, так и суммарной стоимости оборудования.

5 Социальная ответственность

Тематикой диссертационной работы является исследование характеристик эмиссионной плазмы дугового разряда низкого давления в ускорителе электронов «ДУЭТ» с сетчатым плазменным катодом и выводом пучка в атмосферу.

Импульсный электронный ускоритель с плазменным катодом «ДУЭТ» служит для генерации электронного пучка большого сечения с энергией до 200 кэВ в атмосферу. Электронные пучки имеют широкую область применения: модификация поверхности материалов, стерилизация продукции медицинского назначения, плазмохимия, очистка сточных вод и т.д. В связи с этим модификация ускорителей, направленная на расширение предельных параметров и повышение стабильности работы, является актуальной задачей. Изучение параметров эмиссионной плазмы дугового разряда в ускорителе «ДУЭТ» привнесет большее понимание физических процессов и закономерностей, происходящих в плазменном эмиттере, которые и определяют параметры генерируемого пучка электронов.

Рабочее место находится в Институте сильноточной электроники, в лабораторий плазменной эмиссионной электроники (ИСЭ СО РАН, ЛПЭЭ). Эксперименты проводились в лабораторном помещении, оснащенном всем необходимым инструментом и электрооборудованием. В рабочей комнате находится: ускоритель электронов «ДУЭТ», каскадный генератор высокого напряжения, вакуумные насосы, газовое хозяйство, шкаф управления, источник электропитания дугового разряда, система измерения зондовой характеристики. Непосредственное управление ускорителем осуществляется из отдельной пультовой комнаты.

Объектом исследования является широкоапертурный ускоритель электронов «ДУЭТ» с сетчатым плазменным катодом и выводом пучка в атмосферу.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Нормированное рабочее время составляет пятидневную рабочую неделю с восьмичасовым рабочим днем согласно Трудовому кодексу Российской Федерации. Так как работа на установке включает в себя как работу сидя, так и стоя, то должны выполняться соответствующие требования согласно ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» [36] и ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ «Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования» [37]. В связи с тем, что работа ускорителя и управление им осуществляется при помощи различных датчиков и контрольно-измерительной аппаратуры, то необходимо соблюдать ГОСТ EN 894-3-2012 «Безопасность машин. Эргономические требования к оформлению индикаторов и органов управления. Часть 3. Органы управления» [38].

5.2 Профессиональная социальная безопасность. Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования

Согласно ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ [39] были выбраны опасные и вредные производственные факторы, которые имеются при работе на установке «ДУЭТ». Все производственные факторы являются физическими по природе действия.

Таблица 23 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовле ние	Эксплуата ция	
1.Повышенное значение напряжения в электрической цепи			+	ГОСТ 12.1.038.-82 ССБТ; ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ

Продолжение таблицы 23

2. Повышенный уровень ионизирующего излучения			+	СанПиН 2.6.1.2523-09
3.Повышенный уровень стат. эл- ва		+	+	ГОСТ Р 12.1.019– 2009
4.Повышенный уровень электромагнитных полей и излучений			+	ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ
5.Сосуды с повышенным давлением			+	ПБ 10-115-96
6. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96
7. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	СП 52.13330.2016
8. Повышенный уровень шума			+	СН 2.2.4/2.1.8.562–96

5.2.1 Повышенное значение напряжения в электрической цепи

Одной из составных частей ускорителя является высоковольтная батарея, обеспечивающая постоянное ускоряющее напряжение величиной до 200 кВ. Так же опасность представляют блок поджига, генерирующий импульс напряжения величиной 5 кВ, и блок питания разряда, способный иметь на выходе напряжение 300 В и ток до 80 А. Воздействие электрического тока на организм способно оказывать термическое, химическое и биологическое действие. Имеющееся на ускорителе оборудование с большими значениями тока и напряжения способны как нанести электрические удары и травмы, так и привести к летальному исходу, в связи с чем необходимо аккуратно подходить к обеспечению безопасности работ на ускорителе.

Согласно ГОСТ 12.1.038.-82 ССБТ [40] предельно допустимые значения напряжения прикосновения при аварийном режиме производственных электроустановок с частотой 50Гц, напряжением выше 1000В, с глухим

заземлением нейтрали не должны превышать значений, приведенных в таблице 24.

Таблица 24– Предельно допустимые значения напряжения прикосновения

Продолжительность воздействия t, с	Предельно допустимое значение напряжения прикосновения U, В
До 0,1	500
0,2	400
0,5	20
0,7	130
1,0	100
Св. 1,0 до 5,0	65

Для обеспечения защиты персонала от прикосновения используются следующие средства защиты, регламентируемые ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ [40]: изоляция и безопасное расположение токоведущих частей, защитное заземление. В качестве индивидуального средства защиты выступают диэлектрические перчатки, коллективные средства: предупреждающие знаки и таблички, световая сигнализация, система блокировок включения высокого напряжения.

5.2.2 Повышенный уровень ионизирующего излучения

При выводе пучка электронов в атмосферу возникает тормозное рентгеновское излучение, которое и является вредным производственным фактором. Рентгеновское излучение в определенной дозе оказывает негативное влияние на здоровье человека. Однако для оценки риска представленного здоровью человека рассчитывается не доза прямого облучения, а доза общего облучения организма– то есть, эффективная доза.

Согласно СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009» [42] основные пределы доз приведены в таблице 25.

Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) - 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) - 70 мЗв. Началом периодов считается 1 января 2000 года.

Таблица 25 – Основные пределы доз

Нормируемые величины*	Пределы доз	
	персонал (группа А)**	население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год в		
хрусталике глаза***	150 мЗв	15 мЗв
коже****	500 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв
<p>Примечания:</p> <p>* Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам.</p> <p>** Основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни воздействия персонала группы Б, равны 1/4 значений для персонала группы А. Далее в тексте все нормативные значения для категории "персонал" приводятся только для группы А.</p> <p>*** Относится к дозе на глубине 300 мг/см .</p> <p>**** Относится к среднему по площади в 1 см значению в базальном слое кожи толщиной 5 мг/см под покровным слоем толщиной 5 мг/см . На ладонях толщина покровного слоя - 40 мг/см . Указанным пределом допускается облучение всей кожи человека при условии, что в пределах усредненного облучения любого 1 см площади кожи этот предел не будет превышен. Предел дозы при облучении кожи лица обеспечивает непревышение предела дозы на хрусталик от бета-частиц.</p>		

Непосредственно ускоритель с системами питания и насосной группой находится в помещении №028 подземного бункера. Для защиты персонала от ионизирующего излучения помещение имеет толстые бетонные стены (толщина 0,5 м), а так же металлическую дверь с блокировочными концевыми выключателями и световую сигнализацию, предупреждающую о работе ускорителя. Управление работой ускорителя осуществляется в комнате, находящейся напротив. При работе ускорителя мощность дозы рентгеновского излучения в любой доступной точке смежного с рабочей комнатой помещения, в том числе и в пультовой, не превышает 2.8 мР/час (0.8 мкР/сек) [41].

Службой радиационной безопасности периодически (не реже одного раза в год) должен проводиться контроль над уровнями ионизирующих излучений (дозиметрический контроль) с помощью переносных

дозиметрических приборов в помещении, где располагается ускоритель электронов «ДУЭТ». Дополнительный индивидуальный контроль для персонала занятого на ускорителе электронов «ДУЭТ» не требуется.

