

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 нанoeлектроника»

Отделение школы Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование физических процессов в вакуумных сетевых выключателях среднего класса напряжения

УДК 621.316.542.064.26:53-047.37

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ71	Исмаилов Эльдар Мамедбагир оглы		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	Шнайдер Антон Витальевич	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Жаворонок Анастасия Валерьевна			

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ПРОГРАММЕ

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональными компетенциями</i>	
P1	Применять и совершенствовать имеющиеся результаты освоенных дисциплин по программе магистратуры, осознавать проблемы в своей изученной области, создавать методику и пути их устранения, проявлять свои навыки работы в производственных объединениях, создавать интересные- инновационные идеи и принимать участие в их реализации;
P2	Искать пути решения для встречающихся научных и технических проблем методом анализа литературного источника, поставив перед собой цели, планировать приоритеты задач проектировки приборов электроники, чертежей и приборов разного производственного использования с помощью новейших баз элементов электроники, создавать технические проекты на выполнения работ.
P3	Правильно выражать необходимые цели и чётко ставить задачи процессов в зависимости от направления развития электроники и нанoeлектроники, и близких к научным и техническим областей, разумно подходить к выбору различных возможных методов, поиск средств для методичного решения изложенных задач.
P4	Изучать методику создание плана и максимально автоматизировать технические процессы используя информационные и измерительные комплексы как средства для оптимизации технического процесса.
P5	Уметь применять практически свои навыки и умения в организации, исследованиях и производственной работе, используя знания правовых и этических норм в ходе трудовой деятельности.
P6	Использовать математические, естественнонаучные экономические и профессиональные навыки и знания в инновационной деятельности инженера в направлении электротехники.
<i>Общекультурные компетенции</i>	
P7	Использовать русский и иностранный язык как универсальное средство социальной мобильности
P8	Проводить инженерные исследования в направлении электроэнергетики и электротехники, используя критический анализ данных поступающих из мирового информационного ресурса.
P9	Применять способности к активному общению с коллективом в любой сфере деятельности, тщательно оформляя представлять, докладывать и аргументировать защиту результатов выполненной работы.

P10	Осваивать новую электротехническую и электроэнергетическую технику, проверять состояние и следить за ресурсом оборудования, организовывая для этого профилактический осмотр текущего состояния.
P11	Овладеть умением к самостоятельному постоянному совершенствованию инновационных методов исследования, приспосабливаться к меняющимся условиям, увеличивать имеющийся опыт, рассчитывать свои силы и возможности.

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) _____ (Дата) Яковлев В.Ю.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ71	Исмаилов Эльдар Мамедбагир оглы

Тема работы:

Утверждена приказом директора

Срок сдачи студентом выполненной работы:	11.06.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объект исследования- вакуумный выключатель среднего класса напряжения.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Провести обзор имеющийся литературы по методам работы вакуумных выключателей и их особенностям. 2. Определить наиболее подходящие составные части вакуумной камеры для повышения эффективности оборудования. 3. Изучить основные характеристики горения дуги, проанализировать результаты и сформулировать рекомендации для разработки систем и блоков электропитания и управления. 4. Улучшение рабочих характеристик оборудования для оптимизации конфигурации (формы) рабочих

	пространств и поверхностей.
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	Аксенова Наталия Валерьевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение	
Литературный обзор	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	Шнайдер Антон Витальевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ71	Исмаилов Эльдар Мамедбагир оглы		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 128 с., 44 рис., 33 табл., 36 источника.

Ключевые слова: Вакуумный выключатель. Зондовая диагностика характеристик плазмы. Электронный ток насыщения. Генерация аксиального магнитного поля. Диффузный режим горения разряда.

Объектом исследования является экспериментальная модель вакуумного выключателя среднего класса напряжения.

Цель работы – методы регулирования электрической дуги в разрядном промежутке с помощью аксиального магнитного поля и влияние методики изготовления контактов вакуумной камеры на характеристики сильноточного разряда.

В процессе работы проводились: подготовка оборудования и системы регистрации к работе; измерение минимального и максимального магнитного поля на характеристики горения разряда; получение вольтамперных характеристик электрического разряда и их зависимость от метода изготовления контактов.

В результате исследования выявлены особенности режимов горения электрического разряда в вакуумном промежутке.

Степень внедрения: частичная.

Область применения: электрические сети среднего класса напряжения.

Обозначения и сокращения

ВДК: вакуумная дугогасительная камера

КП: катодное пятно

ПВН: переходное восстанавливающееся напряжение

НМДО: насос диодный магниторазрядный охлаждаемый

ЧС: чрезвычайная ситуация

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	10
1 Глава . Литературный обзор	14
1.1 Инициирование вакуумной дуги размыканием контактов	14
1.2 Диффузный режим горения дуги в вакууме	16
1.3 Контрагированный режим горения дуги в вакууме	18
1.4 Влияние внешнего АМП на режимы горения разряда	19
1.5 Формирование катодного слоя после нуля тока в условии роста напряжения на промежутке.....	20
1.6 Актуальность диссертации	23
2 Глава . Экспериментальное оборудование и методика экспериментов.	24
2.1 Сильноточный вакуумный стенд	24
2.2 Система генерации внешнего аксиального магнитного поля.....	30
2.3 Зондовая система для исследования параметров катодного слоя	34
3 Глава . Результаты экспериментов.....	43
3.1 Влияние аксиального магнитного поля на характеристики разряда.....	43
3.1.1 Влияние «полного»(10мс) аксиального магнитного поля.....	43
3.1.2 Влияние «короткого» аксиального магнитного поля	47
3.2 Динамика катодного слоя после нуля тока в условии роста напряжения на промежутке	52
3.3 Ток среза	59
4 ГЛАВА. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	67
4.1 Предпроектный анализ.....	69
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	69
4.1.2 Анализ конкурентных решений	69
4.1.3 SWOT-анализ	71
4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации	74
4.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	75

4.2	Инициация проекта.....	75
4.2.1	Цели и результаты проекта.....	76
4.2.2	Ограничения и допущения проекта.....	76
4.3	Планирование управления научно-техническим проектом	77
4.3.1	Последовательность структурных работ проекта	77
4.3.2	План работы	77
4.3.3	Расчет затрат на проведение исследования	79
4.3.4	Организационная структура проекта.....	85
4.3.5	План управления коммуникациями проекта	86
4.3.6	Реестр рисков проекта.....	86
4.4	Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	89
4.4.1	Оценка абсолютной эффективности исследования	89
4.4.2	Оценка сравнительной эффективности исследования	92
5	Глава. Социальная ответственность.....	95
5.1.	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	95
5.1.1	Производственная безопасность	96
5.1.2	Утечки токсичных веществ в атмосферу	99
5.1.3	Превышение уровня шума и вибрации	101
5.1.4	Недостаток освещенности рабочей зоны	101
5.1.5	Превышение уровня электромагнитного полей (ЭМП)	103
5.2	Опасные факторы проектируемого производственного помещения	104
5.3	Экологическая безопасность	105
5.4	Безопасность в ЧС	106
	Заключение.....	109
	Список используемых источников:	112
	приложение 2	115

ВВЕДЕНИЕ

Все мы живем в век научно-технического прогресса. Наверное, уже никто из нас не представляет себе дом без света или без компьютера и, конечно же, малое количество людей задумываются, как вырабатывается и передается по сетям электроэнергия. А еще меньшее количество людей в той или иной мере знают, на какие классы напряжения делятся сети и как это работает. Если говорить вкратце, после получения электрической энергии на электростанции она передается по линиям электропередач до потребителей. Необходимо иметь возможность отключения тока в любой момент времени с целью обеспечения технического обслуживания или в случае возникновения неисправностей на участке сети. Самые большие нагрузки происходят во время переходных процессов, которые возникают при выполнении коммутационных операций и когда возникают токи повреждений или токи короткого замыкания с возникновением электрической дуги, которая негативно отражается на сроке эксплуатации оборудования. Тем не менее, аварийные ситуации происходят достаточно редко или имеют контролируемый характер благодаря многолетнему накопленному опыту, знаниям и новым технологиям, а так же практическим исследованиям в данной области. Таким образом, из всего перечня устройств отключения наиболее востребованными являются автоматические выключатели, так как позволяют вводить, выдерживать и выключать ток как в номинальных режимах, так и в аномальных режимах работы^[1]. В моей работе речь пойдет об отключениях тока с помощью автоматических выключателей. Диапазон работы относится к среднему классу напряжения до 35 кВ, потому что именно для данного класса напряжения существуют наибольшее количество методов отключения, таких как отключения в воздухе, вакууме, элегазе и в масле. Перечисленные виды выключателей специализируются на отключении с возникновением между контактами электрической дуги, которая при горении рассеивает запасенную электрическую энергию электрической цепи до полного ее обнуления^[1]. Более лучших видов устройств на данный момент времени, которые могли бы продуктивнее защищать оборудование и были более экономичными, а так же безопасными, не существует.

Предлагаю разобраться с видами выключателей среднего класса напряжения до 35 кВ и понять, каким образом они работают, а так же какие имеют преимущества и недостатки относительно друг друга.

Отключение в воздухе.

Так исторически сложилось, что первыми устройствами для отключения линий, стали воздушные выключатели из-за своей простоты конструкции, а так же по причине того, что они работают при атмосферном давлении. Воздух, несмотря на то что обладает не очень высокой электрической прочностью, по сей день используется как среда отключения при напряжениях до 20 кВ. Для нормальной работы данного вида устройства необходимо обеспечить в первую очередь достаточную мощность охлаждения дуги при прохождении тока через ноль для ее гашения^[2].

Принцип работы выключателя, а так же его структура состоят в следующем: дуга в камере сохраняется в течении очень короткого временного промежутка и затем гаснет. Этот способ привел к необходимости создания для каждого полюса устройства своей дугогасительной камеры. Имеется в виду пространство вблизи контактов разделенными между собой огнеупорными пластинами (основной задачей, которых является рассеивание тепловой энергии), в которые дуга затягивается и охлаждается при контакте с огнеупорным материалом. При всем этом мощность, которая подается на дугу из сети остается меньше мощности охлаждения, что ведет к гашению дуги^[2].

Отключение в масле.

Свойства масла как изоляционного материала были известны уже давно. С начала прошлого столетия оно стало применяться как среда отключения для своего класса напряжения, так как эта технология позволяла тогда производить относительно простое недорогое оборудование. Принцип действия данного выключателя таков: контакты выключателя погружены в масло. В момент размыкания контактов возникает электрическая дуга, под действием которой происходит разложение масла с выделением газов водорода (70%), этилена (20%) и метана (10%). Выделившиеся газы сформировывают пузырь, который находится под влиянием давления масла (динамического давления от 50-100 бар), в течение всего времени отключения. При прохождении тока через нулевую отметку давления газа начинает постепенно уменьшаться и происходит гашение дуги дутьем. Гашение дуги происходит благодаря выделившемуся водороду, так как этот газ является отличной дугогасительной средой благодаря своим тепловым свойствам и своей постоянной деионизации, которая лучше чем у воздушной среды^[2].

Отключение в вакууме.

Электроизоляционные свойства вакуумной среды известны давно и используются в устройствах с 1920 годов. Но из-за недостатка вакуумных технологий, использование данной среды началось лишь с 1960 годов. Преимущества данной среды перед остальными видами дугогашения - это небольшие габариты оборудования, большая безопасность и высокая износостойкость по сравнению с остальными технологиями. Если задуматься, вакуум является чистой средой и не имеет никаких примесей в себе, а значит должен быть идеальной диэлектрической средой, но на деле все выходит немного иначе. Вакуум никогда не является идеальным и всегда имеет предел электрической прочности. В вакуумной камере горение электрической дуги происходит за счет наличия паров металла электродов и заряженных частиц (электронов и ионов)^[3]. В других разновидностях выключателей горение дуги происходит в основном за счет ионизированного газа, который находится в межконтактном пространстве. Гашение дуги в вакуумной камере возможно благодаря переходу переменного тока через ноль и существованию пороговых токов дугового разряда, лежащих в пределах единиц ампер для большинства известных металлов. Если говорить подробнее, то при приближении синусоиды тока к нулевому значению количество пятен на катоде (как основного источника электронов) уменьшается и остается последнее пятно, которое сразу же исчезает когда ток становится ниже порогового значения. Быстрое затухание последнего катодного пятна приводит к обрыву тока и полному затуханию дуги. Существует два основных принципа от которых зависит отключающая способность любой вакуумной установки: это состав контактного материала и контроль дуги магнитным полем. В контроле за дугой может использоваться либо аксиальное магнитное поле, либо радиальное, каждое из которых имеет ряд своих преимуществ. Оба типа поля формируются, как правило, током дуги, однако разной геометрией прорезей в контактах. Что касается выбора контактного материала, то от него зависит отключающая способность, так как содержание большого количества паров металла в вакууме после погашения дуги может спровоцировать повторное возникновение дуги. Необходимо чтобы материалы, используемые в контактах и всех поверхностях, что удерживают вакуум, были максимально чисты и не содержали в себе примесей и газов. Одна из особенностей технологии с использованием вакуумной среды это ее универсальность, так как она подходит для защиты и управления воздушных линий, трансформаторов, конденсаторных батарей, двигателей и шунтирующих индуктивностей^[3].

Отключение в элегазе.

Шестифтористая сера (SF_6) это газ, который обладает ценными свойствами диэлектрика. Данная технология отключения, как и отключение в вакууме, были разработаны в 70-х годах прошлого века. Данный газ имеет очень полезную способность отводить тепло, создаваемое дугой. Изучение электрической дуги в пространстве элегаза и ее тепловых характеристик позволяет сделать некоторый вывод о том, что электрическая дуга образуется с помощью диссоциированной плазмы элегаза, имеющей форму цилиндра и имеет большую температуру горения из-за тока отключения. За время горения дуги суммарная сила тока передается через центральную часть горящей дуги. Характеристика дуги зависит напрямую от того, какой тип выключения используется: автокомпрессия, вращающая дуга, саморасширение^[4]. В элегазовых выключателях контакты находятся внутри полностью закрытого корпуса, который наполнен газом, давление в котором меняется в зависимости от приложенного напряжения и заданных параметров. Как было сказано выше имеется несколько различающихся технологий элегазовых выключателей которые принципиально различаются по способу охлаждения электрической дуги, различаются характеристиками и областью применения: 1. Отключение методом автокомпрессии происходит путем расширения объема элегаза сжатого с помощью нагнетателя. 2. Отключение методом саморасширения: в такой технологии используется тепловая энергия, рассеиваемая дугой, для увеличения давления в элегазовой среде. Элегаз выходит из отверстия, над которым проходит дуга. 3. Отключение благодаря вращению дуги: в этой технологии гашение дуги происходит с помощью быстрого движения самой дуги в пространстве газа^[4]. Каждая из изложенных технологий имеет свои сильные стороны, которые необходимы для конкретного вида оборудования.

Актуальность технологии:

В среднем классе напряжений доминирующими в данный момент времени являются элегазовые и вакуумные выключатели, которые обеспечивают наилучшие характеристики во всех аспектах, нежели другие варианты выключателей. Если выбирать между отключением в вакууме либо в элегазе, то тут больше учитывается область применения и технологические предпочтения заказчика. И все же существует одно весомое различие, которое по моему мнению перетягивает балансирующие весы на сторону вакуумной технологии - это то, что выключатели не требуют никакого обслуживания и подкрепляются гарантией работы в течении 20 лет без выхода в ремонт или

замену в независимости от среды в которой приходится им работать. Что касается элегазовых выключателей, то они требуют периодического осмотра и к тому же продукты распада газа в таких установках могут наносить вред персоналу, который их обслуживает. В настоящее время не существует технологии, которая способна заменить отключение в элегазовой среде и в вакуумной среде, обеспечив такие же характеристики:

1. Безопасность. Нет риска взрыва, пожара или нанесения вреда окружающей среде как у масляных выключателей.

2. Имеют более длительный срок службы, нежели воздушные выключатели и масляные и не нуждаются в частом техническом обслуживании как воздушные выключатели.

3. По сравнению с двумя другими выключателями вакуумные и элегазовые выключатели имеют компактные габариты.

1 ГЛАВА . ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Инициирование вакуумной дуги размыканием контактов

В момент размыкания контактов, по которым протекает электрический ток с силой намного выше порогового значения для образования дугового разряда, между ними образуется электрическая дуга. По причине шероховатости поверхности контактов в местах последних соприкосновений контактов плотность тока становится очень большой, что непременно ведёт к перегреву и плавлению контактного материала тем самым возникает жидкий металлический мост. По причине дальнейшего размыкания контактов, разогретый до жидкого состояния с помощью тока мост становится очень неустойчив, и дальнейший его разрыв будет сопровождаться появлением электрической дуги между контактами. Неустойчивость моста может быть вызвана несколькими факторами: 1) Эффект поверхностного натяжения, вызванное током кипение жидкой области электродов с последующими конвекционными потоками расплавленного металла. Область, в которой разрывается мост, по прежнему является источником, испускающим пары контактного материала с электродов. В данный момент времени напряжение на контактах может превышать минимально допустимое напряжение для образования горения электрической дуги для данного контактного материала. Таким образом, в межэлектродном промежутке с разностью потенциалов в несколько десятков вольт образуется область с высокой концентрацией пара. В результате дальнейшей ионизации пара образуется первоначальная плазма,

плотность ионного тока в которой может достигать значения порядка 10^{10} А/м² [5], или уменьшаться до значений 10^7 А/м² в результате образования механизма эмиссии электронов с поверхности катодного материала [5]. Такая эмиссия электронов с поверхности катода называется термоэмиссией и вторичными эмиссионными процессами, которые протекают на поверхности катода в результате ионной бомбардировки. После разрыва жидкого моста напряжение на контактах начинает круто увеличиваться и по причине наличия большого количества паров металла образуется электрическая дуга в мостиковой стадии горения [15], которая имеет столбчатый вид. Такой первоначальный тип дугового разряда называют «мостиковой дугой». В [16] отмечается, что такой вид горения дуги является первой стадией образования последующего дугового разряда при разведении контактов для любых значений отключаемого тока. Такая дуга является стабильной. Время горения мостиковой дуги и её преобразование в конечную форму вакуумной дуги зависит от тока отключения. Переходный процесс от мостиковой к вакуумной дуге, горящей в диффузном режиме, показан на рисунке 1.

По завершению времени горения дуги в мостиковом режиме, представленном на рисунке 1, дуга переходит в диффузное состояние своего горения в парах металла, испаренного с поверхности электродов.

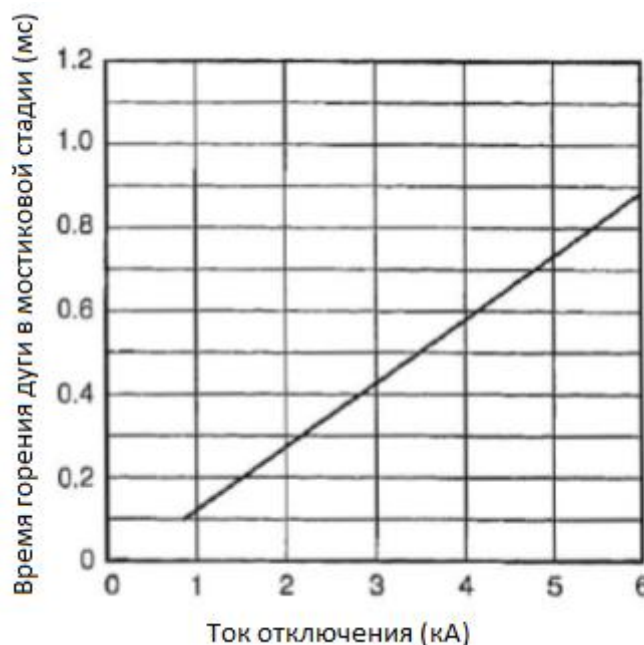


Рисунок 1— Зависимость времени горения дуги в мостиковом режиме от тока отключения [5].

1.2 Диффузный режим горения дуги в вакууме

Режим диффузного горения дуги характеризуется относительно малыми токами отключения, порядка единиц кА (~6 кА). Режим диффузного горения электрической дуги характеризуют равномерным распределением электрического поля по площади разрядного промежутка с небольшим падением потенциала и занимает почти всё межэлектродное пространство. При этом воздействие анода на характер горения электрического столба дуги крайне мал. Всё падение напряжения на электрической дуге находится в области катода, которое напрямую зависит от материалов двух электродов и может составлять значение порядка $10 \div 25$ В ^[5,6]. Поверхность катода покрыта большим количеством постоянно перемещающихся катодных пятен. Таким образом дуговой разряд разделяют на три основных участка (рисунок 2): 1) Область катодная, 2) Столб дуги, 3) Область анодная.

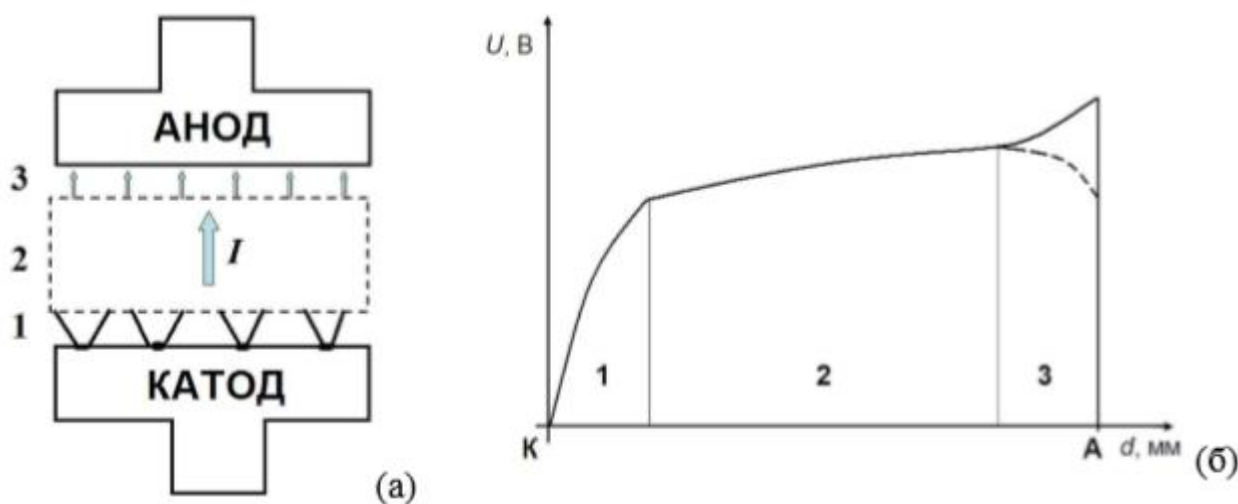


Рисунок 2. – Схематическое представление вакуумной дуги (а) и распределение потенциала в межэлектродном промежутке (б) ^[5].

Первая область является источником первоначальной плазмы, которым является пятно на катоде (КП). КП является небольшим (порядка $10^{-4} \div 10^{-2}$ см) светящейся областью на катоде. Благодаря этой области существует перенос электрического тока от катода к столбу электрической дуги ^{[7,8], [9,10]}. Под светящимся пятном материал катода нагрет выше температуры своего кипения, что является причиной интенсивного испарения катодного материала. Одновременно через пары материала проходит большой поток электронов за счет эмиссии с границы конденсированного вещества. Вследствие чего над катодной поверхностью образуется плазма из материала катода.

Вторая область является участком горения дуги, областью между анодом и катодом. Электрическая дуга является нейтральной плазмой, состоящей из

продуктов эрозии катода и катодных пятен. Ионный ток, по версии авторов^[11,12], может быть порядка 7÷12 % от общего тока, и полностью зависит от материала контактов. Заряд ионов для меди и хрома равен двум.

Электронная температура в электрической дуге, по различным данным, может лежать от 1 до 4 эВ. В таких работах как^[13,14] авторы приняли среднюю температуру электронов равную 3 эВ.

В момент размыкания электродов с последующим увеличением тока разряда появляется множество светящихся катодных пятен (КП) в катодной области. Каждое КП испускает струю плазмы. По мере приближения к поверхности анода эти струи плазмы скрещиваются между собой, образуя таким образом область взаимодействий катодных струй (рисунок 3). По причине того что плотность плазмы очень высокая, то в области скрещивания струй происходит упругие и неупругие столкновения между компонентами плазмы. Это имеет влияние на функцию распределения ионов по энергиям^[15]. За счет протекающего тока происходит образование азимутального магнитного поля. В конечном итоге столб дуги начинает сжиматься и начинает увеличиваться напряжение горения дуги между электродами вследствие небольшого увеличения сопротивления плазменного канала.