5.2.3 Повышенный уровень статического электричества

Источниками статического электричества выступает прежде всего конденсаторная батарея, способная заряжаться до 200кВ, а также элементы систем электропитания, в частности электролитические конденсаторы напряжением до 450 В. Опасное и вредное воздействие на людей электрического тока проявляется в виде электротравм и профессиональных заболеваний. Основным средством для обеспечения защиты персонала является изолирующая штанга, позволяющая снимать статический заряд с токоведущих частей. Также разряд конденсаторов осуществляется через включенные в цепь балластные сопротивления. Электробезопасность для работы на ускорителе осуществлена в соответствии с ГОСТ Р 12.1.019– 2009 [43]. Для стекания заряда с корпуса ускорителя используется медная шина заземления.

5.2.4 Повышенный уровень электромагнитных полей и излучений

Источниками электромагнитных полей и излучений является: Каскадный генератор, высоковольтная батарея, подводящий высоковольтный кабель КПВ-300, дуговой разряд низкого давления, искровой разряд блока поджига, токоведущие шины, блок электропитания разряда. Электромагнитное поле обладает способностью биологического, специфического теплового воздействия на организм человека. При воздействии полей, имеющих напряженность выше предельно допустимого уровня, развиваются нарушения со стороны нервной, сердечно-сосудистой систем, органов пищеварения и некоторых биологических показателей крови. Для снижения влияния электромагнитных полей применяется экранирование источников. Допустимые напряженности полей и время работы регламентируется ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты» [44]. Предельно допустимый уровень напряженности электромагнитного поля на рабочем месте в течение всей смены

устанавливается равным 5кВ/м. Напряженность магнитного поля не более 8кА/м при магнитной индукции 100 мкТл. При превышении данных значений необходимо уменьшать время работы персонала за установкой.

5.2.5 Сосуды с повышенным давлением

Для проведения работ на ускорителе необходим рабочий газ (Ar, N₂ и др.), который хранится в сосудах с повышенным давлением (газовые баллоны 40л с давлением около 15 атм.). Сосуды с повышенным давлением представляют опасность, потому что при механическом повреждении сосуда может произойти взрыв и поражение персонала осколками. Эксплуатация таких емкостей регламентируется ПБ 10-115-96 [45], в соответствии с которыми сосуд должен быть снабжен манометром прямого действия. Так же на баллоне находится редуктор со отдельным манометром, который позволяет регулировать давление и подачу газа в рабочую камеру. На баллоне с газом должна находиться информация о массе баллона, дате изготовления и освидетельствования, вместимости, рабочем давлении и закаченном газе. Цвет окраски баллона должен соответствовать типу газа, закаченного внутрь. Установка баллона должна исключать возможность его опрокидывания.

5.2.6 Отклонение показателей микроклимата в помещении

Микроклимат определяется действующими на человека температурой окружающего воздуха, относительной влажностью воздуха и скоростью движения воздуха. Оптимальные показатели микроклимата распространяются на всю рабочую зону, допустимые показатели устанавливаются дифференцированно для постоянных и непостоянных рабочих мест. Оптимальные и допустимые показатели температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений должны соответствовать значениям, указанным в таблице 26, согласно СанПиН 2.2.4.548–96. [46].

Таблица 26– оптимальные нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений (СанПиН 2.2.4.548-96)

Сезон года	Категория тяжести выполняемых работ	Температура, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
		Допуст	Опт.	Допуст	Опт.	Допуст	Опт.
Теплый	Легкая, 1Б	20-28	22-24	15-75	60-40	0.1	0.1-0.3
Холодный	Легкая, 1Б	19-24	21-23	15-75	60-40	0.1	0.1-0.3

Интенсивность теплового облучения работающих от электронного оборудования, электронагревательных и осветительных приборов на постоянных рабочих местах не должна превышать 35 Вт/м² при облучении 50 % поверхности тела и более, 70 Вт/м² при облучаемой поверхности от 25 до 50 % и 100 Вт/м² при облучении не более 50 % поверхности тела.

Нормализация микроклимата в рабочем помещении осуществляется с помощью систем обогрева, а также приточно-вытяжной вентиляции с кратностью воздухообмена не ниже 5

5.2.7 Недостаточная освещенность рабочей зоны

При неудовлетворительном освещении зрительная способность глаз снижается, и могут появиться такие заболевания, как близорукость, резь в глазах, катаракта, профессиональное заболевание. Правильно выполненная система освещения имеет большое значение в снижении производственного травматизма, уменьшая потенциальную опасность многих производственных факторов; создает нормальное условие для работы органам зрения и повышает общую работоспособность организма.

Требования к освещению ряда производственных помещений регламентируются СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное

освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 6.5» [47]. Так как рабочее помещение находится в бункере, то используется только искусственное освещение (общее и комбинированное). При работе малой точности освещенность рабочего места при системе общего освещения должна составлять 200 Лк, и коэффициент пульсаций не более 20%. В помещениях используются светильники с люминесцентными лампами. В пультовой комнате находится настольный светильник для создания местного освещения за рабочим столом. Также в бункере имеется аварийное освещение для случаев, когда основное освещение не будет работать.

5.2.8 Превышение уровней шума

При работе ускорителя электронов «ДУЭТ» источниками шума являются: форвакуумный и диффузионный насос, дроссели системы питания разряда, вентиляция, а также возникает шум при выводе пучка в атмосферу через фольгу. В результате данного воздействия может снижаться производительность труда, внимание и повышается вероятность появления несчастного случая. Нормы уровня шума должны соответствовать СН 2.2.4/2.1.8.562–96 [48] (таблица 27).

Таблица 27- Предельно допустимый уровень звука

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звука, в дБА
Работа с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами; Рабочие места за пультами в кабинах наблюдения и дистанционного управления без речевой связи по телефону, в помещениях лабораторий с шумным оборудованием, в помещениях для размещения шумных агрегатов вычислительных машин	75

Меры защиты от превышения уровней шума регламентируются СП 51.13330.2011. «Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003» [49]. Так для снижения уровня шума в рабочем помещении необходимо проводить: техническое обслуживание насосов, смазывать

трущиеся детали (подшипники, штоки, клапаны и т.д.), по возможности отключать работу вентиляционной системы.

5.3 Экологическая безопасность.

Экологическая безопасность – это комплексная проблема, требующая усилия учёных многих специальностей. Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий, является полный переход к безотходным и малоотходным технологиям и производствам. Это требует решения целого комплекса сложных технологических и конструктивных задач, основанных на исследовании новейших научно–технологических достижений.

5.4 Защита литосферы

Источниками загрязнения литосферы при проведении работ на ускорителе являются:

- Неисправные электронные компоненты;
- Отрезки проводов;
- Отходы бытового характера.

В ИСЭ СО РАН, к которому принадлежит лаборатория, имеется оцинкованные контейнеры, в которые выбрасываются все отходы: части кабелей и проводов, отрезки картона, бумаги, не рабочие электронные устройства, и т.д. Наполненные контейнеры маркируют соответствующими наклейками с указанием вида отходов, правил сбора и вывоза, а также описанием контактной информации организации, которая обеспечивает транспортировку и утилизацию.

5.5 Защита атмосферы

Опасность воздействия на человека загрязняющих воздух вредных веществ заключается в том, что человек сразу может не ощущать их влияния. Примером является оксид углерода (угарный газ) — газ без цвета, вкуса и запаха, высокая концентрация которого вызывает тяжелые последствия вплоть до остановки сердца. Однако при работе ускорителя используются газы аргон и

азот. Эти газы являются одними из основных компонент воздуха, и поэтому их попадание в атмосферу не несет вреда.

5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

Чрезвычайная ситуация – состояние, при котором в результате возникновения источника чрезвычайной ситуации на объекте, определенной территории или акватории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, экономике и окружающей природной среде. Наиболее вероятной ЧС является пожар, возникший при коротком замыкании проводки или оборудования.

Здание относится к первой степени огнестойкости. Корпус здания железобетонный, внутренние перегородки выполнены из кирпича. В лабораторном помещении имеются горючие материалы (мебель, бумага и прочее). Категория лабораторного помещения по пожаровзрывоопасности определяется, согласно НПБ105-03 [50]. К этой категории относятся пожароопасные помещения, характеризующиеся наличием горючих материалов и веществ, которые могут гореть при взаимодействии с кислородом воздуха, с водой или друг с другом. Пожарная безопасность обеспечивается мерами противопожарной профилактики направленной на исключение возникновения и поддержания условий горения и включает комплекс мероприятий необходимых для предупреждения возникновения пожара, ограничения распространения огня, защиты людей и тушения пожара.

В здании имеются средства по тушению: противопожарные краны, огнетушители (углекислотные и порошковые, предназначенные для тушения электроустановок) и ящики с песком.

Меры при возникновении пожара:

- вызвать пожарную охрану;
- эвакуировать персонал из зоны пожара;
- до прибытия пожарных обесточить установку и отключить вентиляцию;
- приступить к тушению пожара всеми имеющимися средствами.

В целях снижения пожарной опасности проводятся технические, эксплуатационные и организационные мероприятия. Технические мероприятия обуславливают требования противопожарных норм при проектировании зданий, электрических установок системы отопления и т.д. Эксплуатационные требования по эксплуатации оборудования, ремонту, правильному содержанию. Организационные меры требуют обучения персонала правилам пожарной безопасности.

Предупреждения возникновения пожара достигается исключением образования горючей среды и источников возгорания или поддержанием параметров среды в пределах исключающих горение.

Для организации эвакуации в коридорах вывешены схемы с указанием всех возможных путей, которыми можно покинуть здание (рисунок 30). Знаком «+» указано помещение, в котором находится ускоритель; знаком «О» отмечена пультовая комната для ускорителя.



Рисунок 30 – План эвакуации

5.7 Вывод по разделу

В ходе выполнения раздела «Социальная ответственность» были выявлены вредные и опасные факторы объекта исследования. Необходимо внимательно подходить к вопросам безопасности, в особенности с опасными факторами (высокое напряжение, электрический ток, ионизирующее излучение, сосуды с высоким давлением), поскольку они могут привести к травме или летальному исходу. Основным способом предотвращения влияния опасных производственных факторов является коллективная защита в виде защитных блокировок и отдельной пультовой для управления ускорителем, также важными средствами являются световая сигнализация и предупреждающие таблички. В качестве наиболее вероятной ЧС рассмотрено возгорание оборудования при коротком замыкании электрической цепи. Определены меры для предотвращения пожара, а при его возникновении определен порядок действий и рассмотрен план эвакуации.

6 Заключение

Проведены зондовые измерения параметров плазмы дугового разряда низкого давления в ускорителе электронов с сетчатым плазменным катодом и выводом пучка в атмосферу. Получение зондовых характеристик осуществлялось с помощью автоматизированной системы измерения, позволяющей фиксировать напряжение смещения и ток зонда внутри вакуумной камеры, что позволило снизить электрические наводки при проведении измерений. Экранирование зонда позволило снизить искажения снимаемых вольт-амперных характеристик путем ограждения коллекторной части зонда от потока высокоэнергетичных электронов, распространяющихся от катода разряда. В зависимости от режима генерации плазмы в результате экранирования зонда была получена концентрация от 1 до $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, температура электронов в диапазоне 20 – 45 эВ, потенциал плазмы составил 90 - 100 В. При росте амплитуды тока разряда наблюдался рост концентрации плазмы и снижение температуры электронов, связанные с возрастанием ионизационных взаимодействий. Увеличение давления в исследуемом диапазоне 20 – 70 мПа приводит к небольшому росту концентрации плазмы, температура электронов существенно не изменяется, что вероятно связано с несущественным изменением газовых условий для многочисленных электронов с длинами свободного пробега превышающих метр. При перемещении зонда вдоль эмиттера наблюдалось снижение концентрации плазмы, а также повышение температуры электронов. Вероятно, данный эффект связан с различными газовыми условиями внутри пространства плазменного эмиттера, когда по мере удаления от плазмогенератора давление в эмиттере снижается. Смена рабочего газа (азот вместо аргона) приводит как к изменению концентрации, так и температуры, что соответствующим образом связано со схожими потенциалами, но различными сечениями ионизации исследуемых газов. Сходство зондовых характеристик на длительностях импульса тока разряда 50 и 100 мкс свидетельствует об установившемся режиме работе плазменного эмиттера в данном временном диапазоне.

7 Список используемых источников

- 1 Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности / под общ. ред. Козьмина Г.В., Гераськина С.А., Санжаровой Н.И.– Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015.– 400 с.
- 2 Соковнин С.Ю. // Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе. – Екатеринбург: УрО РАН. 2007. 224 с.
- 3 Хенце М. // Очистка сточных вод. М.: Мир, 2004.
- 4 Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991.– 304 с.– ISBN 5-283-03973-0
- 5 Кайдалов А.А. Сварочные электронные пушки / А.А. Кайдалов, Е.И. Истомина.– Киев: Научно-технический комплекс «Институт электросварки им. Е.О. Патона» Национальной Академии наук Украины, 2003.– 153 с.
- 6 Истомина С.Я., Антипов Е.В. Катодные материалы на основе перовскитоподобных оксидов переходных металлов для среднетемпературных твердооксидных топливных элементов // Успехи химии. – 2013. – Т. 82. – № 7. – С. 686-700
- 7 Несмелов Д.Д., Орданьян С.С., Перевислов С.Н. Конструкционная керамика в системе $LaB_6-SiC-W_2B_5$ // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2013. – №. 2-2. – С. 102-106.
- 8 Кузнецов М. С. Технология получения высокоэмиссионных материалов на основе гексаборида лантана в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза при механоактивации шихты : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : спец. 05.17.11 / М. С. Кузнецов ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; науч. рук. О. Ю. Долматов. — Томск, 2016. — 131 с.