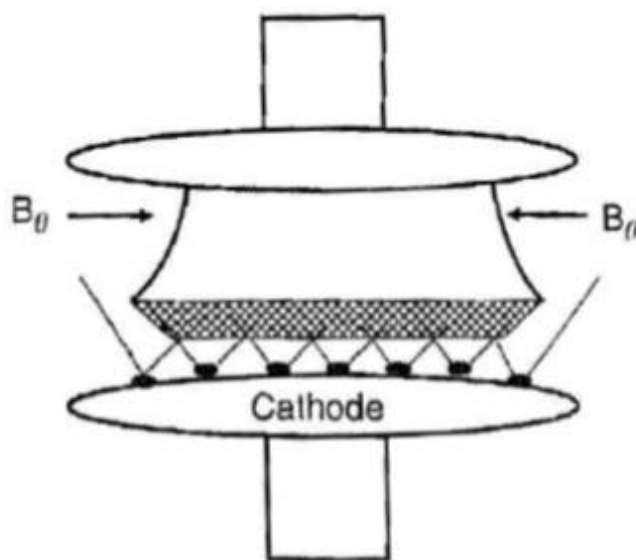


Рисунок 3. – Образование области перекрытия катодных струй^[5].

Третья область является участком расположенным между электрической дугой и анодом и является слоем пространственного заряда – областью анода. В такой области энергия электронов может увеличиваться только за счет ускорения в прианодном падении потенциала. После этого пар из поверхности анодного контакта начинает ионизоваться, что ведёт к появлению медленных

ионов. Следствие падение напряжения на анодном электроде и процессы, происходящие на его поверхности, полностью зависят от режимов горения электрической дуги (от её моды: диффузной моде или контрагированной).

В режим диффузного горения дуги падение анодного потенциала является полностью отрицательным (на рисунке 2, (б) пунктирная линия). Процессы происходящие в горении вакуумной дуги и ее дальнейшее поведение полностью зависит от прикатодной области. В процессе повышения тока электрического разряда начинает увеличиваться падение напряжения в электрическом столбе, одновременно идёт уменьшение отрицательного анодного барьера, увеличивается температура поверхности анода, вызывая его ещё большее испарение в межэлектродное пространство.

1.3 Контрагированный режим горения дуги в вакууме

В момент увеличения тока в разряде ситуация которая описанна в п.1.2, изменится, сначала со стороны анода. Смена горения дуги из диффузного режима в режим контрагированного горения сопровождается сменой знака анодного падения (рисунке 2, (б) сплошная кривая). Механизм резкого (положительного) анодного скачка имеет взаимосвязь с инициированием дефицита ионов в возле анодной области называемое ионным голоданием^[11,16]. С возникновением ионного голодания, как говорят в работе^[11], происходит торможение катодных ионов. Под влиянием магнитного поля, которое образованно собственным разрядным током, электрический дуговой столб начинает сжиматься с последующей фокусировкой в другой части анода. Ускоренные в прианодном участке электроны, успешно нагревают анод, что приводит к его интенсивному испарению. Пары с поверхности анода начинают ионизироваться с помощью первичных электронов, и в прианодной области начинает появляться вторичная плазма с ионами более медленными по своей скорости чем ионы с катодных пятен. Такой механизм ведёт отчасти к пространственной компенсации заряда в слое, но при этом скорый рост тока вновь вызовет нехватку ионов на граничном слое. В итоге протекания вышеизложенных процессов появляется яркое пятно на аноде, которое станет источником анодной плазмы. В момент образования пятна на аноде, начинают возникать осцилляции высокой частоты на напряжении горения дуги. Наличие пятна на анодном контакте зависит от величины тока электрического разряда, времени горения электрической дуги и расстоянии между электродами. Разные режимы жизни анодного пятна рассматриваются в работе^[17,18,19]. Пятно на аноде похоже на ванночку с расплавленным металлом, которая в свою очередь является источником испаряемого металлического пара. В момент перехода тока дуги через нулевую границу промежутков между электродами заполнен

огромным количеством металлического пара, а электрическая проводимость этого промежутка может с легкостью быть восстановлена из-за процессов ионизации в ходе роста напряжения на контактах. По этой причине электрическая дуга в вакууме с возникшим анодным пятном является причиной сильной эрозии контактов, а промежуток между электродами становится зоной низкой отключающей способности.

1.4 Влияние внешнего АМП на режимы горения разряда

Для того что бы исключить образование анодного пятна в ВДК формируется продольное магнитное поле (аксиальное маг. поле (рисунок 4)). Давно известный факт, что в технологии аксиального магнитного поля электронам и ионам задается спиральная траектория движения вдоль линий магнитного поля, которая стабилизирует дугу в диффузном режиме и препятствует возникновению режима сфокусированной дуги. Это в свою очередь предотвращает появление анодного пятна, и эрозия контактов остается минимальной, что позволяет обеспечивать высокую отключающую способность^[20].

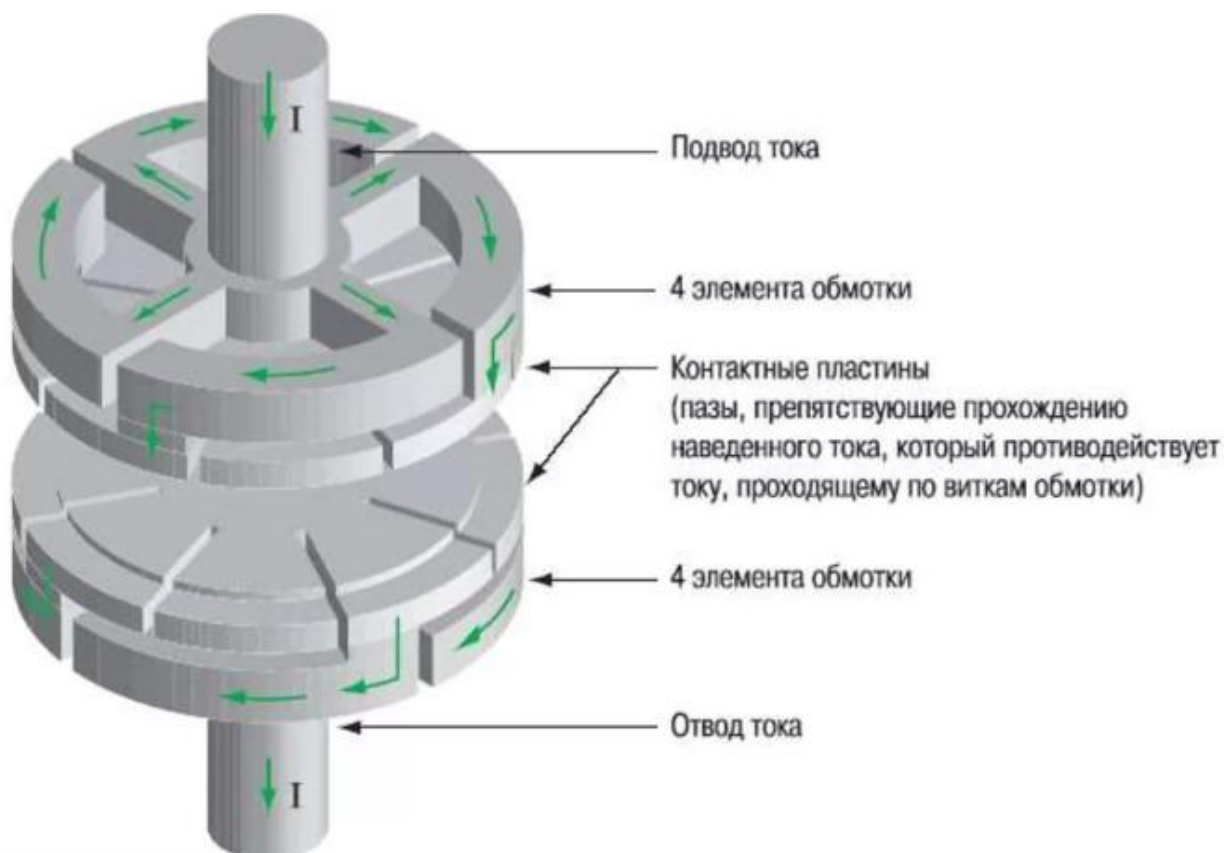


Рисунок 4. – Электроды, формирующие магнитное поле продольного направления^[20].

1.5 Формирование катодного слоя после нуля тока в условии роста напряжения на промежутке

После окончания фазы горения дуги и перехода тока через ноль, вакуумный промежуток восстанавливает свои электроизолирующие свойства (раздел 1.2). В это время в промежутке ещё существует плазма, которая состоит из электронов и ионов, которые были образованы в результате ионизации испаренных с электродов нейтральных атомов. Фаза после горения дуги является неблагоприятным периодом, так как в это время к промежутку прикладывается быстровозрастающее переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН). Если в момент приложения данного напряжения электроизоляционный промежуток выдерживает и не происходит пробоя промежутка, то вакуумная камера успешно выполнила свою функцию. В момент приложения ПВН в катодном слое формируется положительный пространственный заряд, который начинает расширяться и выталкивать плазму из промежутка. За время 1 мкс до момента перехода тока дуги через нулевую отметку происходит явление которое называют «срез тока» на величине 1,8- 1,9 А/мкс^[21,5] что говорит о погасании катодных пятен при пороговых токах. Это ведёт к исчезновению источника сверхзвуковой катодной плазмы, и через время 1 мкс, что соответствует переходу тока дуги через нулевую отметку, в промежутке остаётся небольшое количество плазмы, не имеющей никакой направленной скорости движения. В этот момент сильного роста ПВН ещё не происходит и последуговой ток в промежутке (post-arc current) поддерживается за счёт существующего распада плазмы. Этот период называется «фаза нуля напряжения»^[22].

Электроды ВДК можно рассматривать в рамках теории двойного зонда Ленгмюра, так как зависимость между напряжением и током определена^[23], если принимать во внимание следующие допущения:

- расстояние между электродами и их размеры много больше длины Дебая,
- стационарное распределение плазмы, равномерно вдоль всего разрядного промежутка, в свою очередь частицы, попавшие на электрод, адсорбируются на нем,
- температуры ионов много меньше чем температура электронов,
- отсутствуют любые столкновения частиц в плазме и в слое,
- нет образования новой плазмы.

Во время нуля тока, ток и напряжение в межэлектродном промежутке равны нулю. Тепловая скорость электронов является больше скорости ионов. По этой причине электронный поток на электрод больше ионного потока, что ведёт к возникновению электрического тока. Большой ток электронов ведёт к возникновению плавающего потенциала отрицательного знака электрода относительно плазмы, прекращающего поток электронов и приравнивающего его потоку ионов. По причине того что на катоде (бывшем аноде) начинает расти ПВН, то возрастающее электрическое поле отталкивает все большее количество электронов. Но при этом небольшая часть электронов с высокой энергией в начале период роста ПВН может побороть тормозящее электрическое поле и долететь до катода. По причине того что ПВН увеличивается, значения потенциала катода достигает почти полного запираения электронного потока. С данного момента ток на катоде определяется только потоком ионов (ионный ток насыщения), которые достигли поверхности катода. Последующее увеличение ПВН приведёт только лишь к возрастанию толщины слоя на катоде и не будет оказывать никакого влияния на ионный ток насыщения, с течением времени который начнёт падать по причине уменьшения концентрации плазмы в промежутке.

Электрическое поле на катоде, проникая в квазинейтральную плазму, ускоряет ионы и замедляет электроны до скорости, превышающей тепловую. В результате со скоростью Бома ионы входят в катодный слой^[24]:

$$V_E \approx \sqrt{\frac{kT_e}{M}} \quad (1.1)$$

где k – постоянная Больцмана, T_e – температура электронов, M – масса ионов. Скорость Бома и ионный ток насыщения связаны выражением:

$$i_{i,sat} = g_i v_i n_i A \quad (1.2)$$

где g_i – средний заряд ионов, n_i – плотность ионов на границе плазма-слой, и A – площадь поверхности контактов. Предполагая, что электроны на границе плазма-слой имеют Максвелловское распределение по энергии, для электронного тока получим выражение:

$$i_e = j_{e,sat} A \exp\left(\frac{g_e V_p}{kT_e}\right) \quad (1.3)$$

где $j_{e, \text{sat}}$ – электронный ток насыщения, g_e – элементарный заряд, V_p – падение напряжения в слое. В этом уравнении планируется, что электроны на границе плазма-слой должны иметь такую первоначальную скорость v чтобы выполнялось условие $\frac{1}{2}mev^2 \geq g_e V_p$. Электронный ток насыщения достигается только тогда, когда потенциал на контакте имеет большое положительного значения в отличие от потенциала самой плазмы. В абсолютном значении, электронный ток насыщения сильно превосходит ионный. Для полного тока в соответствии с [22] имеем выражение:

$$i = i_{i, \text{sat}} \tanh\left(\frac{g_e V_p}{2kT_e}\right) \quad (1.4)$$

где V_p – разность потенциалов между электродами. В данном выражении полный ток ограничивается ионным током насыщения. Расширение катодного слоя, как временная функция $s(t)$, изложена в работе [25]. Схематически рост катодного слоя показан на рисунке 5. Такая модель говорит, что внутри катодного слоя нет электронов, и уравнение (1.2) применимо для всех точек в пространстве внутри слоя катода, и на границе слой- плазма. Так как слой проникая в плазму растет, ионы, которые находятся в плазме, двигаются к границе слой- плазма. В таком случае через слой начинает протекать дополнительный ионный ток, по этой причине ток на границе слоя определяется по [26]:

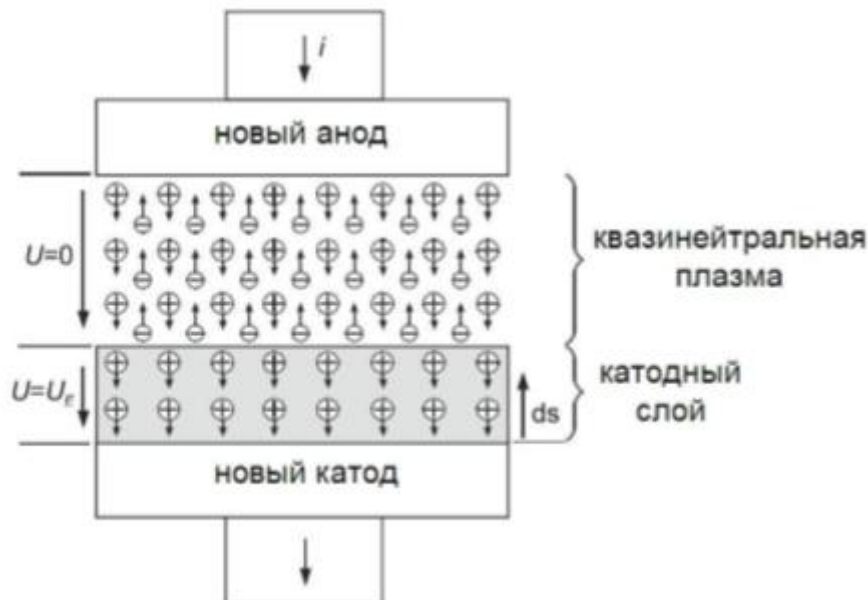


Рисунок 5. – Упрощенное представление роста катодного слоя в разрядном промежутке после перехода тока через ноль [26].

$$i = g_i \left(v_i + \frac{ds}{dt} \right) i_i A \quad (1.5)$$

где v_i – скорость ионов на границе плазма-слой, а ds/dt – скорость расширения границы слоя. Связь между током i , напряжением V и толщиной катодного слоя s описана в работе Чайлда^[27] и имеет вид (после преобразования в СИ):

$$i = \frac{4\varepsilon_0 A}{9} \sqrt{\frac{g_i}{M} \frac{V^{\frac{3}{2}}}{s^2}} \quad (1.6)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума. Модель Чайлда предполагает, что ионы начинают своё движение из неподвижного состояния. Но уравнение (1.5) допускает, что ионы имеют начальную скорость так как происходит движение слоя.

В работе^[25] дополняется модель Чайлда путем внесения в нее начальной скорости потока ионов. В итоге выражение расширения катодного слоя принимает вид изложенный в работе^[26]:

$$s^2 = \frac{4\varepsilon_0 V_0}{9g_i n_i} \left[\left(1 + \frac{V}{V_0}\right)^{\frac{3}{2}} + 3 \frac{V}{V_0} - 1 \right] \quad (1.7)$$

где V_0 вычисляется как:

$$V_0 = \frac{M}{(2g_i)(v_i + \frac{ds}{dt})^2} \quad (1.8)$$

Такая модель подходяще описывает увеличение катодного слоя после перехода значения тока через ноль в условиях возрастания напряжения. Для исследования характеристик катодного слоя посвящают достаточно много времени, так как это та область от которой напрямую зависит восстановлении электроизоляционной прочности ВДК. Модели расширения катодного слоя широко рассматриваются в таких работах как^[26,28,29], а параметры остаточной последуговой плазмы в межэлектродном промежутке с использованием зондовой методики диагностирования рассмотрены в работах^[30,31].

1.6 Актуальность диссертации

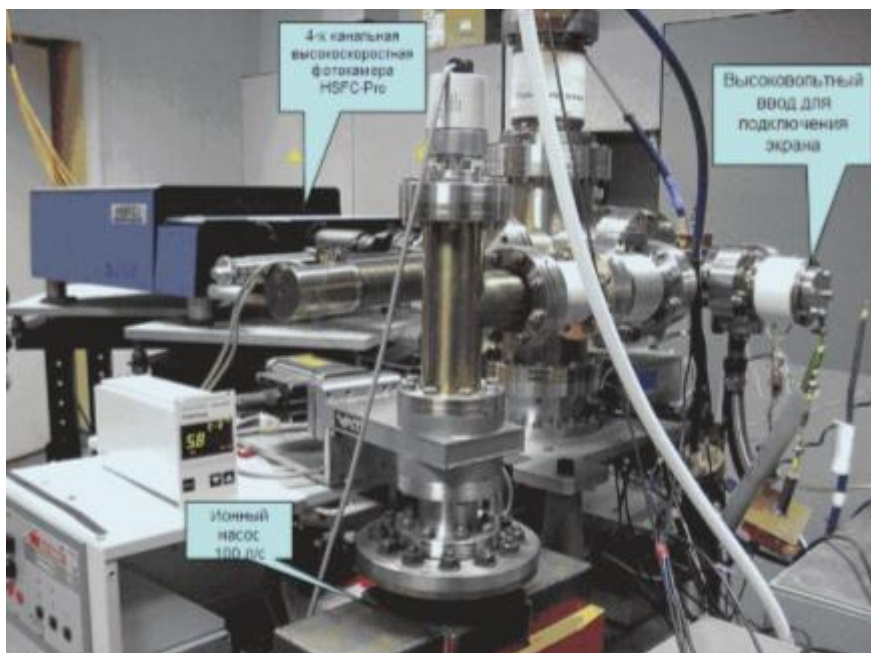
Не смотря на то что отключение в вакуумной среде не является новой и неизученной технологией, ВДК имеет хороший потенциал для дальнейшего изучения и совершенствования его параметров, особенно заслуживает внимания то что касается технологии создания аксиального магнитного поля и изучение сплавов контактных поверхностей. Таким образом, я допускаю

вероятность того, что труды по уменьшению габаритов корпуса выключателя и по повышению класса напряжения будут продолжаться и будут иметь свои плоды. Для этого нужно продолжать исследовать процессы гашения дуги, процессы после перехода тока через ноль, выбор оптимального магнитного поля. Исследование и решение данных задач поможет лучше понять процессы в ВДК, и, возможно, улучшить характеристики ВДК в целом.

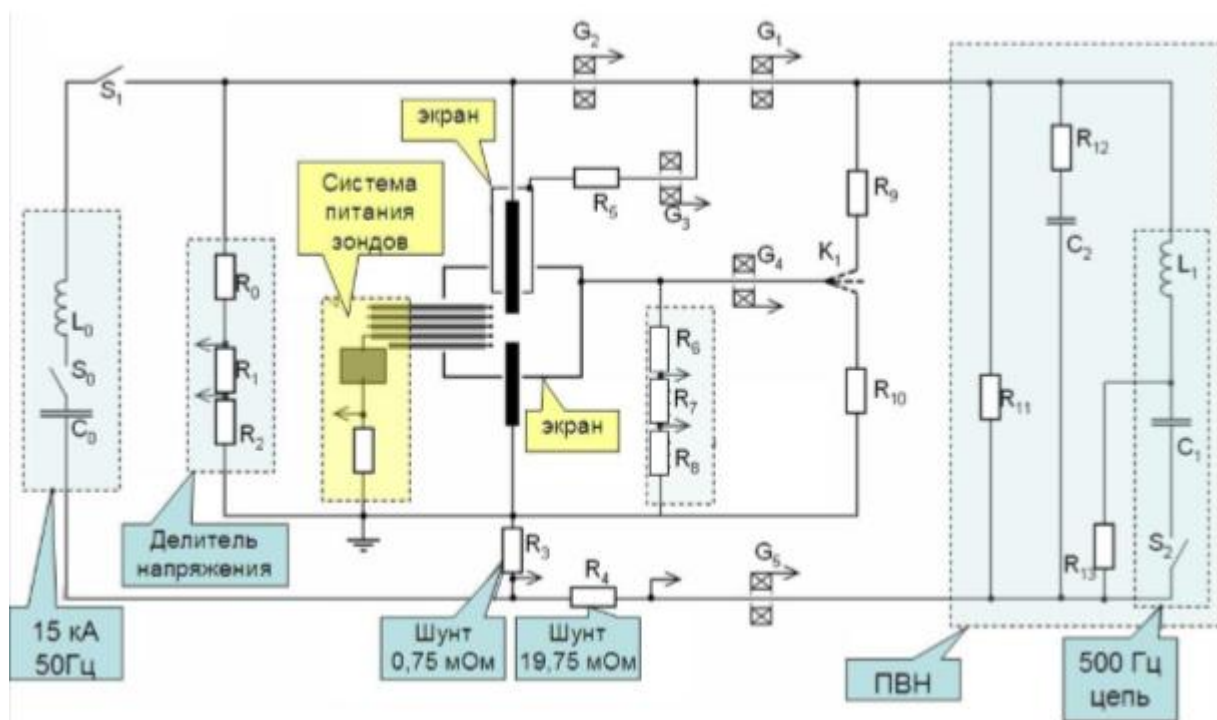
2 ГЛАВА . ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

2.1 Сильноточный вакуумный стенд

Для диагностики процессов, происходящих в вакуумной сильноточной дуге, в экспериментах использовалась модель синтетического стенда по Вейлю-Доббке^[33]. Модель данной электрической схемы представлена на рисунке 6(б). Фотография рабочей модели собранного стенда представлена на рисунке 6(а). Схема данной конфигурации даёт возможность воспроизвести в электрической сети переменного тока режим короткого замыкания.



(а)



(б)

Рисунок 6- фотография экспериментальной установки вместе с системой оптической регистрации разрядного промежутка (а), и принципиальная электрическая схема (б).

Принцип работы схемы основан на параллельном подключении двух контуров, сильноточного низковольтного контура и менее сильноточного высоковольтного контура, на исследуемый разрядный промежуток.

Низковольтная сильноточная цепь образовывается такими элементами как C_0 и L_0 с тиристорным коммутатором S_0 . Такая цепь может генерировать гармонический сигнал (импульс) тока с длительность полупериода по основанию 10 мс, что соответствует частоте тока 50 Гц. При зарядном напряжении 875 В, амплитуда тока может достигать значения 14 кА (рисунок 8).

Высоковольтная, относительно менее сильноточная цепь образована элементами $L_1=3,7$ мГн и $C_1=12$ мкФ с коммутатором S_2 на основе газонаполненного тригatronного разрядника. При зарядном напряжении 8,5 кВ данная цепь генерировала гармонический импульс тока, соответствующий частоте 500 Гц, амплитудой около 1,5 кА (рисунок 6(б), рисунок 9).

Данные параметры схемы обеспечивали скорость спада тока dI/dt к моменту нуля тока, идентичную скорости спада тока в сильноточной цепи.

После перехода тока через ноль цепь генерировала импульс переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) амплитудой до 41 кВ.