- 9 Рау А. Г. Электронно-лучевая пушка с термокатодом для сварочной установки / А. Г. Рау [и др.] // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 129–131.
- 10 Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М., Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- 11 Баранов Г.А., Бодакин Л.В., Гурашвили В.А., Джигайло И.Д., Комаров О.В., Косогоров С.Л., Кузьмин В.Н., Сень В.И., Ткаченко Д.Ю., Успенский Н.А., Шведюк В.Я. // ПТЭ. 2013. №1 С.81
- 12 Косогоров С.Л. // ЖТФ. 2011. Т.81.Вып.7. С.115
- 13 Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника – М.: Наука, 2004, 704 с.
- 14 Месяц Г.А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000.
- 15 Проскуровский Д.И., Янкелевич Е.Б., Взрывоэмиссионный катод большой площади // Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии / Отв. ред. Г.А. Месяц. Новосибирск: Наука, 1983. С. 21–26.
- 16 Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М. Техника получения высокоэнергетических электронных пучков с большим поперечным сечением. – ПТЭ, 1980, №1, с. 7– 24
- 17 Denisov G.V. Kuznetsov D.L., Novoselov Yu.N., Suslov A.L., Uster A.M. // Proc. XIII International Conference on High Power Particle Beams (25– 30 June 2000, Nagaoka, Japan). PB– 049. P.645
- 18 Кузнецов Д.Л., Малыгин А.В., Новоселов Ю.Н., Рукин С.Н., Харлов Е.А. Частотный наносекундный ускоритель электронов для инициирования плазмохимических процессов / Сборник трудов IV Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии (ISTAPC)
- 19 Гаврилов Н.В. Высоковольтные диоды с ионно-электронным эмиттером и анодной плазмой, генерированной импульсной контрагированной дугой / Н.В. Гаврилов. – Дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук. – Томск, 1985, 163 с.

- 20 М.А. Аброян, Н.А. Викнякшук, С.Л. Косоголов, Б.В. Люблин
Спектроскопические исследования параметров прианодной плазмы в
ускорителе электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда:
Препринт НИИЭФА П-К-0887– М.: ЦНИИатоминформ, 1991, – 9 с.
- 21 Гаврилов Н.В. Импульсный источник электронов на основе
несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда / Н.В. Гаврилов,
Ю.Е. Крейнделъ, П.М. Щанин // ПТЭ, 1984. – №2. – С. 143–146.
- 22 Пат. 38310052 (США). Hollow cathode gas discharge device / R.C. Knechtli.
- 23 Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А.
Завьялов, Ю.Е. Крейнделъ, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. – М.:
Энергоатомиздат, 1989.– 256 с.
- 24 Гаврилов Н.В., Крейнделъ Ю.Е., Окс Е.М., Щанин П.М. Условия
существования и предельные параметры импульсной контрагированной
дуги низкого давления // Журн. тех. физ. 1971, Т.41, №2. С. 323– 324.
- 25 Крейнделъ Ю.Е., Окс Е.М., Щанин П.М. Импульсный источник
электронов с плазменным эмиттером на основе каскадной дуги //
Приборы и техника эксперимента. 1984. №4. С. 127– 130.
- 26 Коваль Н.Н., Крейнделъ Ю.Е., Литвинов Е.А. и др. Развитие
кнудсеновской дуги с катодным пятном // Докл. АН СССР. 1988. Т. 300,
№5. С. 1108– 1110
- 27 Окс Е.М., Щанин П.М. Высоковольтный электронный источник с
плазменным катодом и высокой плотностью энергии в пучке // Приборы
и техника эксперимента. 1988. №3. С. 166– 169.
- 28 Гаврилов Н.В., Ковальчук Б.М., Крейнделъ Ю.Е. и др. Высоковольтный
электронный источник с плазменным эмиттером для формирования
пучков большого сечения. – Приборы и техн. эксперим., 1981, №3, с. 152–
154.
- 29 Воробьёв М.С., Коваль Н.Н., Сулакшин С.А. Источник электронов с
многоапертурным плазменным эмиттером и выводом пучка в атмосферу.
ПТЭ, 2015, №5, С.112–120

- 30 Воробьёв М.С., Коваль Н.Н. Распределение плотности тока в пучке большого сечения в ускорителе электронов с многоапертурным плазменным катодом. Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 11, С.41–47
- 31 Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005.– 216 с.
- 32 Толкачев В.С. Электронные ускорители на основе дугового разряда низкого давления: дис. канд. техн. наук.– Томск, 1988.– С. 28–34
- 33 Арестов С.И., Костин О.А., Чесноков С.М. Экспериментальные исследования распределения потенциала в дуговом разряде с диффузионной катодной привязкой, VII Всес. симп. по сильноточной электронике: Тез. докл. Т1, Томск, 1988, С 31-33
- 34 Плюто А.А., Рыжков В.Н., Копин А.Г / ЖТФ, 1964, Т.47, №8, с 494
- 35 Райзер Ю.П. // Физика газового разряда. М: Наука, 1987.– 592 с.
- 36 ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования».
- 37 ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ «Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования».
- 38 ГОСТ EN 894-3-2012 «Безопасность машин. Эргономические требования к оформлению индикаторов и органов управления. Часть 3. Органы управления».
- 39 ГОСТ 12.0.003-2015 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».
- 40 ГОСТ 12.1.038-82 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов».
- 41 ГОСТ 12.1.019-79 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
- 42 СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009».

- 43 ГОСТ Р 12.1.019-2009 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ).
Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов
защиты».
- 44 ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ «Электробезопасность. Общие требования и
номенклатура видов защиты».
- 45 ПБ 10-115-96 «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов,
работающих под давлением».
- 46 СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату
производственных помещений».
- 47 СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение.
Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 6.5».
- 48 СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых,
общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные
нормы».
- 49 СП 51.13330.2011. «Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП
23-03-2003».
- 50 НПБ 105-03 «Определение категорий помещений, зданий и наружных
установок по взрывопожарной и пожарной опасности».

Приложение I

Literature review

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ71	Дорошкевич Сергей Юрьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	Воробьев Максим Сергеевич	к. т. н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Аксёнова Наталия Валерьевна	к. филол. н.		

The study of electron-beam technologies began in the 20th century, during the successful development of vacuum technology and the emergence of technical tasks of combining, processing, and obtaining new materials [1]. By this day, new ways of electron beams application are being searched and implemented into the production sector. As the belonging of an electron source to a specific field of application directly depends on its design and principle of work, let us consider the methods for producing electron beams:

1) Based on thermal cathode

The first electron beams were obtained by a method based on the phenomenon of thermionic emission, which consists electron emission by heated conductive bodies surface. Thermoelectronic guns are often used to modify surface materials layers, welding, cutting, soldering, etc. The flow of electrons is emitted by a thermal cathode with direct or indirect heating, and is accelerated by an electric field. For example, beams with 20 –150 keV energies are used for welding [1]. Electron beam current magnitude is regulated by a potential negative appliance to the potential cathode on control electrode. The beam power density is controlled by focusing electromagnetic lenses. **[Ошибка! Закладка не определена.]**

The disadvantage of thermionic guns lies in the cathode operation in unfavorable conditions for it: "poisoning" with residual gases and vapors, attack with accelerated positive ions. All this leads to the destruction of the cathode surface and its emissivity deterioration. Also, to solve various technological problems (cutting, welding, melting) on the electron gun, in order to provide the necessary power of the electron beam, it is necessary to use cathodes of various types, which additionally inconveniences the work. However, in the work [5] the electron beam gun with a thermal cathode is described, in which it is possible to create an electron beam with a power from 2 to 60 kW due to replaceable cartridges with different cathodes.

The use of thermionic emission also finds its place to create electron beams of large cross section (BLS). Electronic sources of BLS with thermal cathodes are intended mainly for operation in continuous mode and on pulses of considerable

duration, due to the limited emissivity of thermal cathodes [6]. Due to the fact that the creation of thermal cathodes with a large emission surface is technologically difficult, for the formation of a wide beam multi-element cathodes - separate long filaments are used. High operating temperature of the filaments to ensure the required current density leads to a reduction in their durability. One way to reduce the temperature and power of their heat is to optimize diameter of the filament.

Three-electrode sources have the simplest design of an electron-optical system (EOS) with multi-element cathodes. They consist of filamentary emitters placed in the field of a diode formed by a flat anode and a reflective electrode (spreader). An example of a three-electrode source is described in [7], the design diagram of which is shown in figure 1.

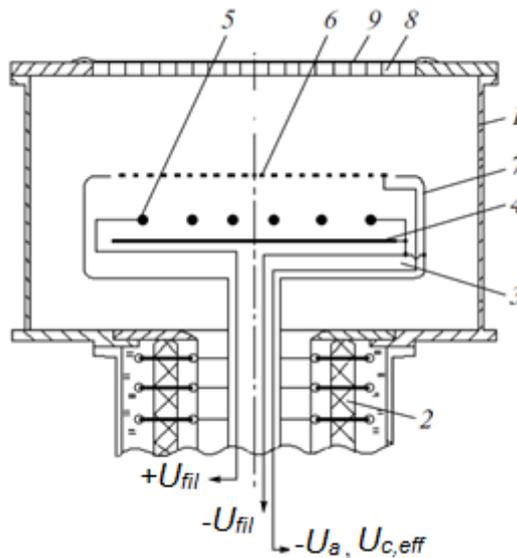


Figure 1— Schematic diagram of accelerator: $+U_{fil}$, $-U_{fil}$, $U_{c,eff}$ – voltage supply thermionic filament and grid are applied under the acceleration voltage $-U_a$ relative to ground. 1– vacuum chamber; 2– high voltage insulator; cathode grid block; 4– heat shield; 5– thermal emitters; 6– grid; 7– electrostatic screen; 8– support grid; 9– foil.

In the vacuum chamber 1 of the accelerator, the cathode-grid unit 3 is installed at the bushing insulator 2. The latter contains a flat heat shield 4, a series of directly heated emitters 5 of tungsten alloy and a grid 6 in the form of parallel rods made of tungsten with a diameter of 3 mm arranged at a pitch of 9 mm. The elements of the cathode block are enclosed in an electrostatic shield 7. In order to reduce thermal deformations during accelerator operation, the design of the cathode block is

made sectioned. Output window section of $50 \times 40 \text{ cm}^2$, consisting of a support grid 8 and a foil 9 of aluminum alloy with a thickness of $30 \text{ }\mu\text{m}$, is the anode of the accelerator. Thermal emitters are heated by direct current. The wide-aperture accelerator generates an electron beam with an energy up to 200 keV in a continuous mode. The maximum current density of the extracted beam is $100 \text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$, and the non-uniform distribution over the cross section does not exceed 10%.

The significant effect of the accelerating field on the geometric and current characteristics of the beam, strict requirements for the size and shape of the control electrode, limit to some extent the use of triode electron-optical systems in sources for the formation of BLS. Therefore, four-electrode systems are often used. An additional electrode, installed between the filamentary cathodes and the anode, separates the acceleration region and the area of the formation of BLS. The paper [8] presents the results of computational and experimental studies of a wide-aperture thermionic accelerator with triode and tetrode types BLS, and also gives their comparison. The advantage of the tetrode system is the independence of the current and energy of the beam. Also, accelerators with tetrode EOS can provide higher uniformity of distribution ($\Delta j/j \leq \pm 10\%$).

Thermoelectronic sources continue to occupy certain production spheres and their research and modernization is also relevant. However, a number of features: the limited emissivity of the cathode, the complexity of calculating the EOS, the use of additional electrodes and the need for their control systems, the short lifetime of thermal cathodes, and low beam current density - introduce difficulties in expanding the scope of this type of sources, in particular, in the formation of BLS.

2) Based on explosive emission cathode

The phenomenon of explosive electron emission (EEE) was discovered by G.A. Mesyats and in its essence is thermionic emission from the cathode sections heated to high temperatures due to their microexplosions [9]. An electrical explosion of microstripes on the metal surface is accompanied by the emission of an electron current, which is higher than the field emission current. According to the mechanism

of the G.A. Mesyats [10], EEE occurs in separate portions of electrons, called ectons (Explosive center or Electron cluster).

Powerful (10^8 – 10^{13} W) nanosecond electron beams, obtained using diode electron guns with explosive emission cathodes, are widely used to generate microwave oscillations, high-power X-rays, excitation of the working medium of lasers, collective particle acceleration, technology, etc. The lifetime of the EEE is determined by plasma propagation time from the cathode to the anode of the discharge gap and usually does not exceed 10^{-7} – 10^{-6} sec. Each act of such emission is accompanied by irreversible changes in the state of the cathode surface. With each voltage pulse, different emitting centers of the cathode explode, and, consequently, different configurations of plasma clots arise. Therefore, at the same anode voltage value, emission currents may not be the same.

At the moment, there is a huge number of designs of cathodes for EEE, each of which is designed for specific purposes: improving beam uniformity, achieving a high emission current density, increasing the life of the cathode, etc. The most common are multipoint cathodes, in which a large number of edges are specially arranged to obtain a large number of ecton zones. The problem of multipoint cathodes lies in cathode stability and durability. The solution of these disadvantages is provided by the choice of the cathode material, current load, emitter geometry, interelectrode distance and applied voltage magnitude.

For creating long-life explosive cathodes, emitters with a constant cross section in height (foil and wire) are most promising. The most widespread are emitters made of foil [12], using which, in the nanosecond range of pulse durations, a service life of 10^6 – 10^7 current inclusions is achieved. However, such emitters have a number of disadvantages. The first is the uncontrollability of the number and location of emission centers on the working edge of the foil, which leads to the appearance of a considerable uniformity of the electron beam. Also, the localization of the current in a limited number of emission centers causes an acceleration of the electrical breakdown of the accelerating gap.

The need to increase the uniformity of the beam led to the creation of metal-dielectric cathodes. The operation of such cathodes is based on the excitation of EEE at the metal – insulator – vacuum triple point. Increased uniformity is achieved due to the higher plasma propagation velocity along the dielectric relative to the cathode flame spreading velocity in a vacuum. The triple-point cathodes are of a different nature. Metal cathodes with inlaid plastic, copper wires with reinforcing dielectric, fiber cathodes (velvet), ceramic cathodes of nanopowders, etc. are used [9]. The disadvantage of metal-dielectric cathodes is the metallization of the surface of the dielectric due to the liquid metal, plasma and steam emitted by the ecton, which complicates the functioning of such systems. Also, the destruction of the dielectric under prolonged service conditions occurs.

Large-area explosion-emission cathodes are used to form ribbon electron beams, which in turn are used to initiate plasma-chemical processes in various gas mixtures. So, pulsed electron beams with a higher current density can reduce energy costs when harmful chemical compounds such as sulfur dioxide, hydrogen sulfide [13] and others are removed from the air. An example of the formation of a ribbon beam can serve as a pulsed - periodic nanosecond electron accelerator, described in [14]. The accelerator consists of two main elements: the CM – 3N generator and the vacuum diode, the device of which is shown in figure 2.

The cathode is a dural rod 80 cm long, in which two rows of ceramic plates and two rows of metal tips that are in elastic contact with these plates are fixed. When applying a voltage pulse at the ends of the edges EEE occurs. The outlet window is a $85 \times 5 \text{ cm}^2$ copper grid, covered with aluminum-magnesium foil 50 microns thick. In the accelerator, it is possible to vary the beam current to 1130 A, the electron energy up to 410 keV with a duration at half-height of 40 ns. The average beam power reaches 1 kW under prolonged service conditions at a frequency of 200 Hz.