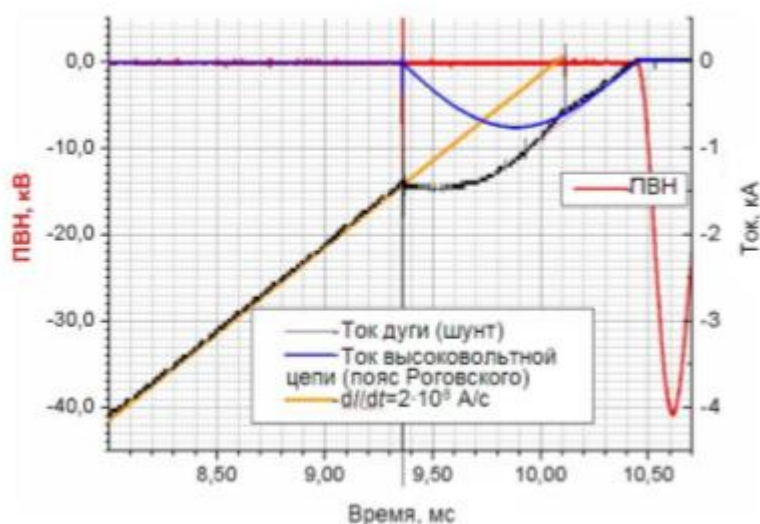
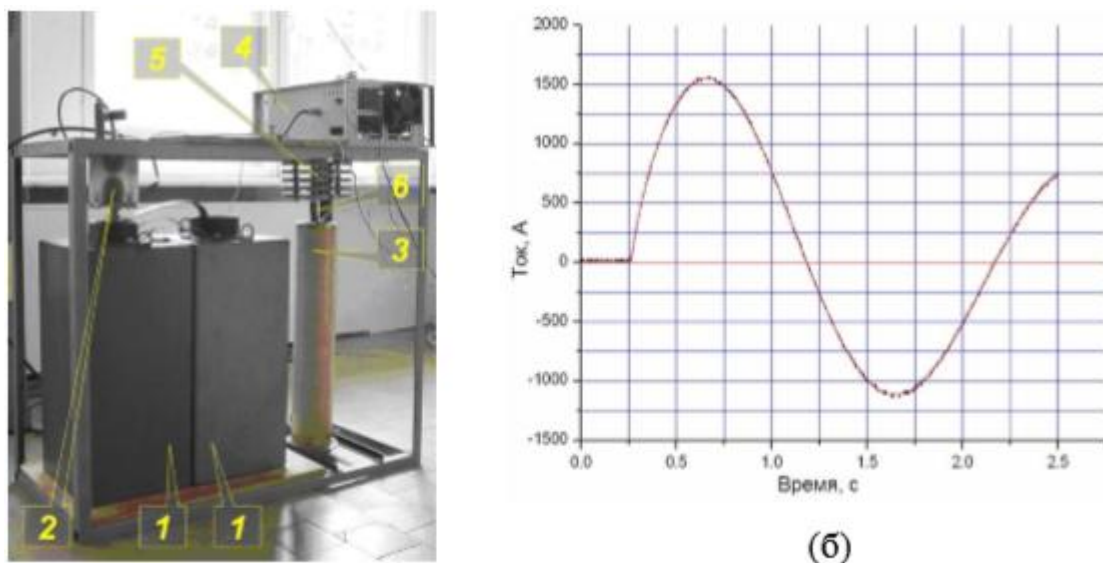
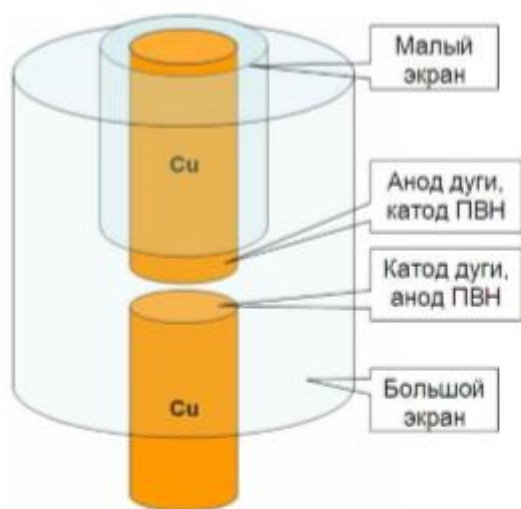


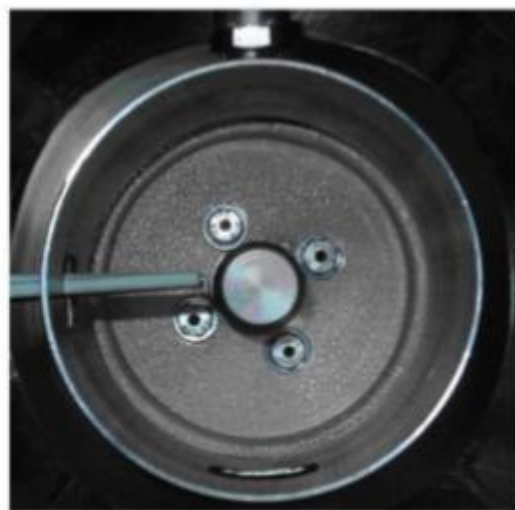
Рисунок 7– Элементы, образующие высоковольтную цепь (а) и форма импульса тока (б), генерируемая цепью и скорость спада тока в момент перехода тока через ноль и рост напряжения ПВН после нуля тока (в). 1- набор конденсаторов, 2- газовый разрядник, 3- катушка индуктивности, 4- источник запуска разрядника, 5- дополнительные конденсаторы , 6- резистор.

Для разделения высоковольтной и силовоточной частей использовался ключ S_1 на основе серийного вакуумного выключателя тока напряжением до 40 кВ. В качестве разрядного промежутка использовался экспериментальный вакуумный выключатель, представляющий собой два помещенных в динамически откачиваемую вакуумную камеру контакта диаметром 20 мм из сплава Cu75%Cr25% (рисунок 8(а)). Один из контактов является подвижным, а

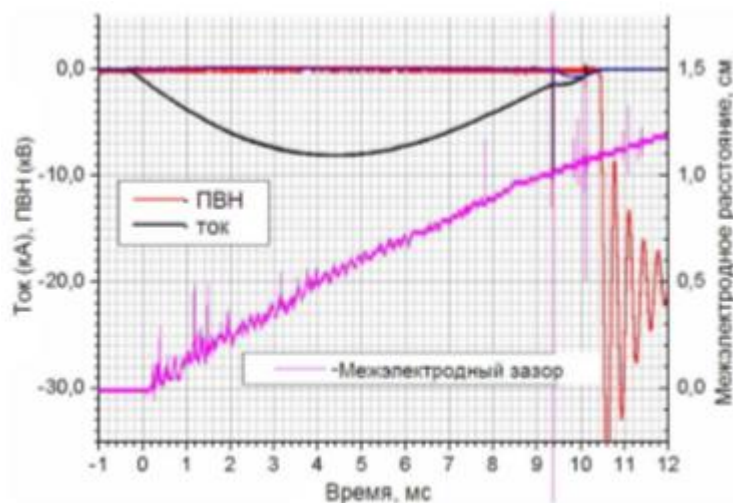
другой – изолированным с использованием высоковольтного ввода. Скорость движения подвижного контакта составляет 1 м/с и остается практически постоянной на протяжении 10 мс (рисунок 8(в)). Верхний электрод оборудован дополнительным экраном (малый экран) диаметром 40 мм по всей длине держателя электрода. Данный экран позволяет разделить измерения последугового тока: на торцевую часть электрода и на его боковую часть. Экран был соединен с верхним (потенциальным) электродом через резистор $R_5 = 50 \text{ Ом}$. Резистор служил для устранения токов короткого замыкания, а также для ограничения тока экрана в случае возникновения на нем катодных пятен. В то же время, при относительно небольшом последуговом токе ($\sim 1 \text{ А}$) на экран разница потенциалов электрода и экрана могла составлять десятки вольт, что намного ниже уровня ПВН. Для измерения последугового тока в цепи электрода и экрана и суммарного тока служили предварительно калиброванные пояса Роговского с электростатической экранировкой G_1 , G_2 и G_3 . Для измерения напряжения на экране и неподвижном электроде в двух диапазонах (вольты и киловольты) используется резистивный делитель $R_0 (44 \text{ кОм})/R_1 (500 \text{ Ом})/R_2 (25 \text{ Ом})$. Вокруг разрядного промежутка был установлен второй экран диаметром 96 мм и высотой 95 мм. В экране имеются отверстия для ввода линейки зондов и наблюдения процессов в разрядном промежутке через кварцевое окно, расположенное на одном из боковых фланцев установки. Данный экран благодаря ключу K_1 (рисунок 6(а)) может находиться под различными потенциалами: плавающий потенциал, потенциал земли и потенциал ПВН. Подача потенциала ПВН на экран возможна благодаря использованию высоковольтного металло-керамического вакуумного ввода. Фотография установленного экрана в промежутке приведена на рисунке 8(б).



(а)



(б)



(в)

Рисунок 8— Вид разрядного промежутка на примере электродов из CuCr(a), фотография защитного экрана (вид сверху) (б) и осциллограмма тока, напряжения ПВН и скорости разведения контактов (в).

Выбор данной системы даёт возможность исследовать влияние потенциала экрана на способность к отключению выключателя. Для измерения потенциала большого экрана используется резистивный делитель R_6 (52 кОм)/ R_7 (500 Ом)/ R_8 (25 Ом). При подключении экрана к потенциалу ПВН или заземлении экрана используются резисторы R_9 (300 Ом) или R_{10} (4 Ом). Наличие этих резисторов не дает образовываться катодным пятнам на экране. Чтобы измерить ток на экране, установлен пояс Роговского G_4 . Работа установки проводилась в условиях глубокого вакуума около 10^{-6} Па. Данный уровень вакуума достигался методом нагрева вакуумной камеры до температуры >100 °С. В момент прогрева камера непрерывно откачивалась форвакуумным насосом. Время прогрева и откачки форвакуумным насосом составляло порядка 8 часов. За это время в камере достигалось давление порядка 10^{-2} Па. После этого нагрев выключался, и вакуумная камера остывала. Работа форвакуумного насоса не прекращалась. После остывания камеры откачка продолжалась магниторазрядным насосом типа НМДО-100 со скоростью откачки 100 л/с.



Рисунок 9– Элементы, образующие низковольтную (сильноточную цепь). 1- конденсаторные батареи, 2- катушка индуктивности, 3- источник питания, 4- генератор задержек сигнала.

В целом работа синтетической схемы показана на осциллограммах представленных на рисунке 10. В начальный момент времени контакты вакуумных выключателей S_1 и VCB замкнуты. В момент включения тиристора S_0 нарастает ток генератора L_0C_0 . После этого в момент времени t_1 контакты вакуумного выключателя VCB начинают размыкаться. С этого момента в вакуумной камере загорается дуговой разряд. Напряжение горения дугового разряда в момент разрыва контактов равно величине ~ 20 В, и возрастает вместе с возрастанием тока. На отметке времени t_3 , когда ток низковольтного контура опускается на отметку нуль, полярность электродов в вакуумном выключателе S_1 меняется, отсекая низковольтный контур, электроизоляционные свойства вакуумной среды восстанавливаются.

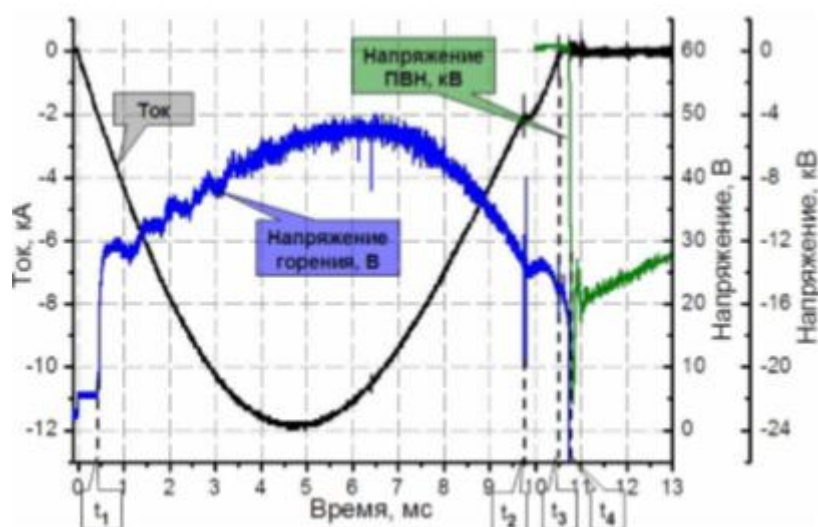


Рисунок 10– Осциллограмма тока и напряжения горения дуги, импульса ПВН, иллюстрирующая работу синтетической схемы.

Переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН) обратной полярности возникает на контактах выключателя VCB при переходе тока через ноль в момент t_4 . Амплитуда и форма импульса напряжения ПВН определяется параметрами высоковольтного контура.

2.2 Система генерации внешнего аксиального магнитного поля

Генерация внешнего аксиального магнитного (АМП) поля осуществляется двумя катушками, установленными снаружи вакуумной камеры (рисунок 13) (поскольку режим горения сильноточной вакуумной дуги с точки зрения анодных процессов в значительной степени определяется магнитным полем). Магнитное поле в разрядном промежутке генерировалось за счет прохождения тока через катушки. Ток в катушках обеспечивался от источника питания (рисунок 11).



Рисунок 11- Внешний вид источника тока для питания катушек.

Источник питания катушек включает в себя конденсаторную батарею на напряжение до 2 кВ, емкостью до 440 мкФ (4×100 мкФ, плюс 2×20 мкФ), источник для заряда батареи, коммутатор (тиристор) для разрядки батареи через катушки. Для регистрации тока в катушках в разрядной цепи установлен шунт $R_{sh} \sim 15$ мОм.

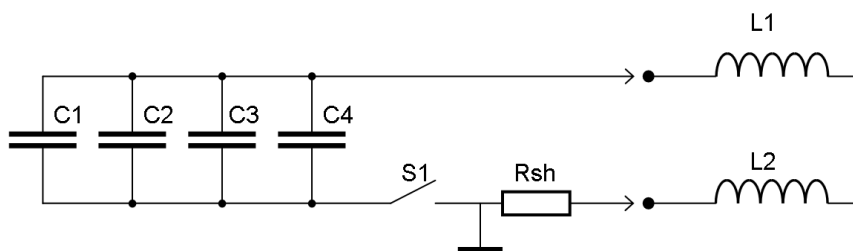


Рисунок 12- Принципиальная схема разрядной цепи.

Система катушек представляет собой две соосно расположенные одинаковые радиальные катушки, расположенные снаружи вакуумной камеры на расстоянии 205 мм друг от друга. Катушки выполнены на каркасе из капролона с наружным диаметром 254 мм, внутренним 204 мм и толщиной 43 мм. На каркас намотан медный провод ПСД диаметром 1.9 мм (диаметр по изоляции 2.2 мм). Всего намотано 10 слоев по 19 витков в слое (190 витков на катушку).

Параметры катушек следующие: индуктивность при последовательном соединении составляет $23 \div 24$ мГн, резистивное сопротивление $R \sim 2$ Ом. При параллельном соединении: общая индуктивность $L \sim 11$ мГн, $R \sim 0.5$ Ом. Максимальная длительность импульса (10 мс) достигается при включении всех конденсаторов $C = 440$ мкФ и последовательном соединении катушек.



Рисунок 13— Фотография вакуумной камеры с катушками для генерации АМП.

Электрический ток протекает по проводнику создавая при этом магнитное поле, которое в свою очередь характеризуется вектором напряженности (H)(рисунок 14). Магнитное поле подчиняется «принципу суперпозиции»^[34]

$$H = \int dH \quad (2.1)$$

при этом исходя из закона Био- Савара- Лапласа:

$$dH = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot [dl, r]}{r^3} \quad (2.2)$$

Где I- сила тока в проводнике, dl - вектор, длины отрезка проводника, r - радиус вектора, соединяющий точку на проводнике и рассматриваемую точку в пространстве (P).

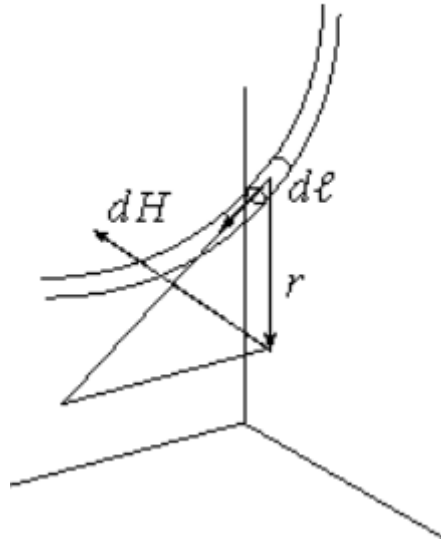


Рисунок 14- Вектор напряжённости магнитного поля согласно закону Био-Савара- Лапласа^[34].

В преимуществе самая часто встречающаяся форма проводников с током является витковая форма в виде колец с радиусом R (рисунок 15 (а)). Форма магнитного поля создаваемая таким проводником с током имеет форму представленную на рисунке 15 (б), магнитно-силовые линии являются симметричными относительно плоскости (x,y) . Магнитное поле рядом с проводником будет выглядеть как магнитное поле обычного прямого провода, по причине того, что влияние удалённых частей петли невелико. В центре кругового тока поле направленно вдоль оси (Z) ^[34].

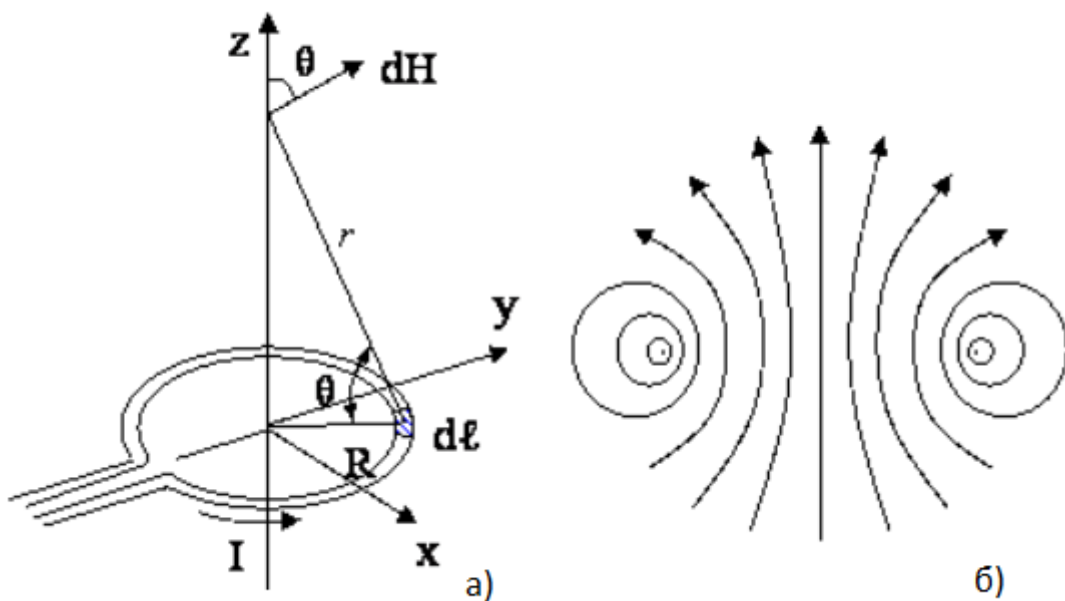


Рисунок 15- Кольцо, через которое протекает ток (а), и форма магнитного поля (б)^[34].

Индукция магнитного поля катушки радиуса R на расстоянии x от катушки^[34]:

$$B_1 = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{INR^2}{(R^2+x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.3)$$

где $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, I – ток, протекающий через катушки, N – число витков катушки, R – средний радиус катушки, x – расстояние от катушки, на котором ищем поле. В нашем случае:

$$R = \frac{D}{2} = \frac{232}{2} = 116 \text{ мм} = 1.16 \cdot 10^{-1} \text{ м} \Rightarrow R^2 = 1.3456 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \quad (2.4)$$

$$x = \frac{205}{2} = 102.5 \sim 103 \text{ мм} = 1.03 \cdot 10^{-1} \text{ м} \Rightarrow x^2 = 1.061 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \quad (2.5)$$

$$(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}} = 3.7311 \cdot 10^{-3} \quad (2.6)$$

$$\frac{R^2}{(R^2+x^2)^{\frac{3}{2}}} = 3.627643 = C \quad (2.7)$$

Тогда поле от 2-х катушек:

$$B = 2B_1 = \mu_0 INC(\text{Тл}) \quad (2.8)$$

Разделим обе части уравнения на I:

$$\frac{B}{I} = \mu_0 NC = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 190 \cdot 3.627643 = 8.6614 \cdot \frac{10^{-4} \text{ Тл}}{\text{А}} = 0.866 \frac{\text{мТл}}{\text{А}} \quad (2.9)$$

Это означает, что каждый ампер тока, проходящий через катушки, создает индукцию магнитного поля в 0.866 мТл. Для 225 ампер тока в катушках индукция будет равна 194.8 мТл.

2.3 Зондовая система для исследования параметров катодного слоя

Для того чтобы диагностировать плазму в течение всего времени горения электрической дуги, использовалась система двойного зонда Ленгмюра. Два одинаковых зонда состояли из отрезка молибденовой проволоки с диаметром 1,2 (мм), помещенный во внутрь трубки из керамики с наружным диаметром 4 (мм). Расстояние от самого зонда до внутренней поверхности трубки равно 0,1 (мм), что обеспечивает электрическую изоляцию между трубкой и зондом. Конец каждого из зондов загнут в азимутальном направлении не нарушая соосности керамической трубки и проволоки (рисунок 16 (а)). Такой метод

увеличивает площадь собирающей поверхности каждого зонда до 20 (мм²) без ухудшения зондирования в радиально-осевой плоскости.

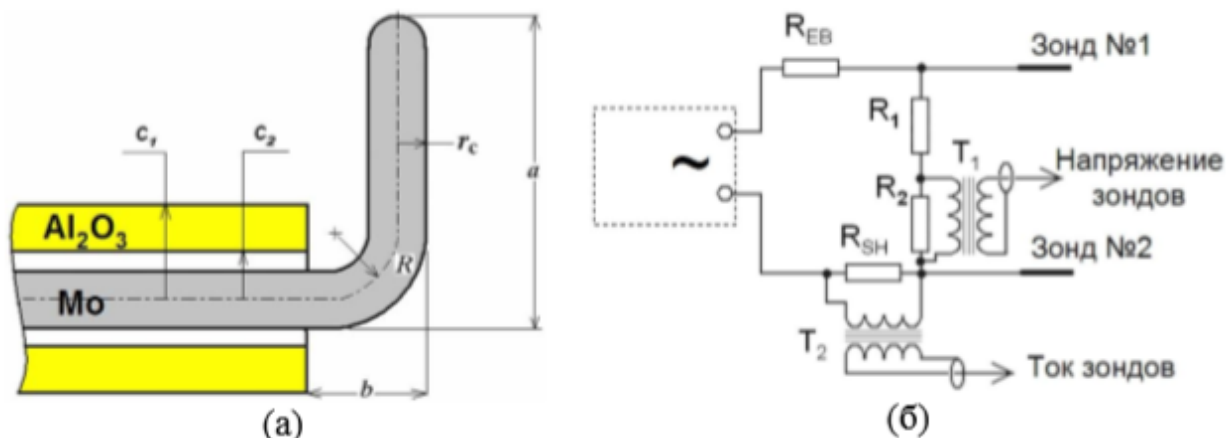
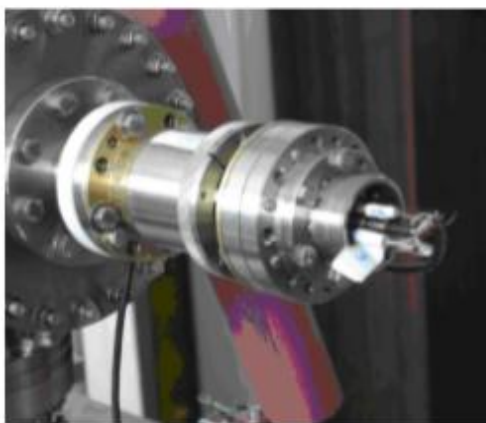


Рисунок 16— Конструкция зонда (а) и схема питания двойного зонда (б). Геометрические размеры : $a = 5,5$ мм, $b = 2,12 \div 2,4$ мм, $R = 1$ мм, $r_c = 0,6$ мм, $C_1 = 2$ мм, и $C_2 = 1$ мм.

На плечи зонда подавалось переменное напряжение частотой, в пределах $20 \div 400$ кГц, длительность составляла 10 мс и амплитуда $30 \div 40$ В. Электрическая схема включения двойного зонда представлена на рисунке 16(б). Для мониторинга изменения потенциала зондов относительно земли использовался резистивный делитель напряжения $R_1/R_2 = 2,2$ кОм/25 Ом. Для мониторинга тока поступающего на зонд использовался шунт $R_{sh} = 0,5 \div 1$ (Ом). Использовалось дополнительное сопротивление, имеющее значение $R_{EB} = 3 \div 10$ Ом, необходимое для ограничения тока в цепи зонда.

Система состоящая из двойного зонда полностью изолирована от земли. Для мониторинга тока и напряжения между зондами для гальванической развязки использовали трансформаторы с сердечниками из феррита.

Для изучения динамики катодного слоя, после перехода тока через нулевое значение, в условии приложенного к разрядному промежутку импульса ПВН использовали систему одиночных зондов Ленгмюра. В качестве одиночных зондов использовали линейку из пяти зондов. Фотография зондов около разрядного промежутка представлена на рисунке 17(б).



(a)



(б)

Рисунок 17– Разрядный промежуток с пятью одиночными зондами Ленгмюра (б), для возможности диагностирования расширения катодного слоя представлена фотография манипулятора, позволяющего перемещать зонды в радиальном направлении (а).

Мы полагаем, что исследуемая плазма, как и электроды, имеют осевую симметрию и для восстановления динамики слоя требуется диагностика плазмы в радиальном и осевом положении. Именно для этой цели измерения проводились с помощью системы из пяти зондов, расположенных параллельно оси промежутка. Вакуумный ввод располагался на манипуляторе, обеспечивающем перемещение гребенки зондов как одного целого в радиальном направлении. Для установления местоположения зондов в случаях, когда они находились вблизи от контактов, производилась визуализация промежутка между контактами с помощью четырёхканальной двенадцати разрядной высокоскоростной камеры HSFC Pro с электронно-оптическим усилителем яркости.

У каждого из зондов был свой независимый канал питания на источнике. Все каналы источника питания зондов имели импеданс равный 25 Ом. Напряжение питания зондов регулировалось одновременно в диапазонах от 20 до 50 В. Время синхронного запуска каналов составляло $50 \div 100$ мкс до перехода тока дуги через ноль. Длительность импульса напряжения в каждом из каналов составляла >1 мс. Электрическая схема одного канала (зонда) представлена на рисунке 18.

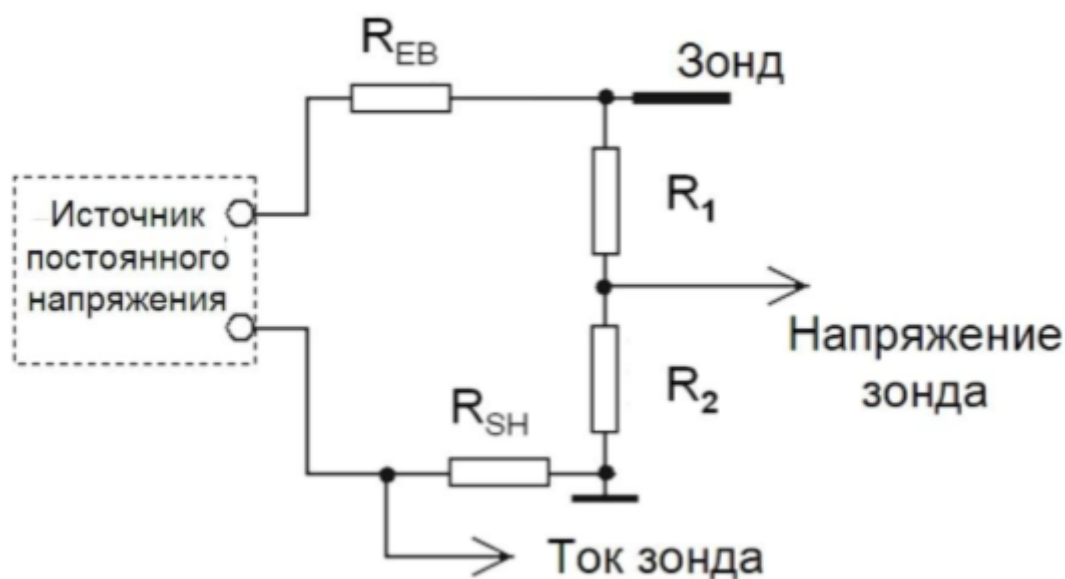


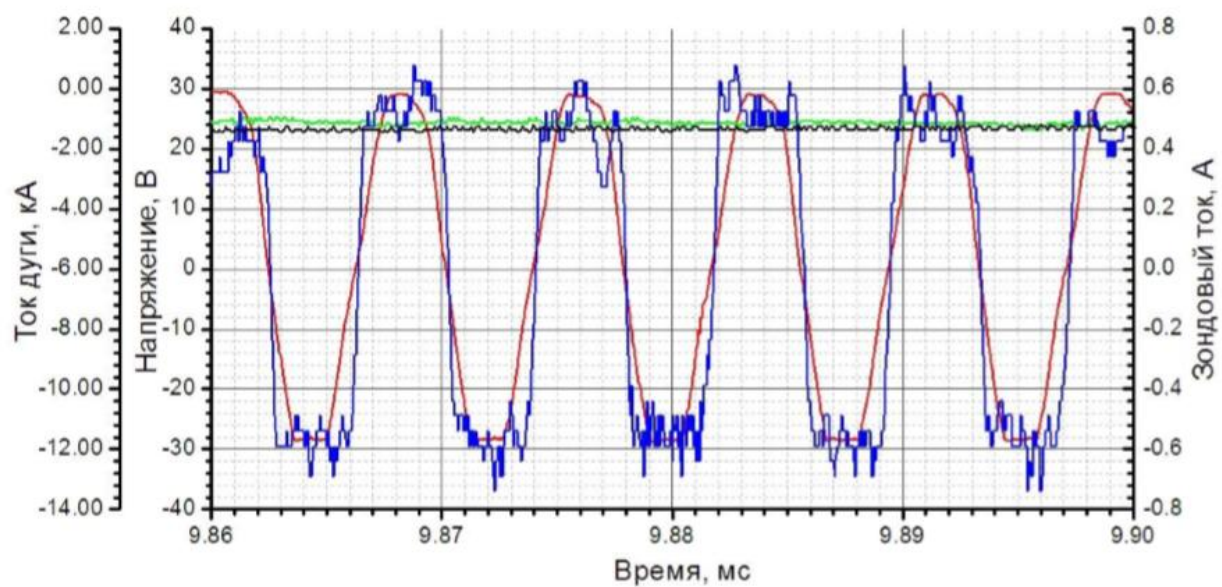
Рисунок 18– Электрическая питания схема одиночного цилиндрического зонда Ленгмюра, который применяется для мониторинга изменения границы плазмы после перехода тока через нулевую отметку.

Зондовые измерения параметров плазмы при горении сильноточной вакуумной дуги

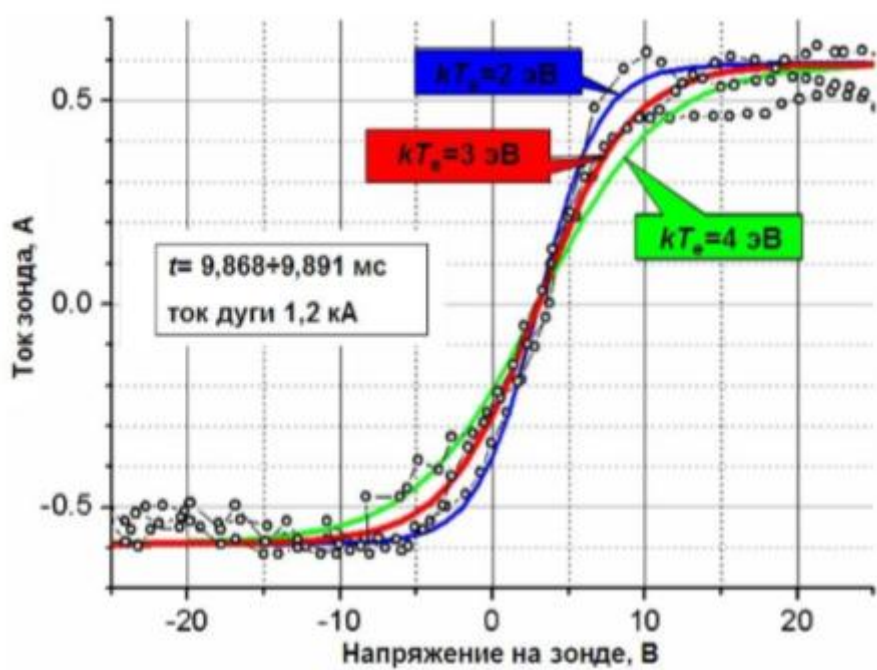
Измерения двойным зондом

Для диагностики температуры электронов в плазме на стадии горения электрической дуги в вакууме была использована методика с двойным зондом. Частота переменного напряжения, которое подавалось на зонды, составляла 100÷400 кГц. На рисунке 19 показана осциллограмма двойного зонда. Параметрами для измерения были: ионный ток насыщения на зонд i_{is} , температура электронов T_e и разность потенциалов ΔV .

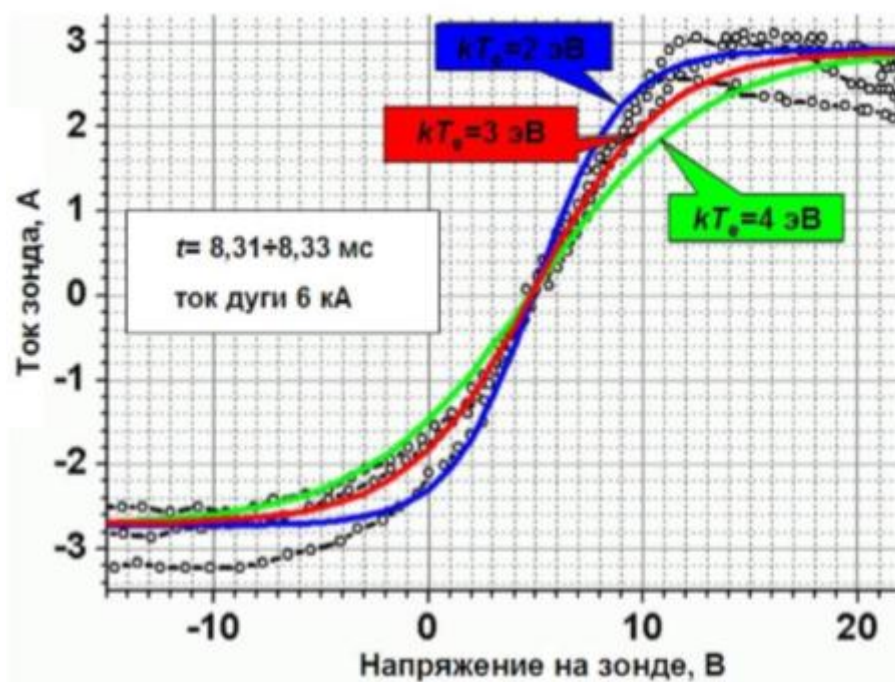
Видно, что температура электронов в момент горения электрической дуги не зависит от частоты подаваемого на зонды напряжения, тока дуги и момента измерения и близка к 3 эВ. Мы полагаем, при переходе тока дуги через ноль температура имеет такое же значение как измеренное для стадии горения дуги.



а)



б)



в)

Рисунок 19— Набор осциллограмм тока и напряжения с двойного зонда и тока и напряжения горения дуги (а), вольт амперная характеристика двойного зонда, полученные путем обработки в различные моменты времени (б,в).

Так же существует необходимость учитывать взаимодействия потока ионов из катодной плазмы с плотным нейтральным паром материала электродов в промежутке между контактами. Особенно, в ряду ионно-атомных взаимодействий наибольшим сечением обладает процесс резонансной перезарядки. В виду таких взаимодействий в плазме появляется большое количество ионов с низкими энергиями, которые присуще парам с Максвелловским распределением, $kT_i \leq 1$ эВ.

При приближении тока разряда к нулевой отметке, амплитуда сигнала двойного зонда начинает уменьшаться и в момент нуля тока становится сравнимой с шумом. Характерные осциллограммы двойного зонда, включающие момент перехода тока через ноль, показаны на рисунке 20.

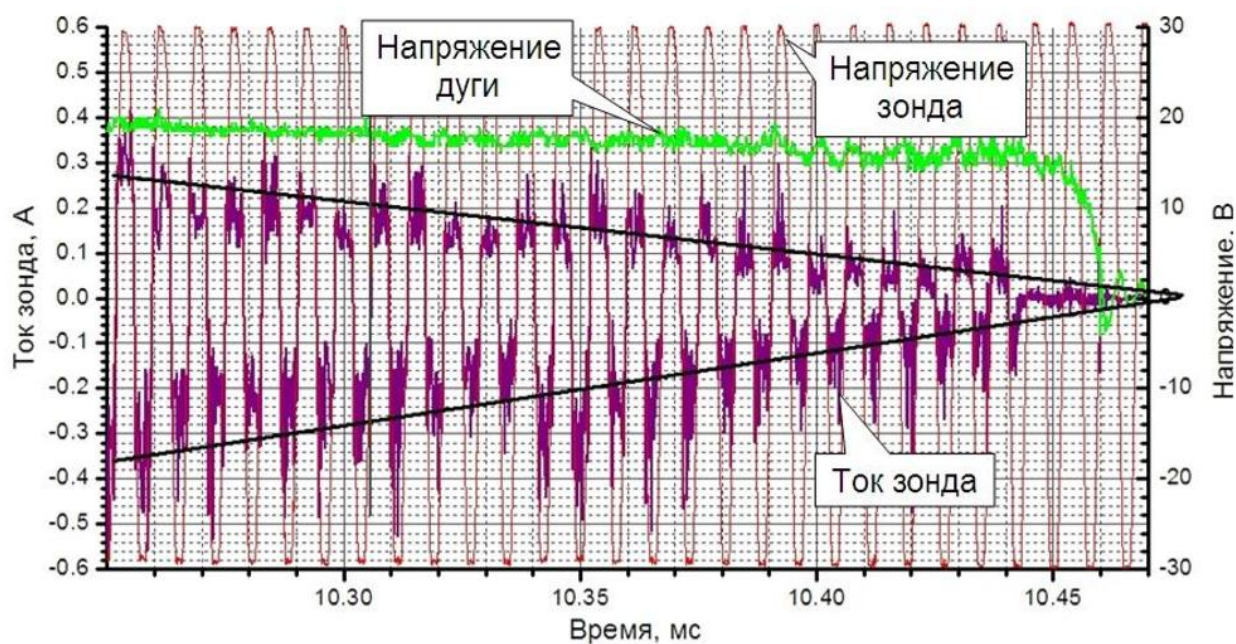


Рисунок 20– Сигнал с двойного зонда вблизи нуля тока разряда амплитудой равной 10 кА. Сплошной линией показано затухание сигнала к концу полупериода тока.

Часто за время $10 \div 20$ мкс до перехода тока протекающего в дуге через ноль амплитуда зондового тока резко обрывалась при значениях $2 \div 3$ мкс. Тут может быть несколько причин. Первая причина такого скачка может быть из-за скачкообразного изменения плотности плазмы возле зондов. Вторая причина - это может быть быстрое изменение функции распределения ионов по скоростям. Выдвинем предположение, что момент начала срыва тока двойного зонда является последствием гибели катодного пятна. До данного момента времени ионный ток насыщения на отрицательный зонд определяется в значительной степени потоком ионов, испускаемым из катодного пятна. В момент времени $2 \div 3$ мкс происходит исчезновение быстрых ионов из межэлектродного промежутка, затем ионный ток насыщения станет Бомовским. При одинаковой плазменной концентрации Бомовский ионный поток, приходящий на зонд, в 3 раза менее плотный, если сравнивать с током быстрых ионов, что и приводит к резкому падению тока.

Экстраполяция амплитудного затухания тока ионного насыщения со временем (с током разряда) во время перехода тока электрической дуги через нулевую отметку также не позволяет однозначно и точно определить ток ионов в этот временной промежуток. Более надежно можно восстановить лишь верхнее значение тока ионного насыщения ($0,01 \div 0,015$ А), используя которое плотность плазмы может быть определена как менее $3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при значении тока электрической дуги на уровне до 10 кА. По этой причине диагностика

плотности плазмы вблизи нулевого значения электрической дуги по току двойного зонда была крайне затруднительна. Поэтому для мониторинга уровней редкой (концентрация от 10^{12} см⁻³ и ниже) плазмы (перед гашением сильноточной вакуумной дуги), именно с точки зрения надежной диагностики сигналов по току, является более оправданным использование одиночного зонда в работах по исследованию характеристик плазмы.

Измерения одиночным зондом Ленгмюра

Как было сказано выше, изучение тока ионного насыщения позволяет определить параметры плазмы в момент горения дуги, и не представляется возможным сделать это в момент приближения тока дуги к нулевой отметке и после преодоления током нуля. При тех плазменных концентрациях, соответствующих времени перехода тока дуги через ноль, ток ионного насыщения становится таким маленьким, что регистрируемый сигнал является сильно искажен электромагнитным шумом, который генерирует установка. По этой причине, для того чтобы измерить концентрацию плазмы использовался электронный ток насыщения. Так как электронный ток на зонд может достигать значения нескольких ампер, импеданс смещения генератора потенциала зонда был понижен до уровня 9 (Ом). Для того чтобы уменьшить воздействие отбираемого зондом тока на все параметры электрического разряда возле перехода тока электрической дуги через нулевое значение, использовался только один зонд в линейке, остальные зонды было решено изолировать.

Схематическое представление зонда в плазме показано на рисунке 21.

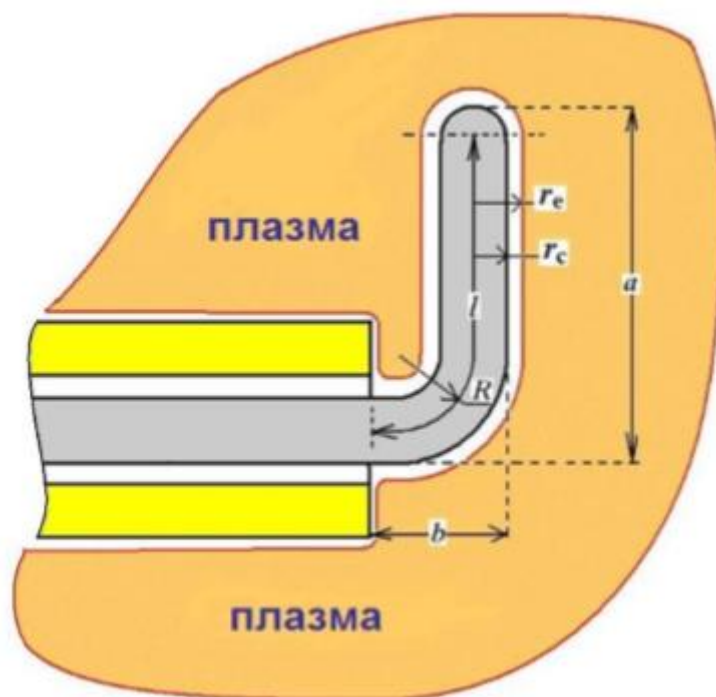


Рисунок 21– схематическое представление одиночного зонда, помещенного в плазму.

В реальной ситуации слой объемного электронного заряда начинает изменяться во времени и при высоком положительном потенциале зонда и может достигать больших размеров.

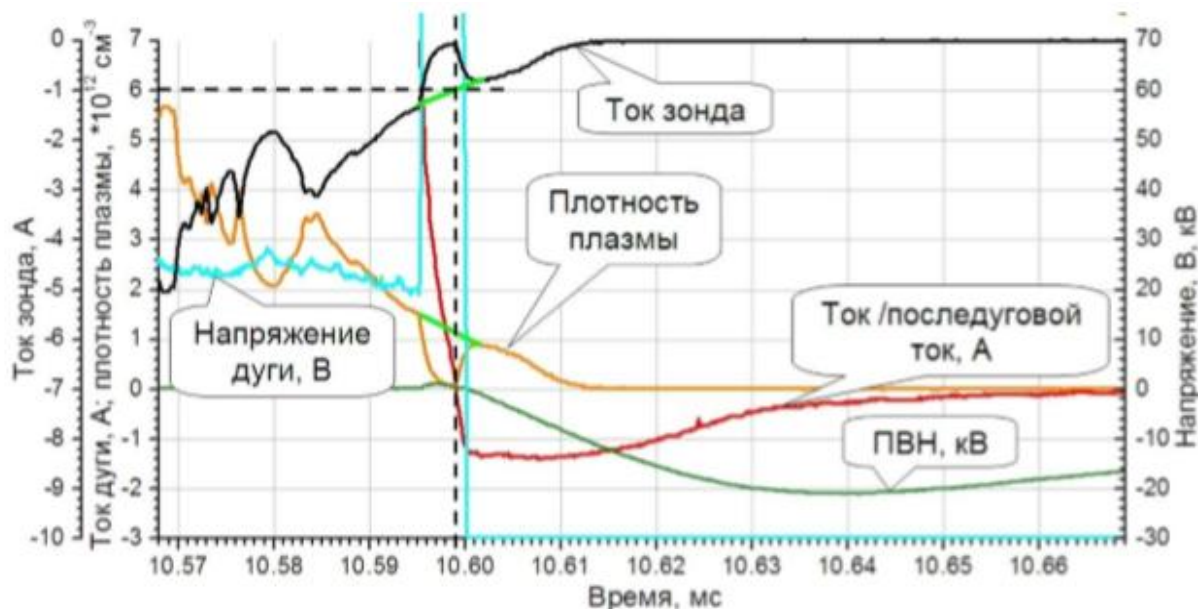


Рисунок 22 – Осциллограмма напряжения, импульса ПВН и тока дуги на зонд, а так же плотность плазмы около значения нуля тока. Пунктирная линия является моментом перехода тока через ноль.

Как видно из осциллограммы, перед гашением дуги происходят резкие всплески по напряжению, которые вызваны затуханием последнего пятна на катоде. В результате чего потенциал плазмы начинает повышаться относительно зонда с положительным значением и поступление тока на зонд из плазмы сразу начинает прекращаться, вызывая тем самым провал в поступающем сигнале. В такой ситуации концентрация плазмы во время перехода тока дуги через нулевую отметку может быть оценена с помощью метода интерполяции зондового сигнала, как показано с помощью зеленой линии на рисунке 22.

Все результаты измерений концентрации плазмы с помощью одиночного зонда сведены в таблице 1. Эти результаты были получены на основе, большого количества актов горения дугового разряда на одно положение зондов в пространстве, для конкретной амплитуды электрического тока разряда, и усреднении тока на зонд по этим выстрелам.

Таблица 1. Средние значения плотности плазмы на разных расстояниях зонда от межэлектродного промежутка и при разной амплитуде разрядного тока.

Положение зонда Ток дуги, кА	3 мм		4,5 мм		18 мм	
	Средняя плотность	Отклонение	Средняя плотность	Отклонение	Средняя плотность	Отклонение
8	$9,65 \times 10^{11}$	$\pm 2,33 \times 10^{11}$	—	—	$3,63 \times 10^{11}$	$\pm 2,25 \times 10^{11}$
10	$2,51 \times 10^{12}$	$\pm 1,55 \times 10^{12}$	—	—	$1,23 \times 10^{12}$	$\pm 5,30 \times 10^{11}$
12	$5,50 \times 10^{12}$	$\pm 3,54 \times 10^{12}$	$2,69 \times 10^{12}$	$\pm 1,79 \times 10^{12}$	$3,85 \times 10^{11}$	$\pm 2,12 \times 10^{10}$

Исходя из данных в таблице, мы видим, что с возрастанием тока разряда плотность плазмы начинает расти, так как в промежуток вкладывается большое количество энергии, по этой причине в промежутке генерируется большое количество плазмы. При отдалении зонда от промежутка, при одинаковом электрическом токе разряда, убывает и концентрация.