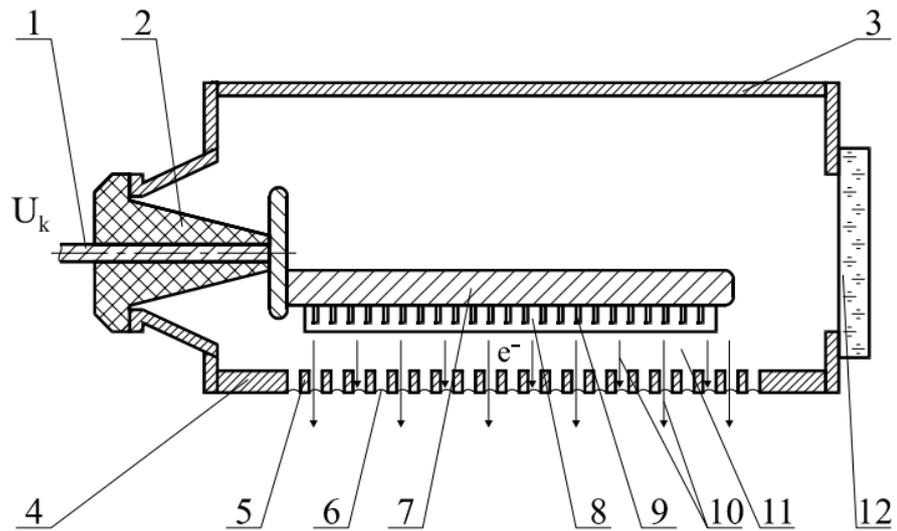


Figure 2— Device vacuum diode. 1— high current lead; 2— bushing; 3— vacuum chamber; 4— base plate; 5— water cooled grid; 6— foil; 7— cathode; 8— ceramic plate; 9— metal tips; 10— electron flow; 11— accelerating gap; 12 —plexiglas window.

When creating BLS, the main advantage of accelerators based on EEE is the possibility of obtaining high current densities ($j > 1-10 \text{ A/cm}^2$) [Ошибка! Закладка не определена.]. However, due to the discreteness of the emission centers and the uneven filling of the cathode part with plasma, there are significant small-scale nonuniformity in the beam of large cross section. Limiting the pulse duration to the shorting time of the accelerating gap makes it impossible to create beams of long duration, which is necessary in some field of application. The interdependence of parameters (accelerating voltage, beam current, interelectrode gap) also makes it difficult to study the sources of electrons with EEE in different fields of application.

3) Based on high voltage glow discharge (HGD)

The relative simplicity of the design and the absence of heating elements are possessed by electron accelerators based on the high-voltage glow discharge of the HGD. The principle of operation of such accelerators is based on the phenomenon of ion – electron emission. There is a variety of self-maintained and non-self-maintained HGD. In gas-filled ($p = 0.1-10 \text{ Pa}$) diodes to generate an self-maintained HGD, the main part of the voltage applied to the diode focuses on a layer of positive space charge, between the cathode and the anode plasma. Conditions ($pd \leq 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{m}$, $E/p \geq 10^3 \text{ kV/Pa}\cdot\text{m}$) provide greater directional flow of charge speed [15]. The cathode 1

(figure 3) is bombarded by ions accelerated in the cathode potential drop area, and high-energy neutrals formed during ion recharging. The entry of ions into the cathode potential drop area occurs from the anode plasma, which is formed in an self-maintained HGD as a result of the interaction with the gas of electrons, accelerated in the cathode drop, reflected from the walls and the anode 4, and formed during ionization.

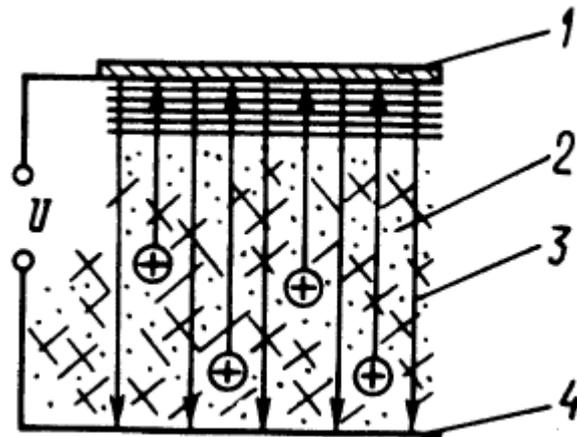


Figure 3— The scheme of the plasma source with independent HGD: 1— cathode; 2— plasma; 3— electron beam; 4— accelerating electrode (anode)

An example of an electron accelerator with non-self-maintained HGD is described in [16]. The generation of electrons in such sources is carried out by bombarding a flat metal cathode of the main HGD (figure 4) with fast ions and neutrals extracted from the anode plasma of an igniter discharge.

The ions are drawn through the perforated anode of the main discharge and are accelerated to a cathode having a potential of up to 300 kV. The electrons produced as a result of ion-electron emission are accelerated to the anode by the same field and, passing through its holes and supporting grid with a foil, are removed from the accelerator. The generation of anode plasma is provided by a thin-wire self-maintained glow discharge, sometimes called orbitron discharge. The igniter discharge is conflagrated in an anode drift cavity between the anodes — thin wires and chamber walls, which are the cathode for an igniter discharge. The discharge can

burn both in a pulse mode (with a frequency of hundreds of hertz and a duration of up to $70 \mu\text{s}$), and in continuous mode.

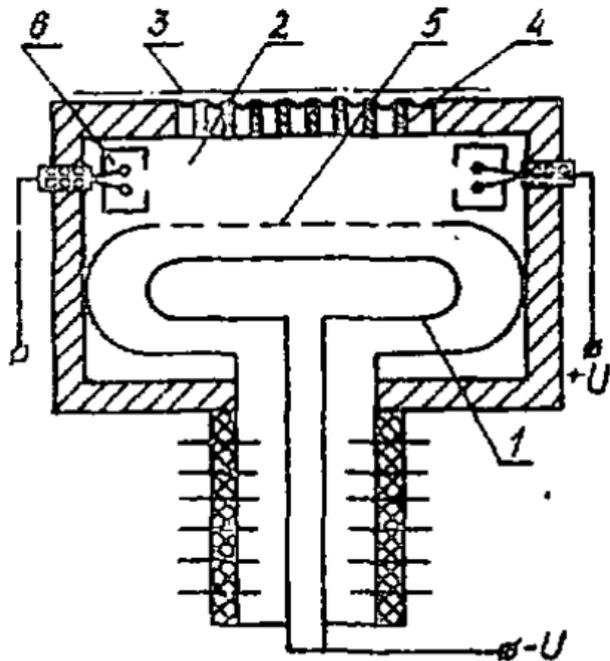


Figure 4— Accelerator scheme with non-independent HGD: 1— cathode HGD; 2— anode drift cavity; 3— foil; 4— support grid; 5— anode HGD; 6— auxiliary discharge wire anode.

In this accelerator, an electron current of 30 A was obtained behind the foil with a density exceeding $15 \text{ mA} / \text{cm}^2$ with the following parameters: the pulse duration is $25 \mu\text{s}$, the current in the accelerating gap is 70 A, the accelerating voltage is 250 kV. The management of non-self-sustaining HGD (changing its parameters and the nature of combustion) is carried out by an igniter glow discharge.