Исходя из всего выше сказанного, применение одиночного зонда Ленгмюра даёт возможность получать параметры плазмы как до перехода тока электрической дуги через нулевую отметку, так и после этого. Измеренная таким методом концентрация электронов в плазме после перехода электрического тока через ноль не превышает значения 10^{12} (см³).

3 ГЛАВА . РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

3.1 Влияние аксиального магнитного поля на характеристики разряда

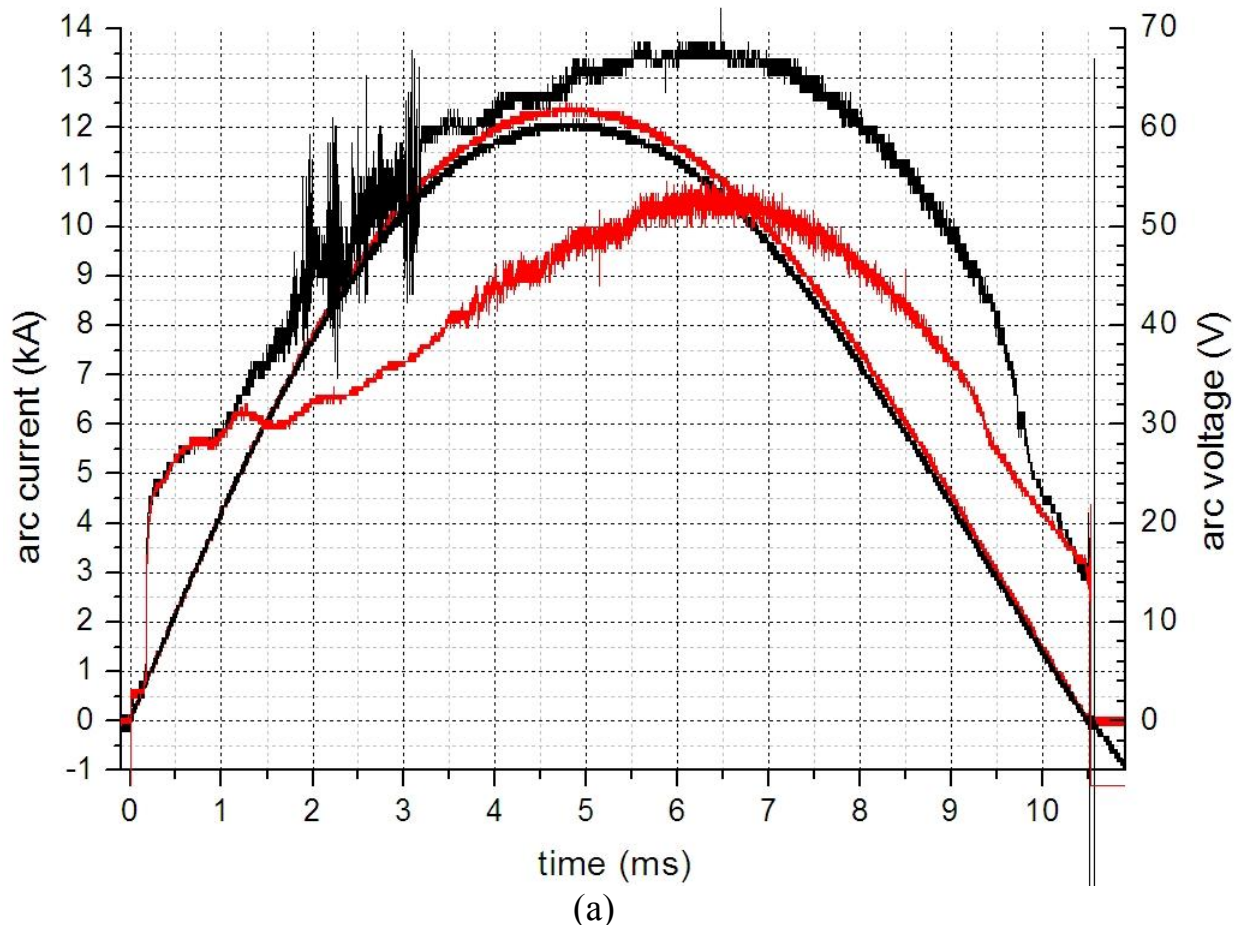
3.1.1 Влияние «полного»(10мс) аксиального магнитного поля

Данные измерения сопровождались отслеживанием распределения плазмы в контактном промежутке, зажиганием электрической дуги и воздействием приложенного магнитного поля. Так же проводились эксперименты без воздействия поля на дугу. При приложении аксиального магнитного поля электронам и ионам задается спиральная траектория движения вдоль линий магнитного поля, которая стабилизирует дугу в диффузном режиме и препятствует возникновению режима сфокусированной дуги. Это предотвращает, таким образом, появление анодного пятна, и эрозия, по-прежнему, остается ограниченной, что позволяет обеспечить высокую отключающую способность.

Рассмотрены распределение плотности плазмы и ее динамика после перехода тока через ноль, зависящие от параметров дуги, таких как амплитуда и длительность тока дуги, и воздействия аксиального магнитного поля.

На рисунке 23 (а,б) изображены осциллограммы горения электрической дуги с приложенным магнитным полем и без него. Длительность магнитного поля соответствовала длительности горения дуги (10 мс). В эксперименте без магнитного поля, напряжение имеет множественные всплески, что в свою очередь говорит нам о попытках возникновения контрагированной дуги в межэлектродном промежутке и ее возникновении после момента времени 3мс. Максимальный ток дуги равен 12кА, а напряжение на промежутке 70В.

Процесс горения электрической дуги с приложенным к ней магнитным полем происходит более стабильно и без сильных всплесков по напряжению, говоря о том, что нет попыток образования контрагированной дуги. Напряжение в межэлектродном промежутке составляло значение 50В, при токе 12кА.



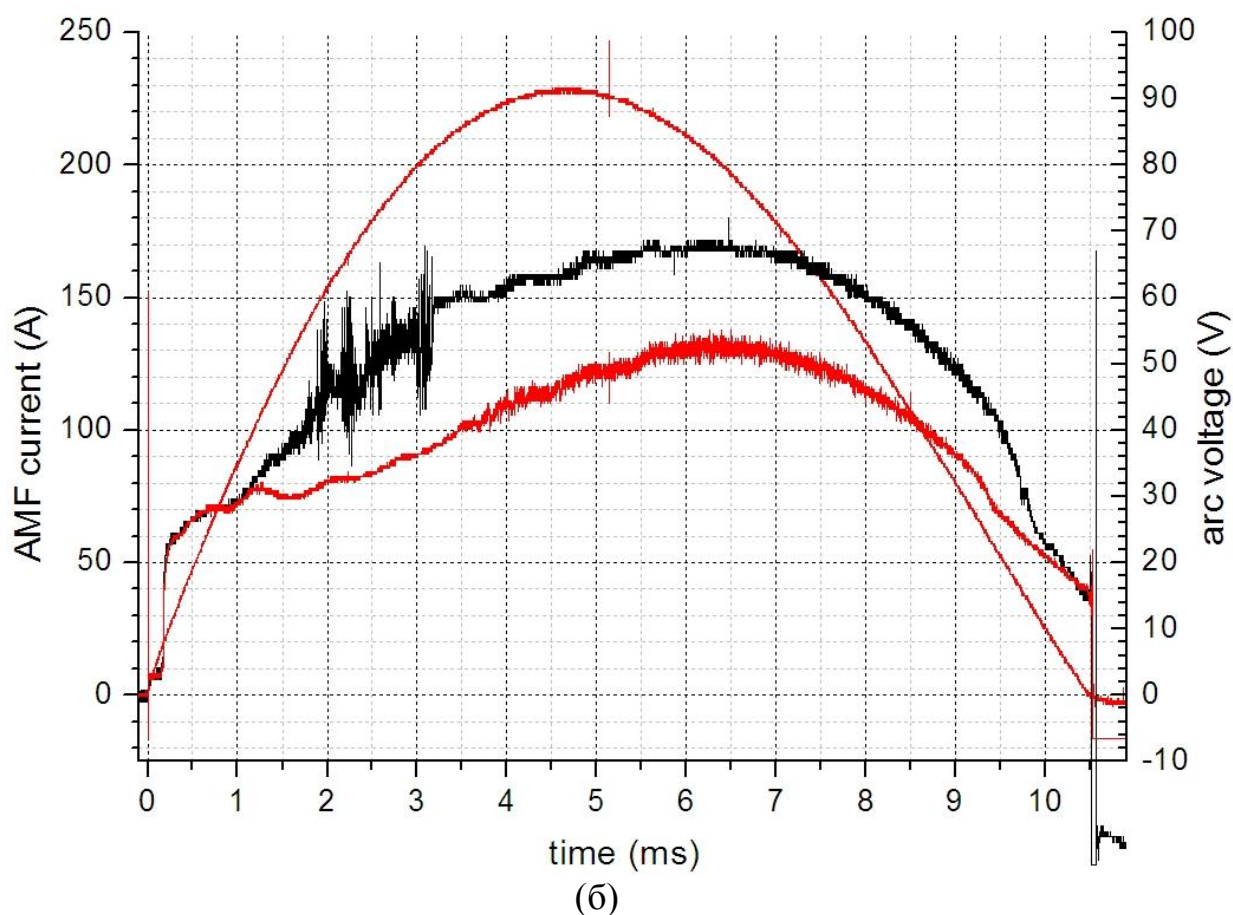


Рисунок 23- Осциллограммы с воздействием максимального магнитного поля(10мс), ток 12кА: (а) ток и напряжения в межэлектродном промежутке (б) ток в катушке и напряжение в межэлектродном промежутке.

На рисунке 24 (а,б) изображены осциллограммы горения электрической дуги с приложенным магнитным полем и без него. Длительность магнитного поля соответствовала длительности горения дуги (10 мс). В эксперименте без магнитного поля, напряжение имеет множественные всплески, что в свою очередь говорит нам о попытках возникновения контрагированной дуги в межэлектродном промежутке и ее возникновении после времени 3мс. Максимальный ток дуги равен 14кА, а напряжение в промежутке 71В.

Процесс горения электрической дуги с приложенным к ней магнитным полем происходит более стабильно и без сильных всплесков по напряжению, говоря о том что нет попыток образования контрагированной дуги. Напряжение в межэлектродном пространстве составляло значение 55В, при токе 14кА.

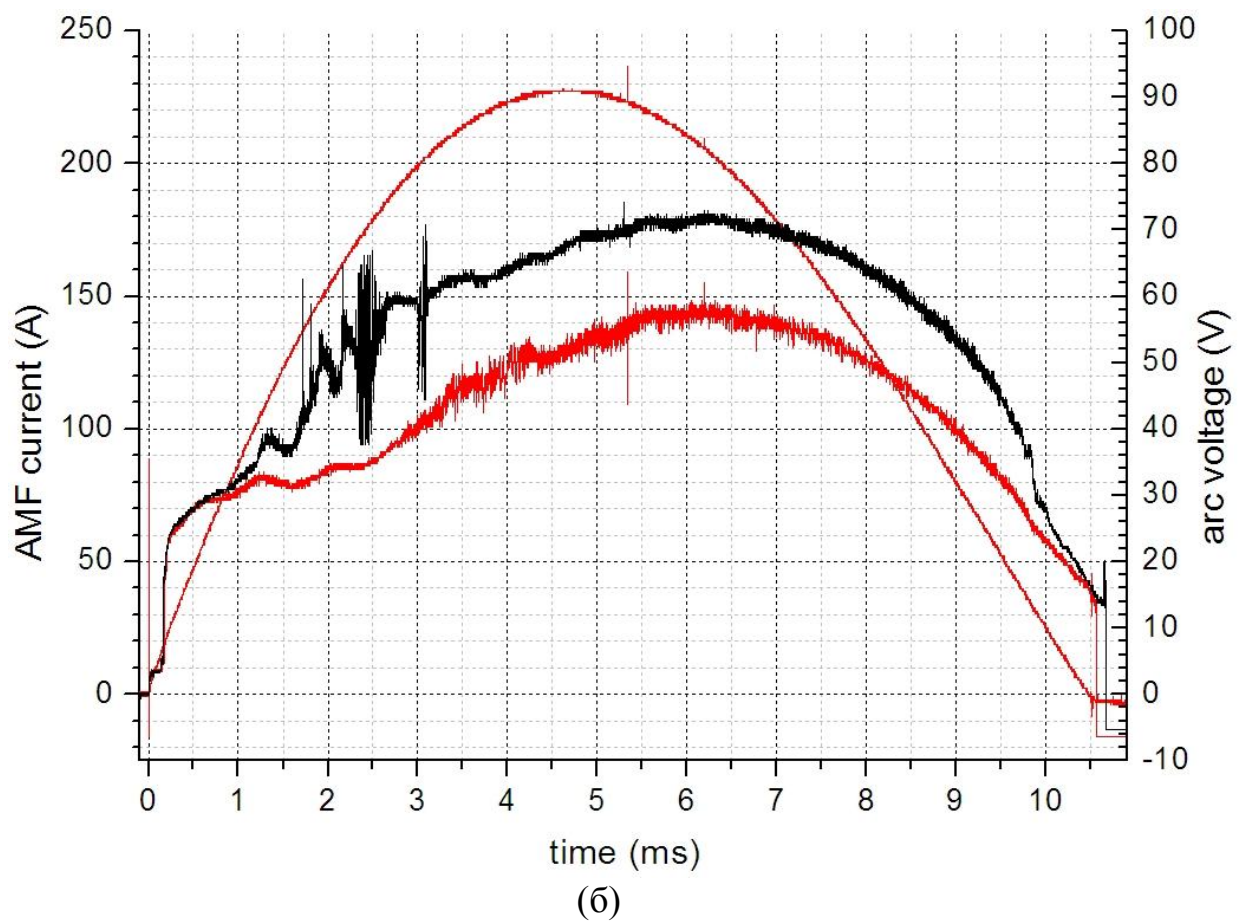
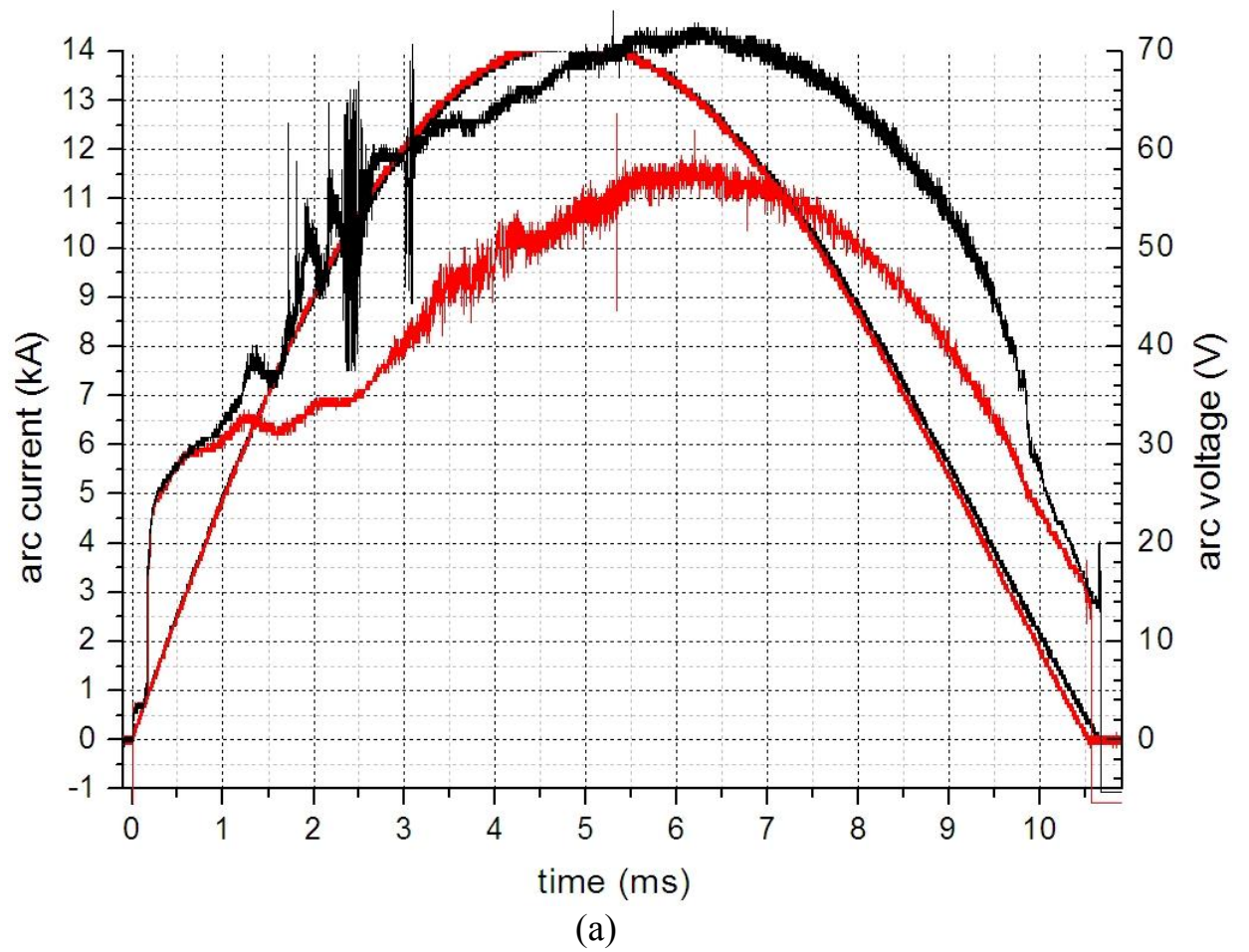
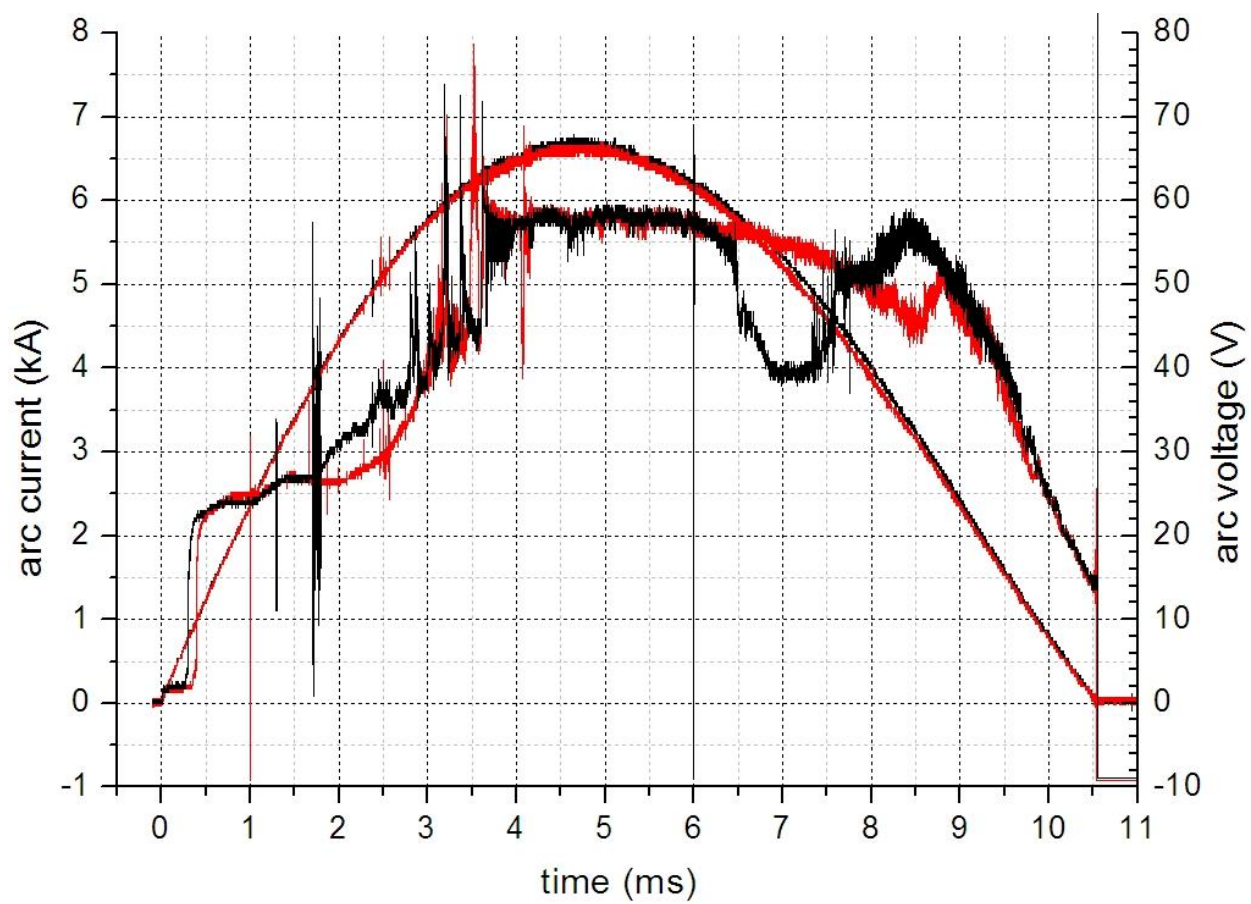


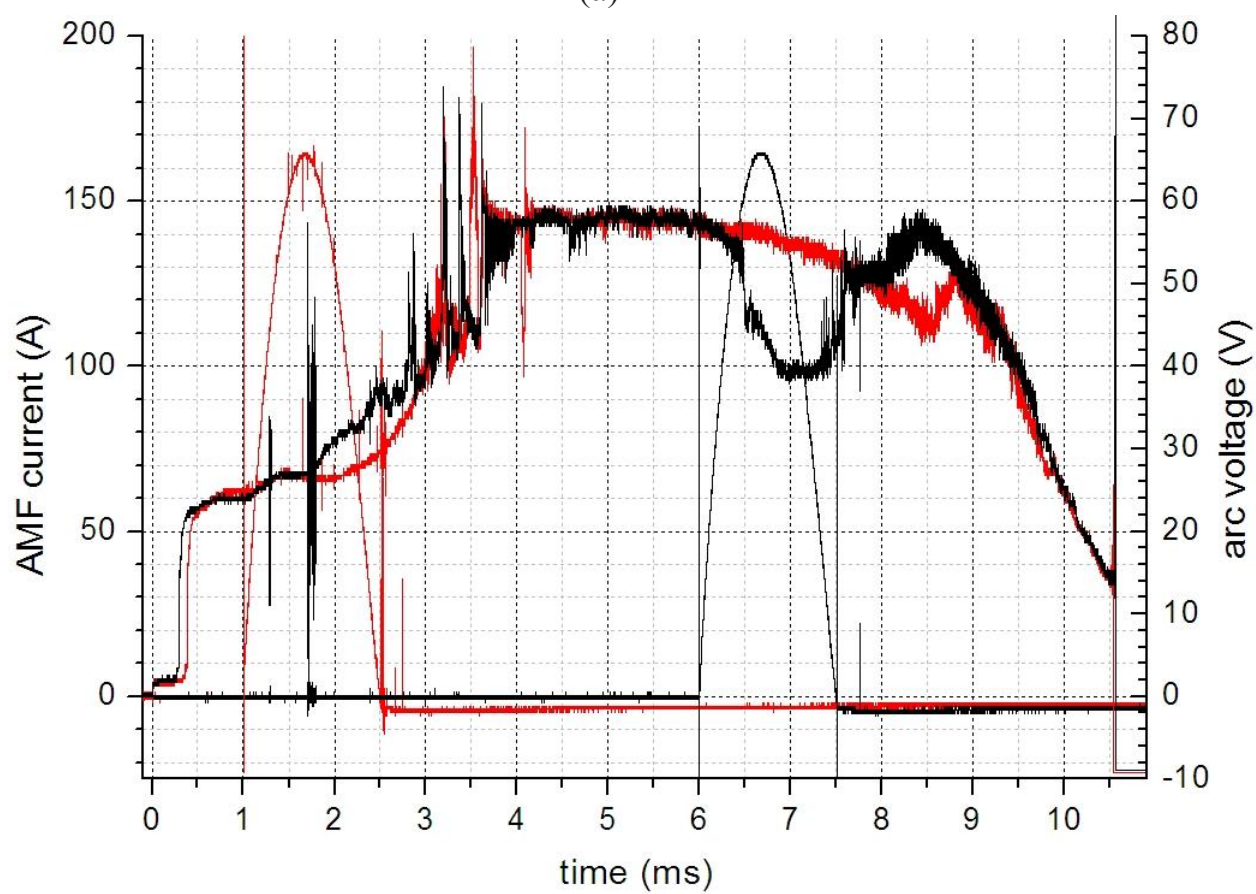
Рисунок 24- Осциллограммы с воздействием максимального магнитного поля(10мс) на характеристики дуги (ток 14кА): (а) ток и напряжения в межэлектродном промежутке (б) ток в катушке и напряжение в межэлектродном промежутке.

3.1.2 Влияние «короткого» аксиального магнитного поля

В качестве примера рассмотрим импульс с амплитудой тока 12 кА, как показано на рисунке 25. Время размыкания контактов было около 0,3 мс после начала импульса тока. На графике до $t = 1$ мс дуга функционировала без влияния аксиального магнитного поля. Затем в промежуток времени $t = 1-2,5$ мс было приложено короткое внешнее магнитное поле. Напряжение дуги в этот момент начинает убывать по мере нарастания внешнего поля и, как мы можем наблюдать далее, по мере убывания магнитного поля, напряжения дуги начинает расти и разряд переходит в контрагированный режим горения, разогревая локальную область, и начинает появляться анодное пятно. Под воздействием поля дуговой канал не сжимался, анодное пятно не было ярко выражено, а также не существовало катодного макро-пятна и в это же время микро-пятна на катоде меняли траекторию своего движения. После $t = 2,5$ мс воздействие поля прекратилось. По мере увеличения тока разряда увеличивается падение напряжения на столбе, при этом уменьшается отрицательный анодный барьер, растёт температура анода, вызывая его существенное испарение, появляется анодное макро пятно, на катоде в этот момент происходит объединение всех катодных пятен в единое макро пятно, тем самым дуговой разряд переходит в контрагированный режим горения.



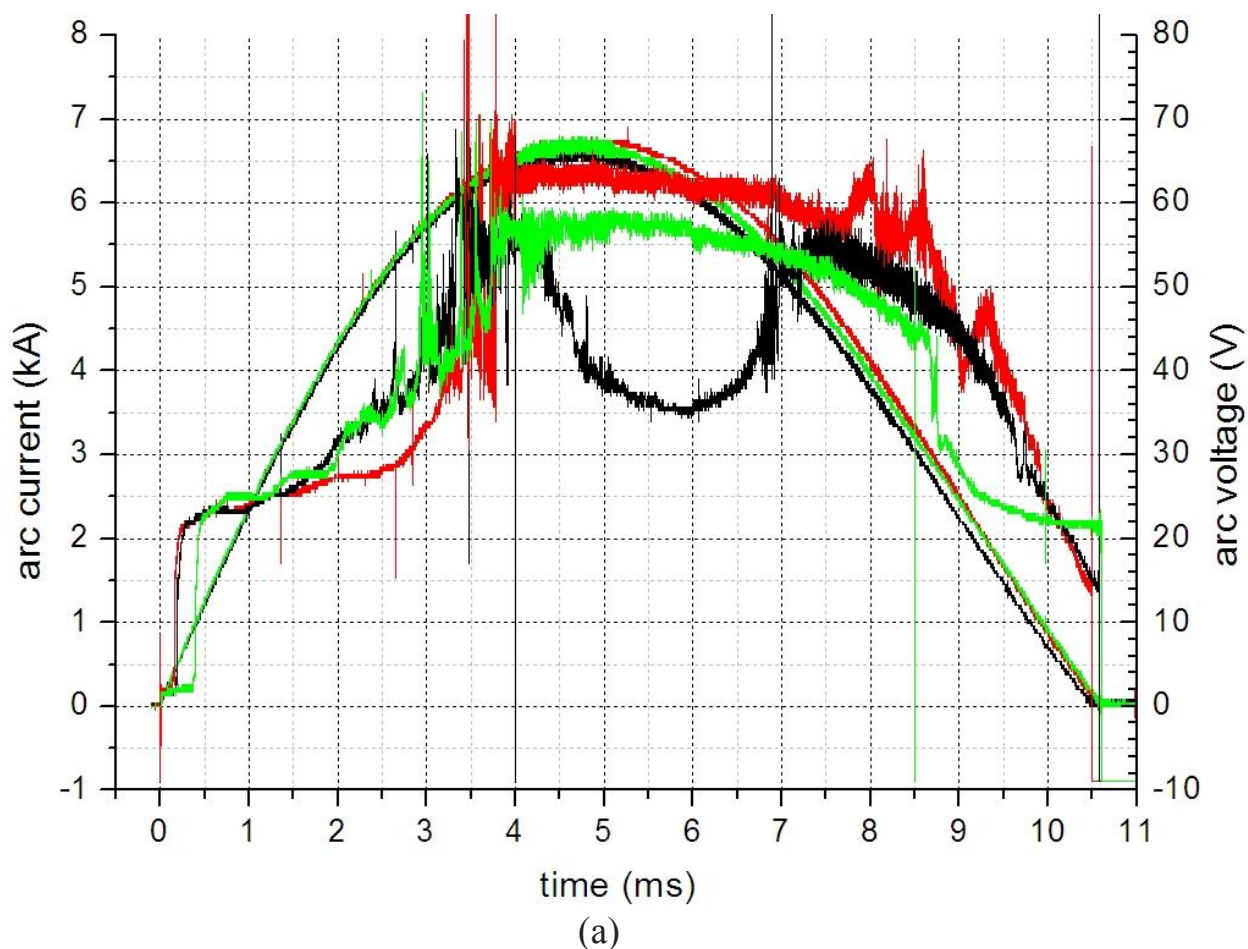
(a)



(b)

Рисунок 25- Воздействия магнитного поля (длительностью 1,5 мс) на характер горения дуги: (а) ток и напряжения в межэлектродном промежутке (б) ток в катушке и напряжение в межэлектродном промежутке

На рисунке 26 (а, б) изображено воздействие магнитного поля длительностью 2,8мс на напряжение горения дуги в разные моменты времени. Как мы можем видеть, максимальный ток дуги в данных экспериментах был равен значению 6,5 кА, а максимальное напряжение в межконтактном промежутке составляло, значение 65 В. Приложенное магнитное поле сразу начинало влиять на напряжение горения дуги. Видно, чем сильнее росло магнитное поле, тем больше убывало напряжение горения дуги. В момент времени, когда поле начинало уменьшаться, напряжение в межконтактном промежутке начинало расти.



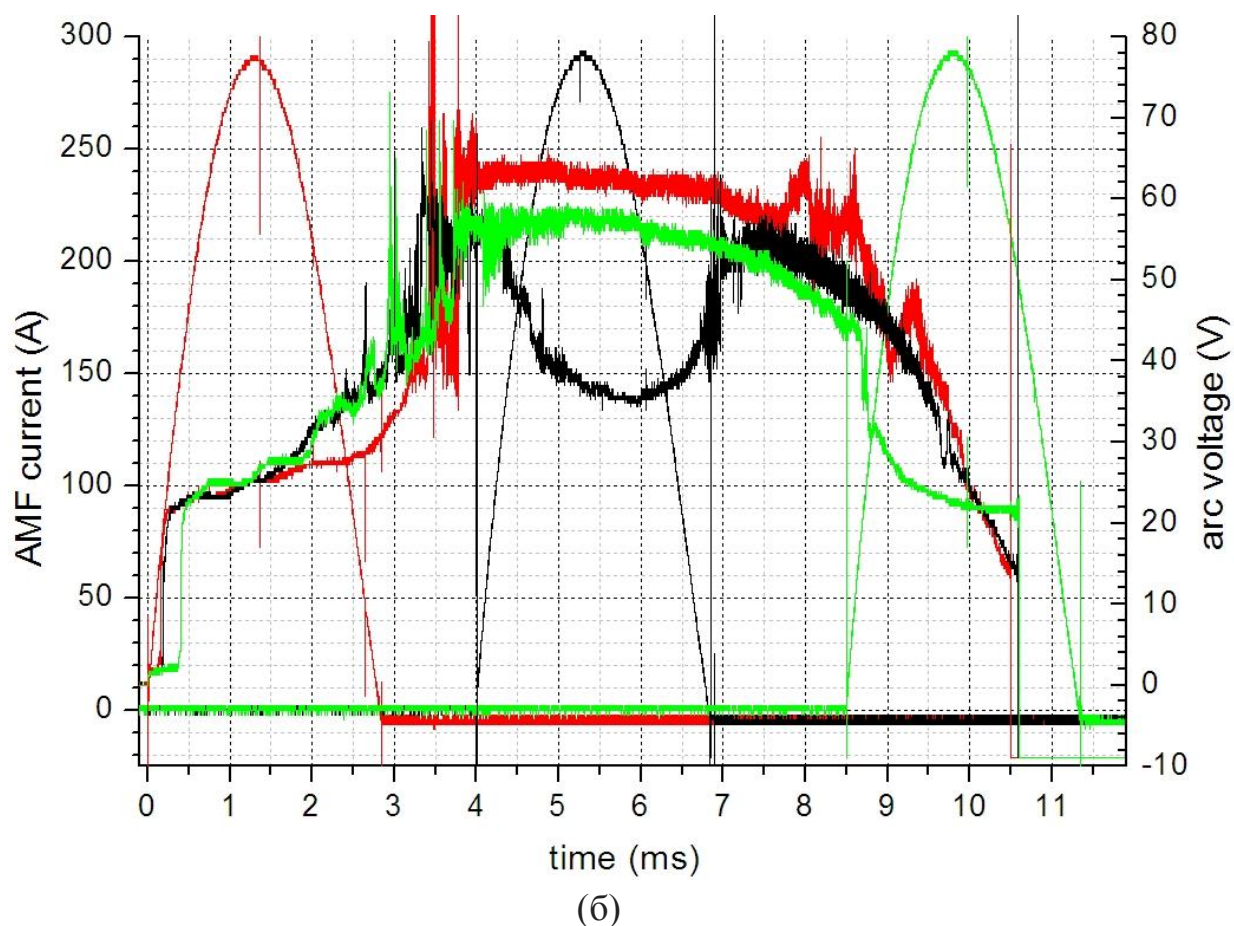
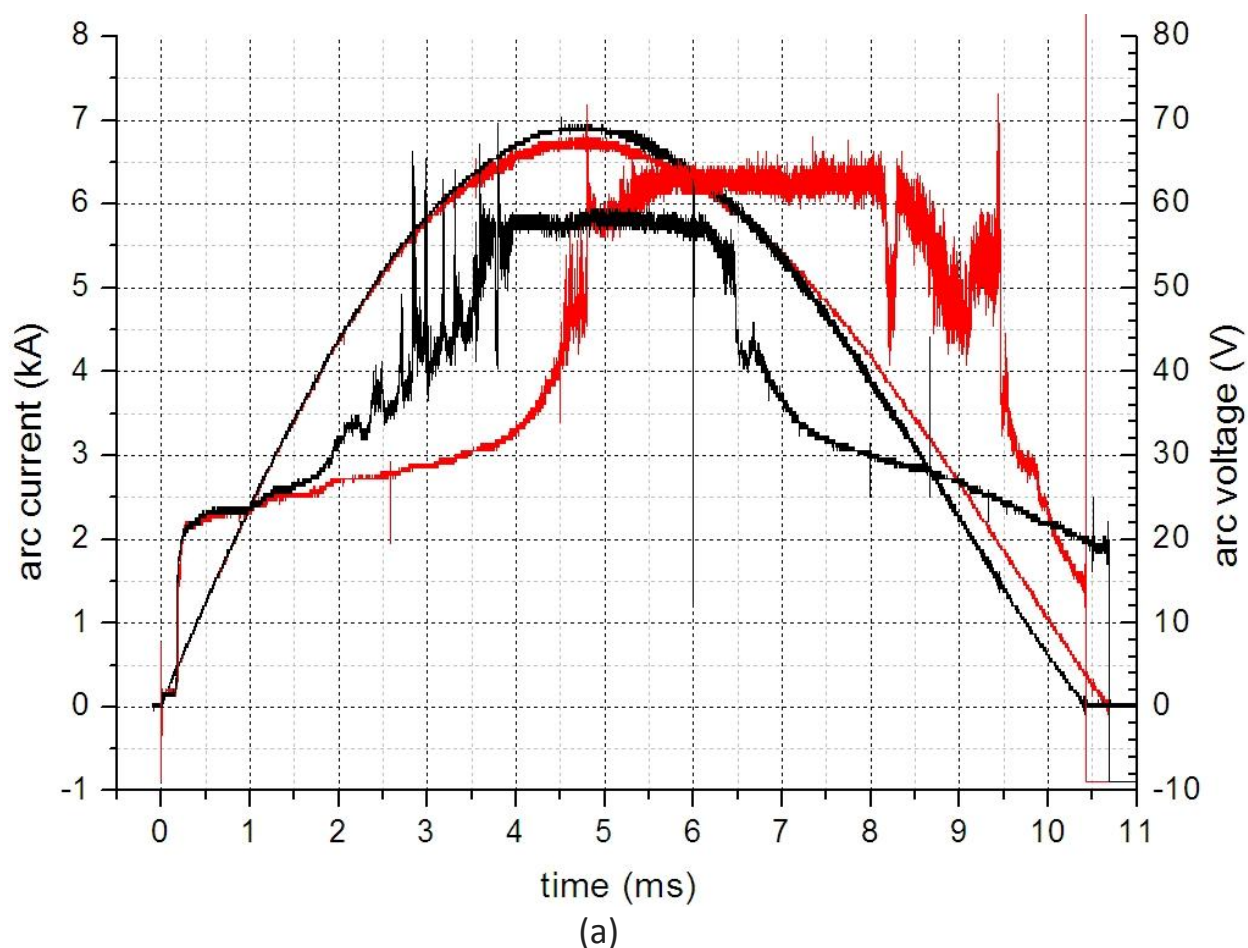


Рисунок 26-Воздействие магнитного поля (2,8 мс) на напряжение горения разряда: (а) ток и напряжения в межэлектродном промежутке (б) ток в катушке и напряжение в межэлектродном промежутке.

На рисунке 27 (а, б) изображено влияние магнитного поля на напряжение горения дуги в межконтактном промежутке с длительностью 4,5мс. Исходя из длительности магнитного поля видно, что за весь промежуток горения дуги магнитное поле было приложено 2 раза. Когда магнитное поле было приложено в первый раз (0-4,5 мс), то в момент времени пока напряжение нарастало от 0-20В, влияние на него не оказывалось. После перехода этой отметки отчетливо видно плавное нарастание без сильных всплесков, что говорит нам о том, что идет плавное рассеяние энергии по всей площади электродов без образования контрагированной дуги. В момент когда поле перестает действовать, напряжение начинает расти, затем появляются множественные всплески в напряжении, что говорит нам о попытках изменения режима горения дугового разряда.

Во 2ой части эксперимента поле прикладывалось от 6-10,5 мс. До этого значения в момент разведения контактов напряжение скачкообразно выросло до значения 20В. После плавного нарастания начались множественные пульсации, фронт резко увеличивается, что говорит о попытках формирования

контрагированной дуги. Далее наблюдается ее устойчивое горение до начала воздействия магнитного поля. Далее виден крутой провал напряжения до отметки 40В, это нам говорит о том, что изменился режим горения дуги из контрагированного в диффузный, что сопровождалось исчезновением анодного пятна. С усилением магнитного поля катодные пятна равномерно распределились по всей поверхности электрода.



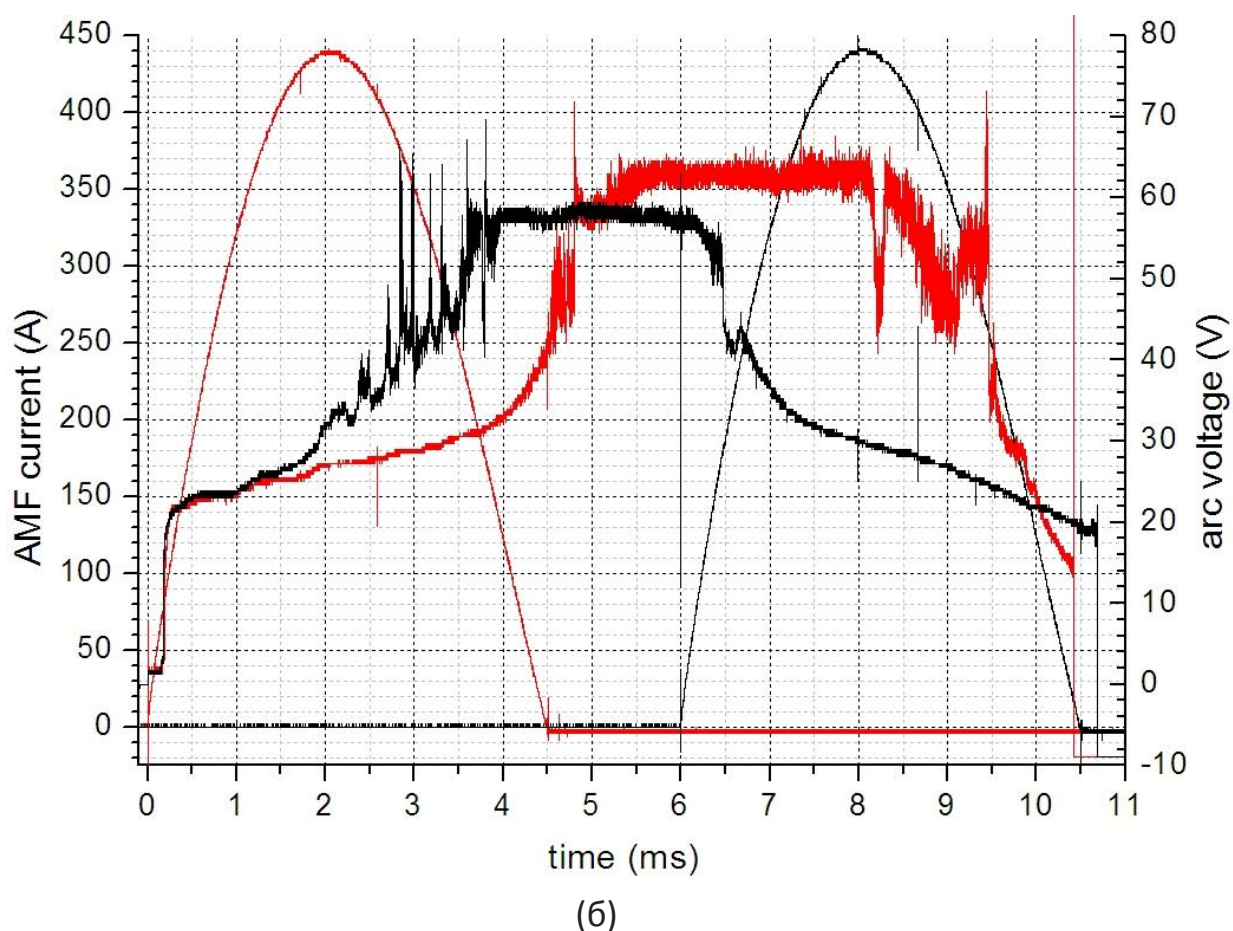


Рисунок 27- Графики воздействия магнитного поля(4,5мс) на характеристики дуги: (а) ток и напряжения в межэлектродном промежутке (б) ток в катушке и напряжение в межэлектродном промежутке.

Вывод:

В ходе проведённых экспериментов было изучено влияние аксиального магнитного поля на процессы контроля горения дуги в вакуумной дугогасительной камере. Приложенное магнитное поле предотвращает контрагирование разряда, в результате чего разряд горит в диффузном режиме. Магнитное поле уменьшает напряжение горения на 20 вольт. Кроме того, приложение короткого магнитного поля, так или иначе, влияет на характеристики разряда. Пока оно приложено, разряд функционирует в диффузном режиме или в режиме близком к такому. Как только поле пропадает, разряд стремится перейти в контрагированную форму.

3.2 Динамика катодного слоя после нуля тока в условии роста напряжения на промежутке

В качестве наглядного примера разберём одиночный импульс с амплитудой тока 8 (кА), представленный на рисунке 28. Контакты размыкались спустя 0,3 мс после начала импульса тока. До момента времени $t = 2$ (мс), дуга горела в диффузном режиме, затем в момент времени $t = 2-4,4$ мс, напряжение дуги модулировалось как переход в дуговой режим с повышенным

напряжением. В момент времени $t = 4,45\text{--}5$ мс произошел переход в режим дуги с крайне высоким напряжением. В таком режиме дуговой канал начинал сжиматься, пятно на аноде было похоже на анодное пятно второго типа ^[35], и пятно на катоде (макро-пятно) рядом с поверхностью расплавленного катода, в это время микро-пятна подавлялись. После того как дуга перешла в диффузный режим горения, происходила генерация анодного факела, указывающая на то что происходит высокая скорость испарения материала на аноде (рисунок 6, полученный при $t = 9.074$ мс).

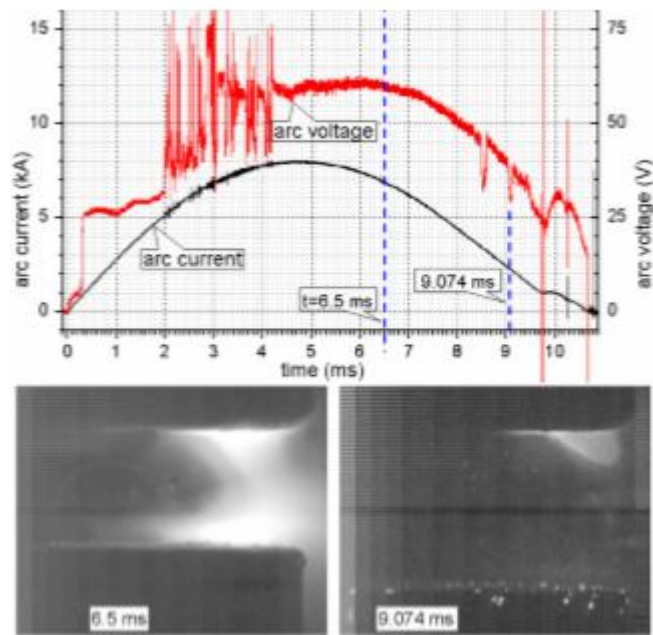


Рисунок 28. Фотография вакуумного промежутка внутри камеры после нескольких импульсов (снизу) и фотография напряжения и тока (сверху).

Диагностика тока насыщения на экспериментальные зонды, вблизи перехода током нулевой отметки, представлено на рисунке 29. Величина (амплитудное значение) и длительность каждого зондового тока зависит от пространственного положения зонда относительно разрядного промежутка.

Для зондов находящихся в первой линии токи выше. Для тех зондов, которые находятся в третьей линии, который является наиболее удаленным от электрической дуги, ток является максимальным по своей длительности.

Для любого зонда может быть найдена плотность электронов в плазме n_e из известного выражения для плотности электронного тока насыщения:

$$j_{es} = \frac{1}{4} e n_e v_e \quad (3.1)$$

$$v_e = \sqrt{\frac{8\pi k T_e}{\pi m}} \quad (3.2)$$

где v_e – тепловая скорость электронов. С другой стороны

$$j_{es} = \frac{I_{probe}}{S_e} \quad (3.2)$$

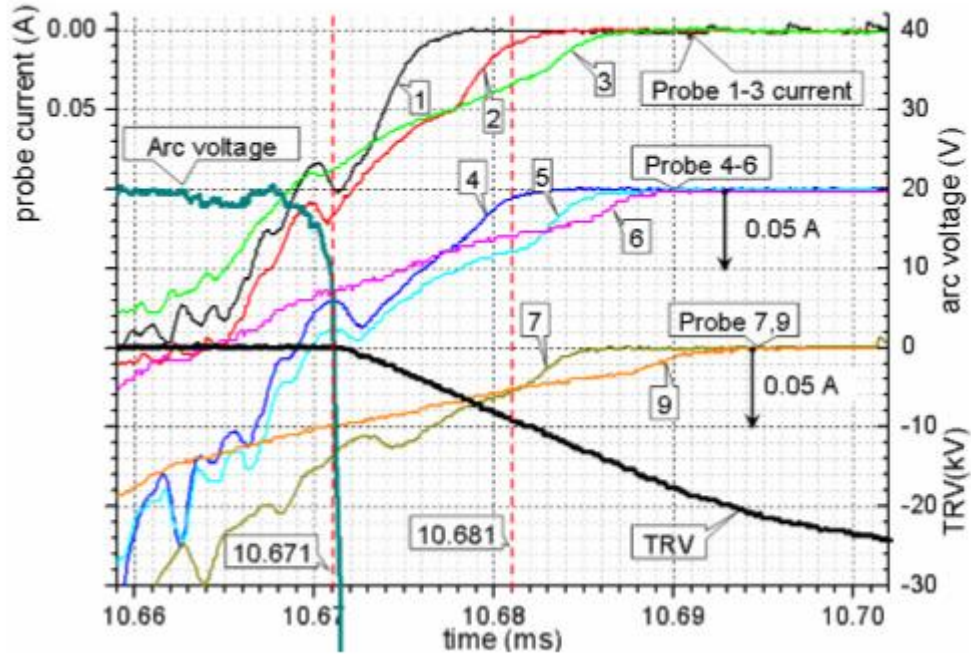


Рисунок 29- Осциллограммы зондового тока (зонды с 1 по 7 и 9), так же напряжения электрической дуги и переходно-восстанавливающегося напряжения ($t_{пер.1.через 0} = 10,671$ мс).