In [17], a pulsed electron source based on HGD is described, in which an igniter is an arc-type contracted discharge (figure 5). With an operating voltage of 130 kV, an igniter discharge current pulse duration of $35 \mu\text{s}$ ($I = 40 \text{ A}$) and a pressure of $\text{He} \approx 1 \text{ Pa}$, the average current density in the HGD interelectrode gap reached $1 \text{ A} / \text{cm}^2$.

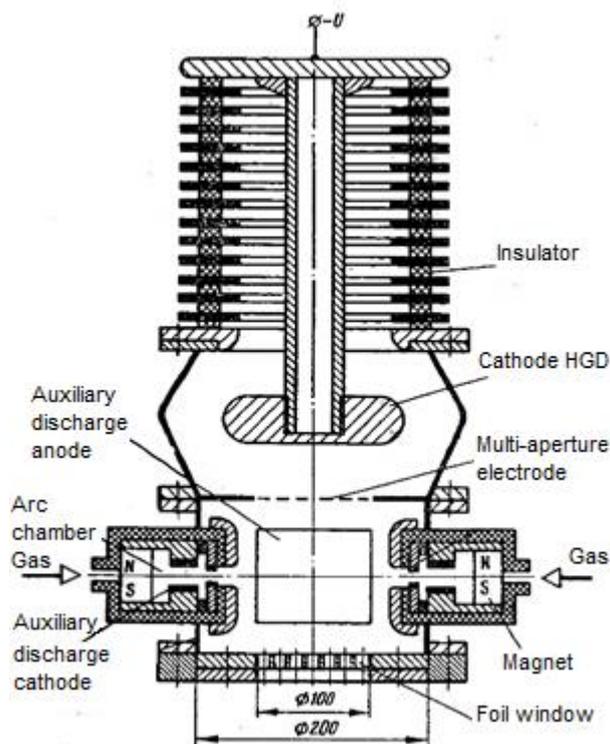


Figure 5— Source design with arc auxiliary discharge

The service life of a cold cathode in a HGD is inversely proportional to the density of the discharge current and depends on the average electric field intensity in the discharge gap. The depth of the emission layer is 10^{16} – 10^{17} at / cm^2 , or 100–200 atomic layers, which causes a greater sensitivity of ion-electron emission to changes in the emitter temperature, pressure and type of residual gas, ion current density, because emission under the action of ions can also occur from a layer of adsorbed gas atoms.

In systems with HGD, the issue of gap electrical strength is of particular importance. The most suitable way to increase the electric strength is to reduce the gas pressure, because a decrease in the gap length with increasing diode voltage dramatically increases the electric field strength and increases the probability of a diode vacuum breakdown. However, a decrease in pressure in the diode reduces the intensity of the ionization and charge exchange processes in the gap and their effect on the diode current, and also worsens the conditions for ignition of the auxiliary discharge and reduces its current. For this reason, there is a limitation on the

achievement in aggregate of high voltage values and current of a diode with ion-electron emission.

4) Based on plasma emitter

In sources with a plasma emitter, the emission of charged particles comes from a bulk plasma bounded by a fine-structured grid. Plasma in volume is created by various types of gas and vacuum discharges. Emitted particles acceleration occurs by the field of the accelerating electrode. The advantages of accelerators with this type of emission are: simplicity and mechanical design reliability, insensitivity to contamination and accidental gas inflow, the possibility of a wide change in beam parameters by adjusting the gas-discharge plasma, short turn-on time, limited discharge formation, high beam uniformity across the section, etc.

In [18] an electron source based on a hollow-cathode space glow discharge (figure 6) is described. Plasma is formed between the hollow cathode 4 and the flat perforated anode 3. Electrons are extracted from the near-anode plasma by the control grid 2, after which the particles are accelerated by electrode 1 field. Due to the considerable transparency of the electrodes 2 and 3, the pressure in the accelerating gap is equal to the pressure in the discharge. Work capacity under such conditions is achieved by choosing such an accelerating gap length in order to prevent vacuum breakdown and limit ignition of an self-maintained gas discharge. For ignition of a glow discharge with a hollow cathode at a relatively low pressure, an igniter electrode 5 is placed in the discharge chamber in the form of a thin wire. Due to the small diameter of the igniter electrode and the breaking of the axial symmetry of the electric field, the electrons perform several oscillations with respect to this anode before they fall on it. In this case, an increase in the average length of the electron flight is achieved, which ensures a more stable ignition of the discharge at low pressure.

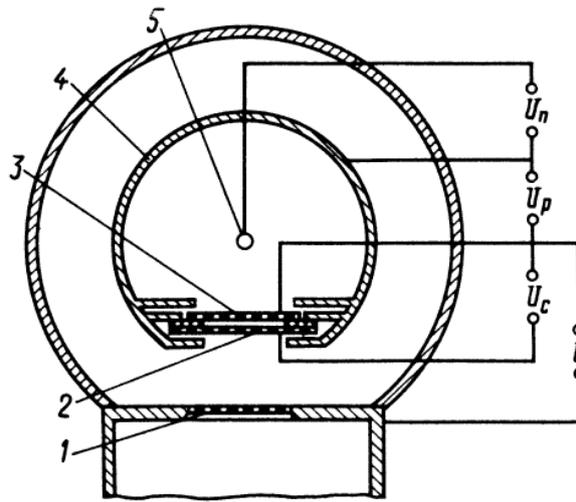


Figure 6 — Hollow cathode plasma electron source: 1— accelerating electrode; 2— control grid; 3— anode; 4— hollow cathode; 5— igniter.

The disadvantage of this system is the lack of pressure drop between plasma generation areas and electron acceleration, which limits the operating pressure range and limits the dielectric strength.

Higher values of the accelerating voltage are achieved in systems with a grid plasma emitter based on a space arc discharge with a cathode spot. This is achieved by generating a plasma of the required density at lower pressures and the presence of a pressure drop between the discharge chamber and the accelerating gap. Moreover, due to a low-voltage arc usage in the emitter, such electron sources have a relatively high energy efficiency and can provide a beam current of up to 10^3 A.

There are several systems for initiating arc discharge (figure 7) [19]. In figure 7a a contracted cold cathode discharge in a magnetic field is applied. When a voltage is applied to the electrodes 1 and 2, reflective discharge is ignited, passing into an arc with a cathode spot. Due to the current limiting of the intermediate electrode 2 arc is transferred through a contracted channel in the ferromagnetic insert 3 to the hollow anode 4 with a mesh butt. Magnetic field leads to an additional contraction of the discharge. Contraction of the discharge ensures the parameter constancy of the anode plasma during cathode spots along cathode surface migration. As a result of gas puffing into the cathode part and gas pressure drop in the contracted channel, the ignition of the igniter reflective discharge is facilitated and the electrical strength of

the accelerating gap is ensured. In the discharge at the entrance to the channel of contraction, a double electrostatic layer is formed with a voltage of 40–60 V. Plasma in the anode cavity is formed as a result of interactions with a gas of electrons accelerated in this layer. An increase in current above a certain limit value, depending on gas puffing, leads to arc breaks. The reason for the breaks at a high discharge current density is the intense removal of neutrals from the contraction channel as a result of elastic interactions with the neutrals of electrons and ions. Due to the decrease in the concentration of neutrals in the channel, the rate of ionization and the flow of ions into the double electrostatic layer decrease, which leads to a violation of the condition of its stability ($I_e/I_i \sim (m_e/m_i)^{1/2}$) and unstable arc burning [20].