где, $S_E = 2\pi r_E (1 + r_E)$ - это площадь границы плазмы. Зонд отделён от плазмы пространственным зарядом (слоем Ленгмюра). Толщина этого слоя (Ленгмюра) зависит от плотности плазмы и разности потенциалов между зондом и плазмой. Однако из анализа ^[13] можно увидеть, что в наших условиях толщина слоя объёмного заряда составляет менее чем 0,25 мм, при этом плотность плазмы выше чем 10^{11} (см⁻³). Тем самым для оценки мы можем взять площадь с поверхности зонда, S_p , в (3.3) убрав площадь поверхности плазмы S_E . В итоге мы используем окончательную формулу:

$$n_e (cm^{-3}) = A_i \cdot I_{probe} (A) \quad (3.4)$$

$$A_i = \frac{4}{e v_e S_p} \quad (3.5)$$

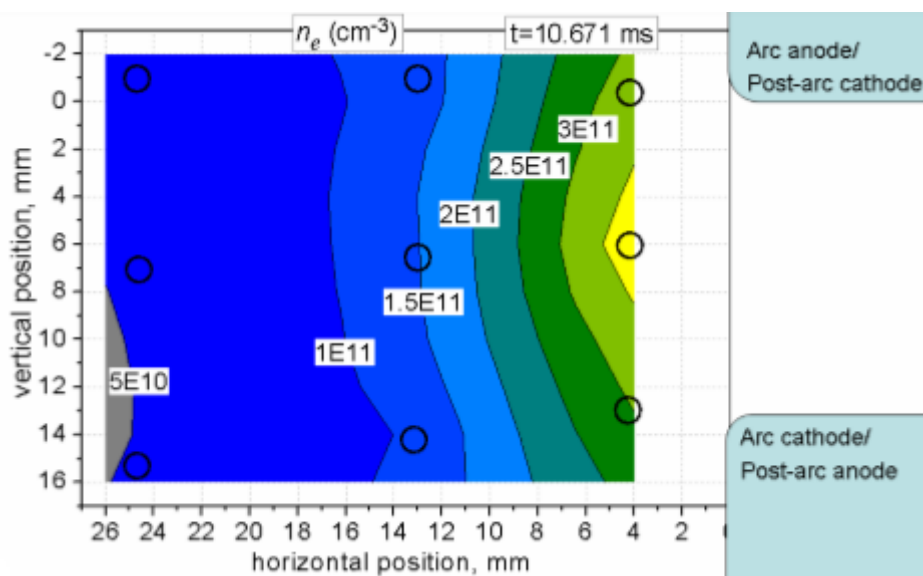
Значения A_i приведены в таблице 2 для всех зондов. Здесь тепловая скорость электронов v_e была равной 10^8 (см / с), что соответствует температуре электронов равной 3 (эВ) ^[13].

Таблица 2. Геометрические параметры зондов.

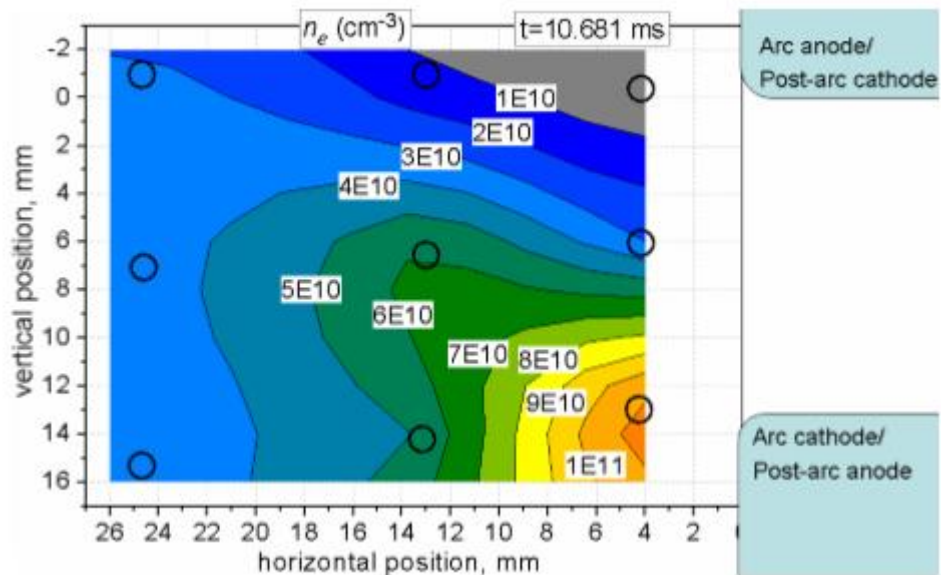
Зонд №	a, мм	b, мм	r_c , мм	S_p , мм	A_i , $\text{cm}^{-3}\text{A}^{-1}$
1-3	2.7	1.2	0.45	7.57	$3.3 \cdot 10^{12}$
4-6	4.3	1.6	0.58	15.6	$1.6 \cdot 10^{12}$
7-9	6.2	1.7	0.6	23.6	$1.06 \cdot 10^{12}$

Двухмерное распределение электронной плотности плазмы, восстановленное по току с зондов с использованием формулы (3.4), представлены на рисунке 30. Для момента времени $t = 10,671$ мс, сразу после перехода тока через ноль, и при $t = 10,681$ мс (через 10 мкс после этого). Полыми кругами обозначено положение зондов.

В распределении, которое представлено на рисунке 30 (а), плотность электронной плазмы уменьшается в 6-7 раз, при увеличении радиального расстояния от электродов с 4 мм до 24 мм. Исходя из этого, плотность плазмы уменьшается линейно с расстоянием. Но с другой стороны, если учесть положение осей контактной системы (-10 мм) как точки для начала координат, у нас есть 14 и 34 мм для положения зондов в первой и третьей зондирующих линиях. Для такой координаты плотность плазмы начинает уменьшаться пропорционально квадрату расстояния. Для момента 10 мкс, после переход тока дуги через ноль (рисунок 30, б) распределение плотности плазмы в вакуумном промежутке, соответствует электроно-плазменной оболочки, которая по мере приближения к катодному электроду уменьшается.



(a)



(б)

Рисунок 30- Двумерное распределение плотности электронной в плазме, которое была восстановлено из зондового тока, на рисунке 29 для момента времени $t = 10,671$ (мс) (а) и $10,681$ (мс) (б).

Альтернативным способом восстановления динамики развития катодного слоя является измерение момента завершения поступления тока на зонд. Как показано на рисунке 29, видно быстрое падение тока. Это падение зависит от положения зонда в пространстве и возможно является связанным с временем, когда граница расширяющегося катодно-плазменной оболочки проходит через поверхность зонда. Исходя из этого, середину падения тока можно принять за время, когда положение катодно- плазменной оболочки соответствовало положению зонда (на рисунке 29, средние точки падения на осциллографе обозначены маркерами).

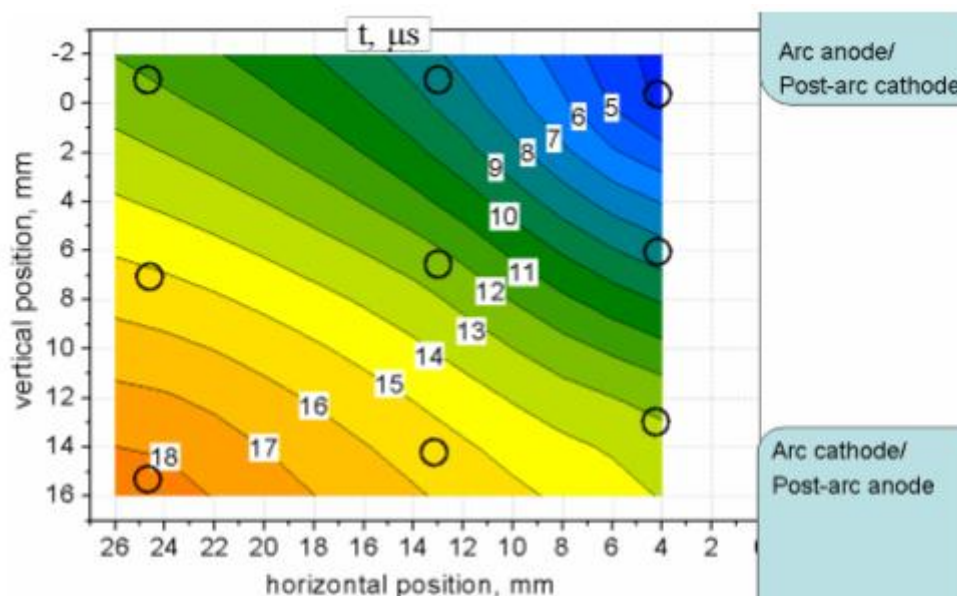


Рисунок 31. Граница расширяющегося катодного слоя в разное время после перехода тока через ноль.

Двухмерный график границы катодного слоя, который был восстановленный по вышеуказанному методу, представлен на рисунке 31. Граница плазмы похожа по форме с распределением плотности плазмы представленном на рисунке 30 (б).

Скорость расширения катодно-плазменной оболочки в пространстве между электродами, изменяется от 1 мм/мкс (в течение первых 8-10 мкс). Изменение произошло более чем на 2 мм / мкс, на заключительной стадии расширения катодно-плазменного слоя (15-18 мкс). При амплитуде тока дуги 8 кА, и скорости нарастания ПВН 0,4-0,8 кВ/мкс, скорость расширения слоя, составила 0,67-0,87 мм / мкс^[36]. В проведённом эксперименте скорость нарастания ПВН составила 1 кВ/мкс, по этой причине скорость расширения 1 мм / мкс, находится в хорошей корреляции с указанными данными, а также подтверждает зависимость скорости расширения оболочки от скорости нарастания ПВН.

Интересный случай, демонстрирующий поведение тока зонда при пробое, показан на рисунке 32. Амплитуда тока дуги составляла 10 кА, а сфокусированный дуговой канал располагался на месте, аналогичном показанному на рисунке 28.

Существует время запаздывания сигнала на зонд, оно зависит от положения зонда в линейке. Таким образом, можно получить дополнительную информацию о расширении плазмы при пробое промежутка. Здесь задержка в появлении тока приходящего на зонды в первой, второй и третьей линиях

составляет 2-4, 5-6 и 9-10 мкс. Скорость расширения плазмы, которую восстановили из разницы в задержках тока, близка к 3 мм / мкс. Это значение ниже известной скорости расширения катодной плазмы, ~ 1 см/мкс, и больше соответствует тепловой скорости тяжелых частиц, ~ 1 мм / мкс. Интересно, что для зондов первой линии ток сначала появляется на третьем зонде, ближайшем к постдуговому аноду, затем последовательно на втором и первом зондах. Так при пробое достигается максимальная плотность плазмы и наибольшая скорость радиального расширения для плазмы, исходящей не от катода, а от анода. Как мы предполагаем, это связано с более высокой плотностью паров возле столба дуги анода.

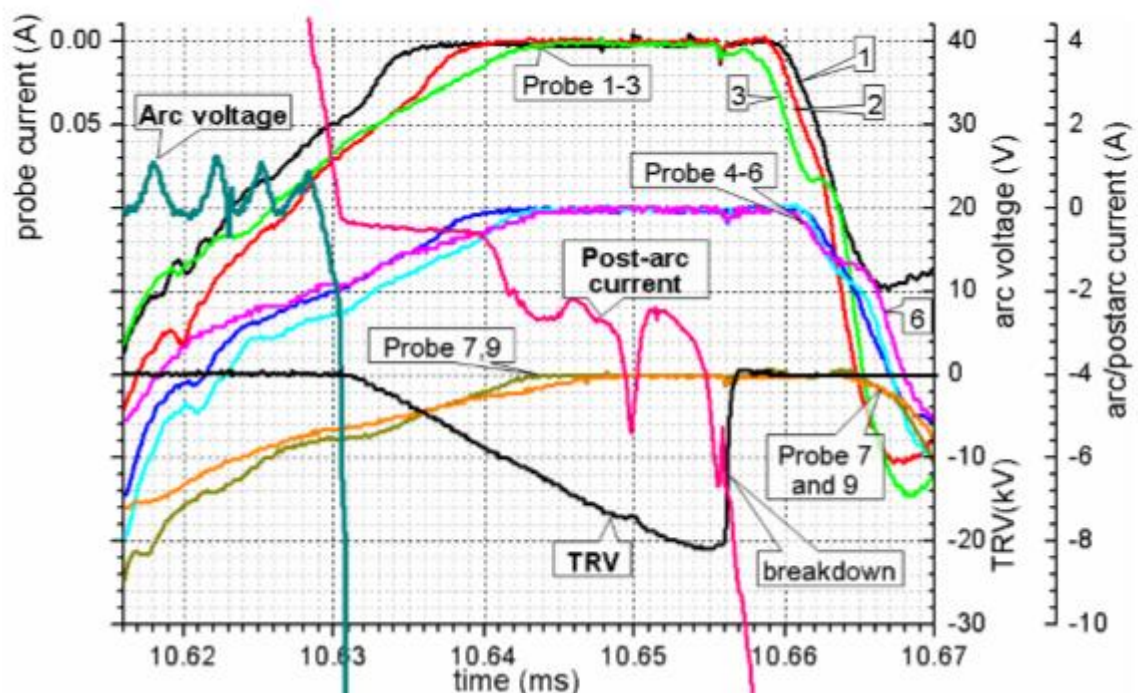


Рисунок 32. Осциллограммы зондового тока, напряжения горения электрической дуги, ПВН и тока электрической дуги, после перехода тока через ноль ($t_{10} = 10,6305$ мс). Амплитудное значение тока составляло 10 кА.

Следует отметить, что, несмотря на более высокий ток протекающий в дуге, величина тока на зонде при контрагированном разряде была меньше величины тока рассмотренная в первом примере. Это демонстрирует разницу от импульса к импульсу. Как правило, плотность электронной плазмы при сфокусированной дуге увеличивается с амплитудой тока дуги. В токах зонда № 1, № 2, № 4 и № 5 были резкие падения тока, на других зондах ток прекращался постепенно. Это было характерно для низкого зондового тока при низкой плотности плазмы и изменялось от импульса к импульсу.

Общим условием наличия резкого падения зондовых токов было наличие и расположение анодного пятна во время горения дуги и появление плазменного шлейфа в период окончания горения дуги. Когда плазменный шлейф отсутствует, зондовые токи падают относительно быстро, но постепенно, без резкого падения в конце. Так, резкие перепады зондового тока практически отсутствовали при подаче на дугу сильного аксиального магнитного поля, что препятствовало сжатию столба дуги.

По-видимому, на расширение прикатодной плазменной оболочки влияет испарение материала, которое продолжается после нуля тока. Поступление паров со стороны электрода оказывает некоторое стабилизирующее воздействие на границу плазмы. С другой стороны, этот кажущийся эффект может быть связан с начальными условиями (более высокая плотность плазмы в области анодного пятна).

Вывод:

Двумерная модель зондов Ленгмюра позволяет реконструировать распределение плотности электронов в плазме вблизи дугового промежутка, а также ее эволюцию вблизи и сразу после перехода тока через ноль в один импульс в режиме реального времени, включая генерацию плазмы при пробое.

Наличие резкого падения при прекращении зондового тока может быть связано с расширением катодно-плазменной оболочки. При наличии таких спадов восстанавливается динамика расширения катодно-плазменной оболочки путем анализа длительности тока зондов.

Для экспериментальных условий данной работы, значения плотности электронов в после-дуговой плазме ниже 10^{12} см^{-3} , а скорость расширения катодно-плазменной оболочки близка к 1 мм/мкс.

3.3 Ток среза

Срез тока это явление, которое характерно для электрических дуг в вакууме при работе с токами промышленной частоты. Срез тока это явление резкого падения тока от какого-то значения до нуля. По причине крайне быстрого времени спада ток среза может привести к высокому уровню перенапряжения, особенно если нагрузка является индуктивной. В вакуумных камерах первых поколений, которые изготавливали из тугоплавкого материала (вольфрам и молибден), токи среза достигали очень высоких значений (10...30 (А)), что являлось причиной 10-и кратных перенапряжений. Эти перенапряжения, возникающие при коммутации ВВ, были основной причиной ограниченного их распространения в сетях. Сейчас, по причине применения

CuCr для материала электродов вакуумных камер, значение тока среза во много раз снижено. Однако проблема перенапряжений все ещё существует и является основной причиной старения и разрушения изоляции оборудования^[6].

В данной работе токи среза определялись при использовании ВДК с контактами из CuCr при протекании тока колебательной характера.

Главная задача заключалась в исследовании и сравнении токов среза на контактах изготовленных по разным технологиям.

Первые контакты были изготовлены в ИФПМ СО РАН методом электроннолучевой наплавки (рисунок 33)^[5]. Второй тип контактов был изготовлен методом порошкового спекания с процентным соотношением меди и хрома 60% и 40%, соответственно (рисунок 36). Третий тип контактов был изготовлен в ИСЭ СО РАН на импульсной электронно-пучковой установке «РИТМ-СП», по методике магнетронного распыления и перемешивания электронным пучком, (рисунок 39).

Контакты, изготовленные методом электронно-лучевой наплавки представлены на рисунке 33. Типичная осциллограмма тока и напряжения для данного типа контактов представлена на рисунке 34. На рисунке 35, приведён более детальный временной промежуток 9,6-10 мс из рисунка 34. Представленный там последний скачок импульса тока перед его провалом в ноль и перед возникновением полочки в напряжении, называют: явлением среза тока. Для более точного определения тока среза проводилась серия экспериментов, включающая не менее 10 актов горения дуги. Затем полученные данные усреднялись. Средне значение тока среза при исследовании данных контактов составляет $5,15 \pm 0,71$ А.



Рисунок 33- Фотография электрода, изготовленного методом электронно-лучевой наплавки.

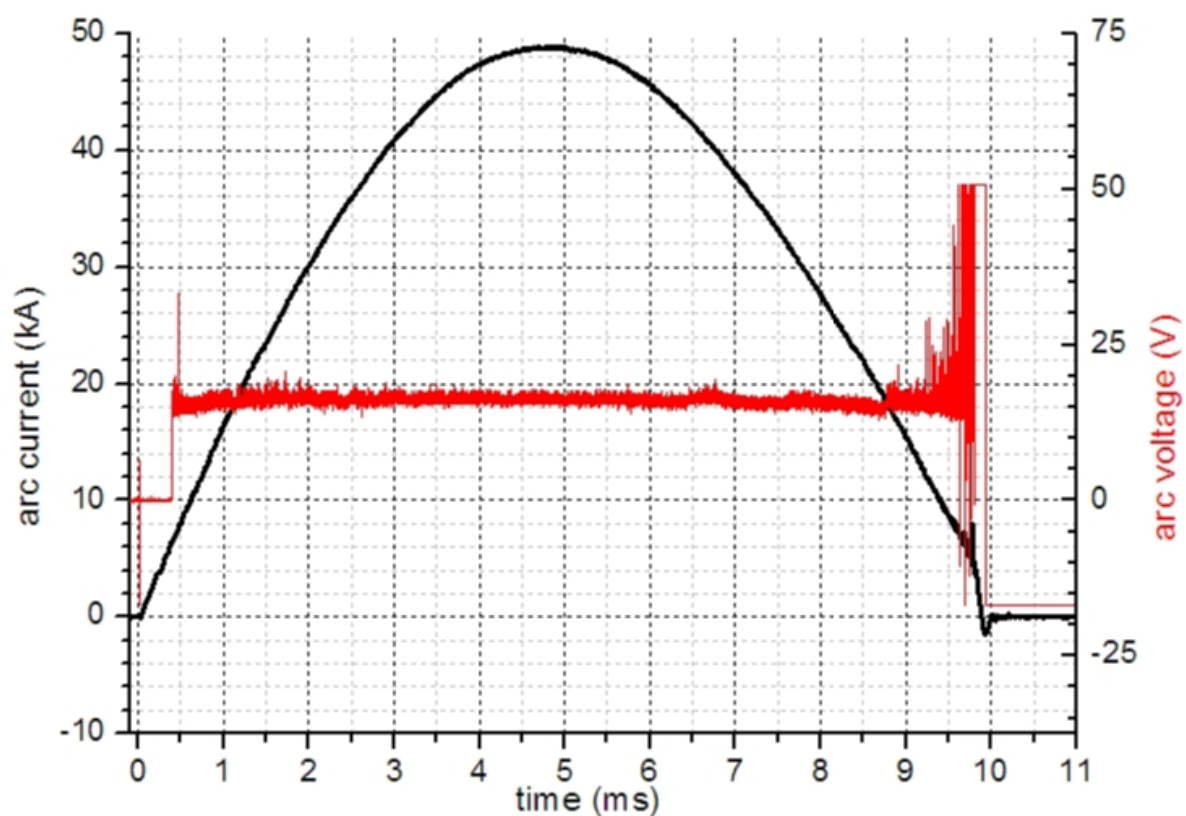


Рисунок 34-Осциллограмма тока и напряжения для случая наплавленных контактов.

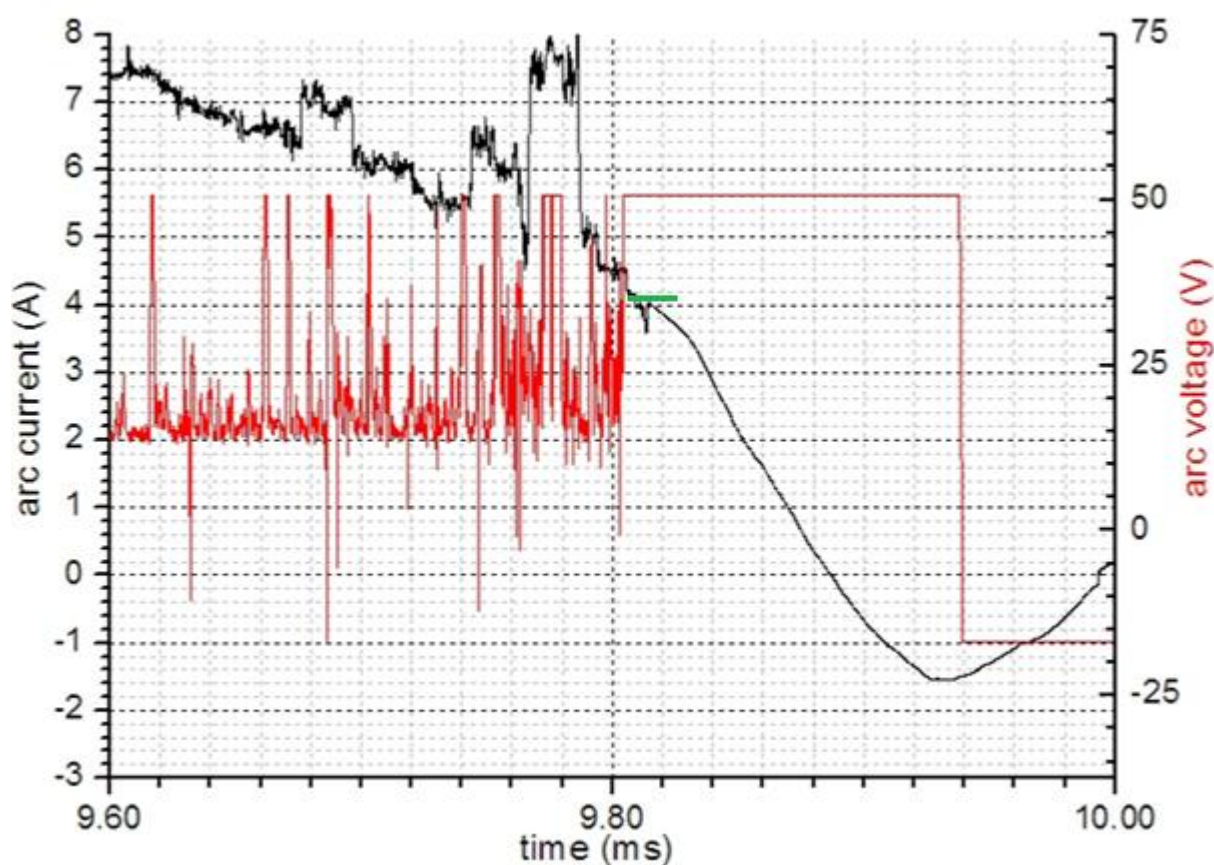


Рисунок 35- Типичный пример осциллограмм для определения тока среза при горении дуги на наплавленных контактах.