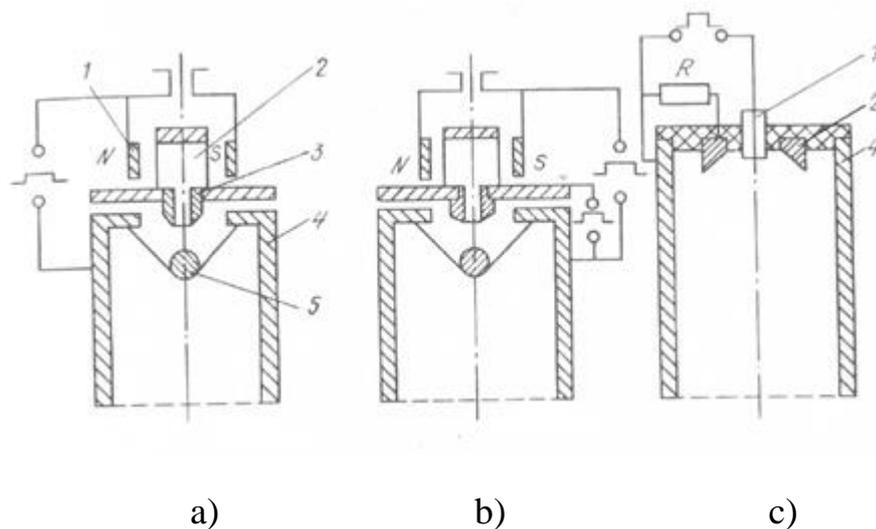


Figure 7— Schemes arc plasma emitters: 1— cathode; 2— intermediate electrode; 3— ferromagnetic insert; 4— hollow anode; 5— additional electrode.

Another method of initiation and the mode of burning of the arc discharge is carried out by an electrode system with an additional power source between the intermediate electrode and the hollow anode (figure 7b). It was found that at high currents a certain plasma density at the output of the contraction channel and an overvoltage occurring at breaks lead to the formation of a cathode spot on the intermediate electrode near the opening of the contraction channel from the hollow anode. In this case, a cascade arc is ignited and firmly burns, in which the discharge between the cathodes and the hollow anode closes through two successively burning arcs: between the cathode and the intermediate electrode and between the intermediate electrode and the hollow anode [21].

In both plasma emitter variants discussed above, gas is required to enter the cathode part of the discharge, although in the second case, after initiation, the arc can burn in the vapor of the electrode material.

In the emitter, the circuit of which is shown in figure 7c, the arc between the rod cathode 1 and the hollow anode 4 is initiated by a discharge across the surface of the dielectric between the cathode 1 and the ring intermediate electrode, which is electrically connected to the hollow anode through a resistor R. Ignition of the discharge can occur without special gas puffing at pressures of 10^{-4} – 10^{-1} Pa and voltage of 600 V [22]. When R is 0, the discharge closes between the electrodes 1 and 2 with a burning voltage of 40 V. The current in the hollow anode circuit does not exceed 1% of the total discharge current. As R increases, the discharge current is redistributed between electrodes 2 and 4 and at $R = 10^2 \Omega$ switches almost completely to the hollow anode. In the steady state, the discharge burns at a voltage of 150–160 V diffusely in the entire volume of the cavity. Plasma, as in a contracted arc, has a positive potential relative to the anode.

In figure 8 the design of the electron source for surface modification of materials is shown [23]. In the vacuum chamber 2, a plasma cathode 3 is installed on the bushing insulator 1, in which a contracted contraction or cascade arc is realized. Electrons are taken from plasma through an emission window with a diameter of 60 mm, covered by grid 4 with cells of 0.5×0.5 mm. The power of the discharge is carried out from the forming line. A constant accelerating voltage of 200 kV is applied between the emitter 3 and the vacuum chamber 2. Accelerated electron beam can be taken to a copper collector, transported to a special chamber, where surface treatment of materials is carried out, or removed to the atmosphere. When the beam was transported, an EOS with a plasma anode 5 was used, in which two plasma generators 6 are used based on an arc discharge initiated by a discharge over the surface of the dielectric.

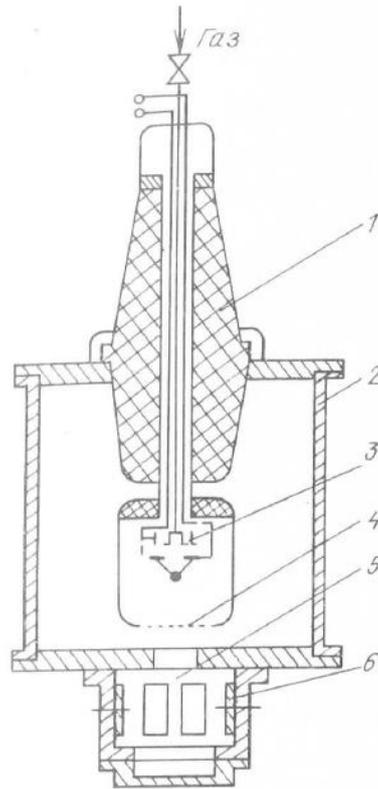


Figure 8— Electron source device: 1— insulator; 2— vacuum chamber; 3— plasma cathode; 4— grid; 5— plasma anode; 6— plasma generator.

A source of electrons with a beam of large cross section was described in [24]. For plasma generation, two plasma generators were used, the axes of which are almost perpendicular to the direction of electron extraction (figure 9). The discharge chambers 1 with an arc contracted discharge are installed in anode cavity 2 butt ends, which is fixed to the vacuum chamber 6 through bushing insulators 5. In the lower part of the anode cavity there is a rectangular window 60×15 cm in size closed by a grid 3 with cells 0.4×0.4 mm. The parallel flow of electrons is provided by the cathode electrode 4 with a height of 3 cm. The electrons are released into the atmosphere through the foil 7 imposed on the copper support grid 8, cooled by water. The accelerator uses a constant accelerating voltage (up to 300 kV) during pulsed burning of the discharge. With the help of this, the appearance of low-energy electrons arising at a pulsed accelerating voltage at the front and in the decay of the pulse is eliminated.

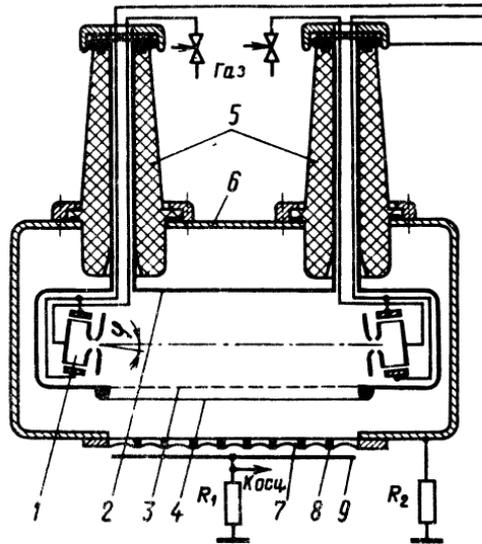


Figure 9— Simplified electron source design

The peculiarities of electron emitters based on low-pressure arc discharge compared to, for example, with explosive emission cathodes should include the possibility of stable operation in a wide range of pulse durations, a large resource, in particular with an arc contracted discharge, the stability of the emission current during a pulse and its good reproducibility at pulse-periodic mode.