Контакты, изготовленные методом порошкового спекания представлены на рисунке 36. Типичная осциллограмма тока и напряжения для данного типа контактов представлена на рисунке 37. На рисунке 38, приведён более детальный временной промежуток 9,6-10 мс из рисунка 37. Представленный там последний скачок импульса тока перед его провалом в ноль и перед возникновением полочки в напряжении, называют: явлением среза тока. Для более точного определения тока среза проводилась серия экспериментов, включающая не менее 10 актов горения дуги. Затем полученные данные усреднялись. Средне значение тока среза при исследовании данных контактов составляет $4,3 \pm 1,9$ А.

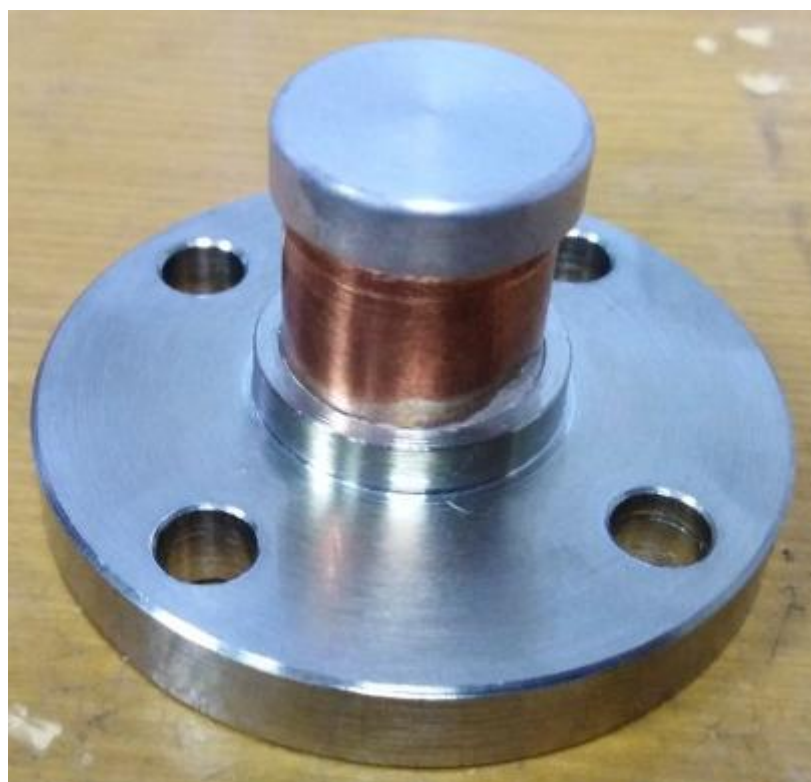


Рисунок 36- Фотография электрода, изготовленного методом порошкового спекания.

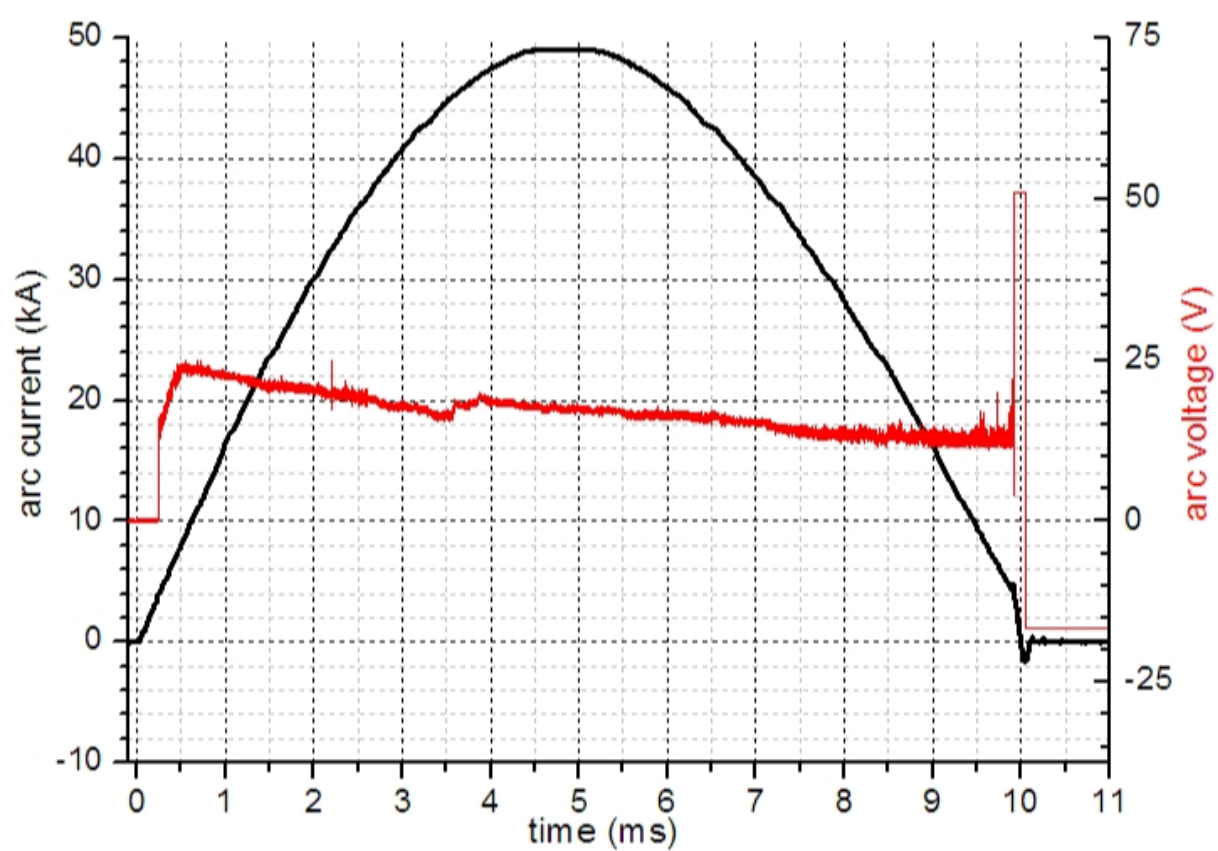


Рисунок 37- Осциллограмма тока и напряжения для контактов изготовленных методом порошкового спекания.

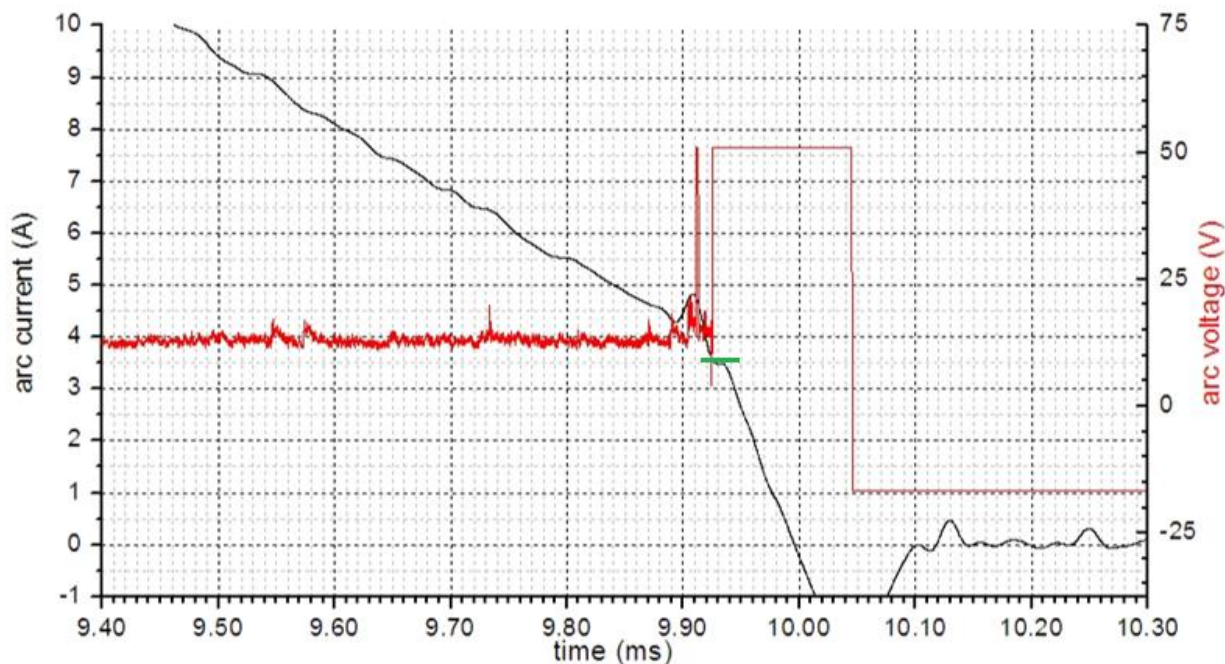


Рисунок 38- Типичный пример осциллограмм для определения тока среза при горении дуги на контактах изготовленных методом порошкового спекания.

Контакты, изготовленные методом магнетронного распыления представлены на рисунке 39. Типичная осциллограмма тока и напряжения для данного типа контактов представлена на рисунке 40. На рисунке 41, приведён более детальный временной промежуток 9,6-10,50 мс из рисунка 40. Представленный там последний скачок импульса тока перед его провалом в ноль и перед возникновением полочки в напряжении, называют: явлением среза тока. Для более точного определения тока среза проводилась серия экспериментов, включающая не менее 10 актов горения дуги. Затем полученные данные усреднялись. Средне значение тока среза при исследовании данных контактов составляет $3,38 \pm 1,55$ A.



Рисунок 39- Фотография электрода изготовленного методом магнетронного распыления.

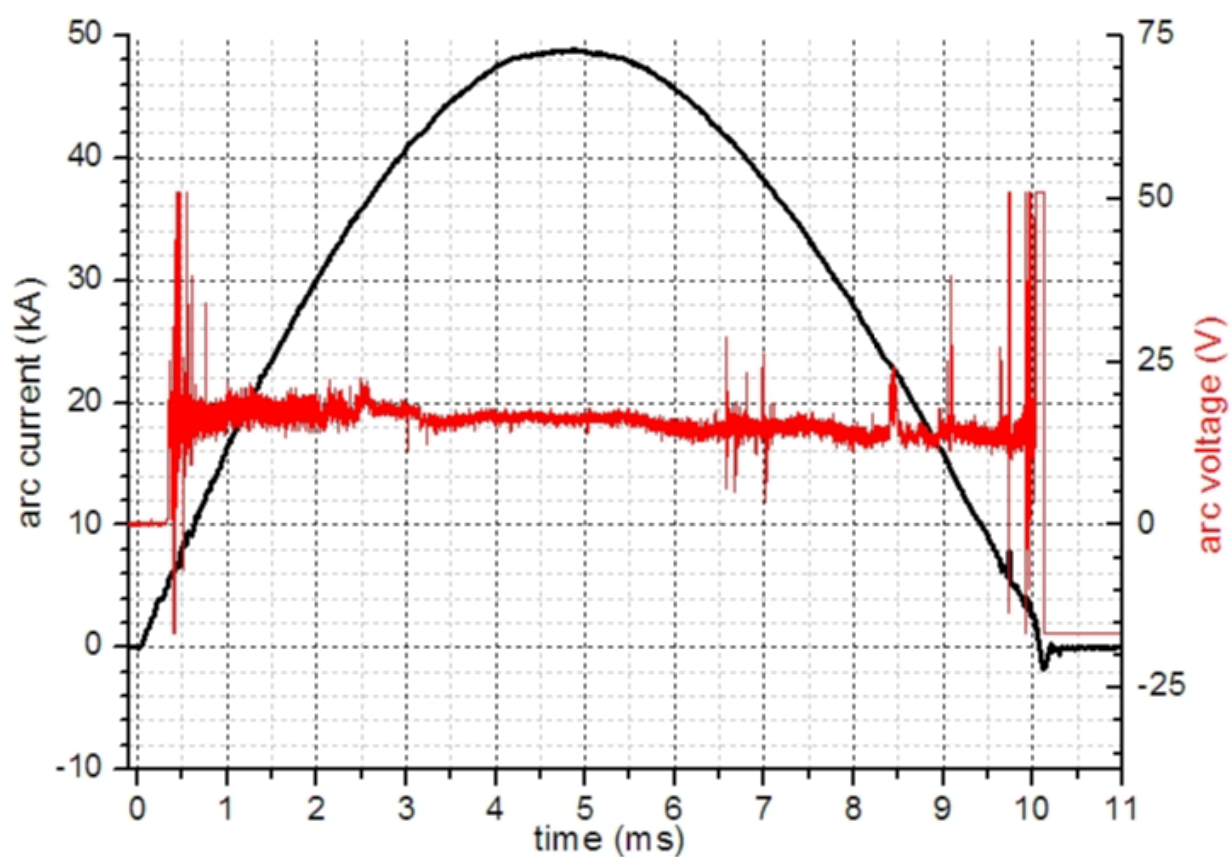


Рисунок 40- Осциллограмма тока и напряжения для контактов изготовленных методом магнетронного распыления.

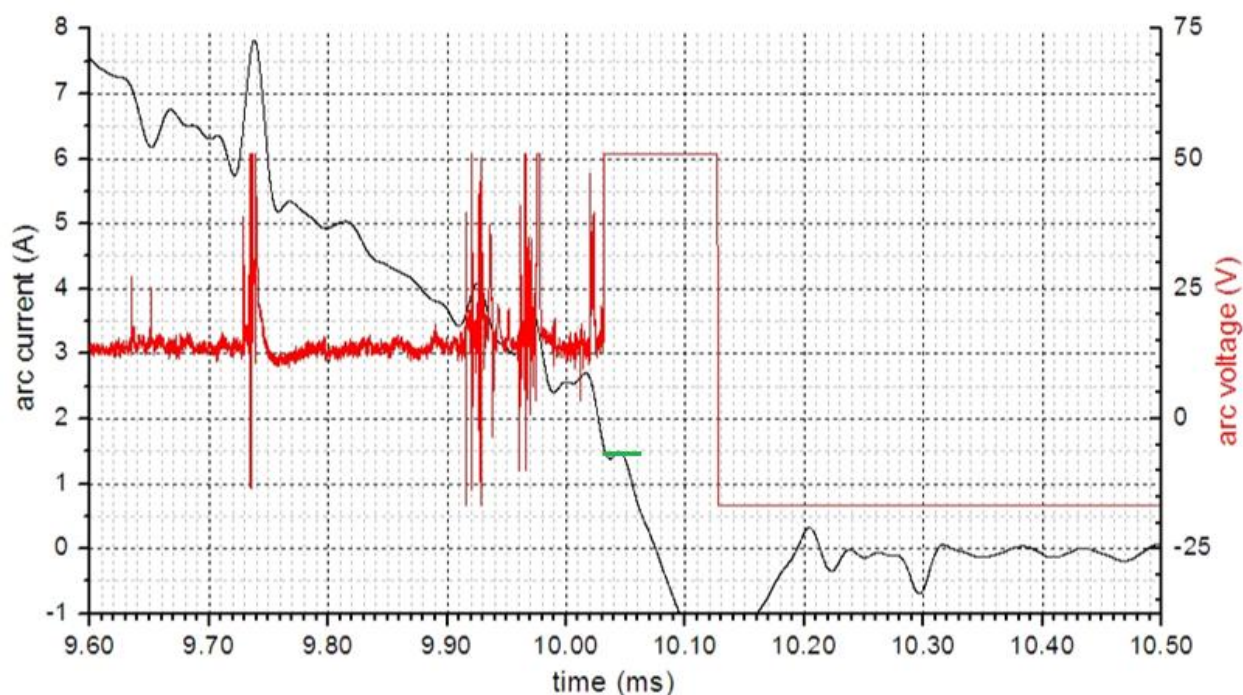


Рисунок 41- Типичный пример осциллограмм для определения тока среза при горении дуги на контактах выполненных методом магнетронного распыления.

Вывод:

Проведён ряд экспериментальных исследований по определению тока среза. Средний ток среза на контактах, изготовленных методом электронно-лучевой наплавкой составляет $5,15 \pm 0,71$ А. На контактах, изготовленных методом порошкового спекания значение тока среза составляет $4,3 \pm 1,9$ А. А на контактах, изготовленных в ИСЭ СО РАН ток среза равен $3,38 \pm 1,55$ А. Таким образом, по значению тока среза наиболее хороший результат показывают контакты, изготовленные методом магнетронного распыления. Однако, что бы понять, как влияет методика изготовления контактов на характеристики вакуумного выключателя необходимо провести более детальные исследования, включающие в себя исследования по отключающей способности разрядного промежутка в условиях быстро-нарастающего напряжения, устойчивость контактных пар на холодную сварку, устойчивость к дуге (эрозия контактов при воздействии сильноточной дуги) и т.д.

4 ГЛАВА. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Тема: Исследование физических процессов в вакуумных сетевых выключателях среднего класса напряжения

Краткое описание исследования

Данная работа представляет научно-техническое исследование физических процессов происходящих в вакуумных выключателях среднего класса напряжения. Разработка, представляет собой вакуумный выключатель который защищает оборудование в штатных и не штатных (короткое замыкание) ситуациях методом образования сильнооточной и высокотемпературной дуги.

Цель исследования-сравнение различных методик изготовления электродов для вакуумной камеры для выявления наилучшей технологии изготовления данных комплектующих вакуумной камеры.

Данную работу можно отнести к исследовательской. Исследование можно применять в промышленности для более длительной эксплуатации вакуумных камер, от этого есть свой экономический эффект который стимулирует дальнейшее исследования в данной области. Эксперименты в данной области позволяют понять какие внешние(атмосфера, магнитное поле...) или внутренние(форма контактов, примеси в материалах из которых сделаны контакты...)факторы могут повлиять на гашение дуги в вакууме. Достоинства данной методики гашения дуги в вакууме перед остальными методами(отключение в воздухе, отключение в масле, отключение в элегазе(SF_6)) представлено в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение характеристик различных технологий отключения.

	Масло	Воздух	Элегаз / вакуум
Безопасность	Риск возникновения взрыва или пожара, при повышении давления (при многократных коммутационных операциях) вызывает повреждение.	Значительные внешние проявления (эмиссия горячего и ионизированного газа при отключениях).	Нет риска возникновения взрыва или внешних проявлений.
Размеры	Относительно большие размеры устройства.	Установка, требующая больших расстояний (неограниченное отключение).	Небольшие.
Обслуживание	Периодическая замена масла (необратимое разложение масла при каждом отключении).	По возможности, замена дугогасительных контактов. Периодическое техническое обслуживание механизма управления.	Не требуется для отключающих устройств. Смазка в минимальном объеме механизмов управления.
Чувствительность к воздействию окруж. среды	Свойства среды отключения могут ухудшаться под воздействием факторов окружающей среды (влажность, пыль и т.д.).		Нечувствительны: полностью запаянная герметичная камера.
Отключение быстрым циклом	Большое время понижения давления приводит к необходимости снижения PdC, если есть риск возникновения последовательных отключений.	Очень медленный отвод горячего воздуха вызывает необходимость понижения номинала отключающей способности (PdC).	Элегаз и вакуум очень быстро восстанавливают свои электроизоляционные свойства: понижение номинала не требуется.
Износостойкость	Посредственная.	Средняя.	Высокая.

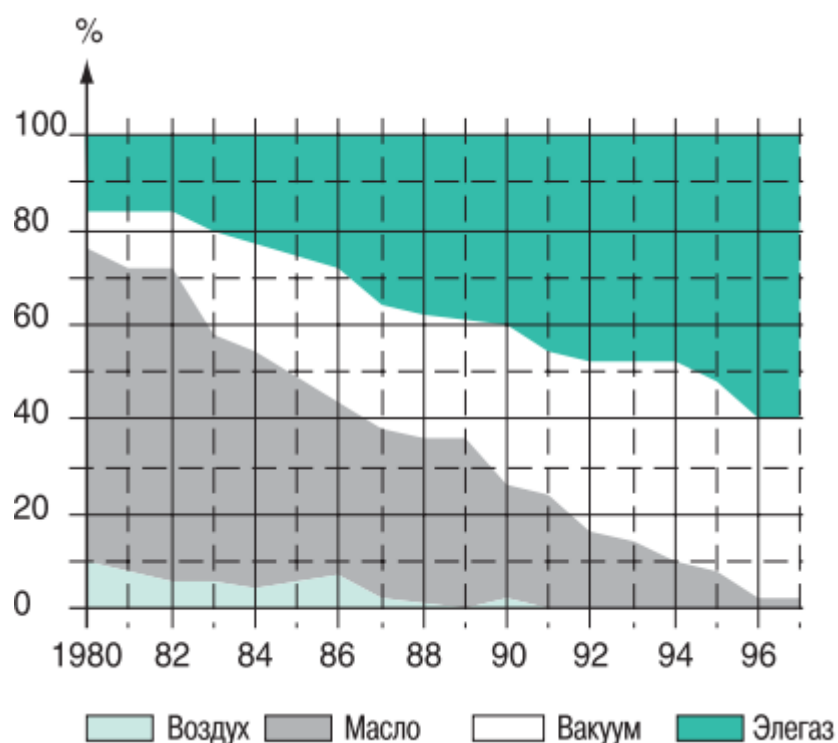


Рисунок 42- Динамика развития рынка выключателей для сетей среднего класса напряжения.

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Разработка, которой посвящено данное исследование, представляет собой вакуумный выключатель который защищает оборудование в штатных и не штатных (короткое замыкание) ситуациях методом образования сильноточной и высокотемпературной дуги.

Опираясь на сильные стороны данной технологии, можно заключить что некоторым компаниям будет интересна методика разъединения дуги в вакууме. Данная разработка нацелена на рынок энергетических компаний, основной задачей которых является выработка и передача электрической энергии. Все энергетические компании которые стремятся уменьшить влияние человеческого фактора, уменьшить затраты на эксплуатацию, увеличить срок службы и уменьшить габариты защитного оборудования будут заинтересованы представленным исследованием.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования данной технологии (таблица 4).

Таблица 4 – Карта сегментирования рынка услуг по единым требованиям к разным технологиям разъединения дуги.

		Основные требования			
		Безопасность	Стоимость	Окупаемость	Габариты
Размер компании	Крупные				
	Средние				
	Мелкие				

4.1.2 Анализ конкурентных решений

Исследуемая методика гашения дуги в вакууме является уникальным техническим решением, так как ближайший конкурент данной методики это элегазовый(SF_6) выключатель уступает по безопасности, так как продукты разложения элегаза опасны для человека. В конечном итоге в качестве

ближайших конкурентов в среднем классе напряжения были выбраны следующие разработки:

1. Элегазовый выключатель(SF₆).(1)
2. Масляный выключатель.(2)
3. Воздушный выключатель.(3)

Технические характеристики данных методик приведены в таблице 5.

Таблица 5– оценочное сравнение конкурентных технических решений.

№	Критерии оценки	Вес критерия	Баллы				Конкурентоспособность			
			Б _в	Б _{к1}	Б _{к2}	Б _{к3}	К _в	К ₁	К ₂	К ₃
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Технические критерии оценки ресурсоэффективности										
1	Габариты оборудования	0,2	5	5	1	3	1	0,9	0,5	0,6
2	Эксплуатационное удобство	0,15	4	3	2	3	0,8	0,75	0,4	0,7
3	Влияние внешней среды	0,03	5	5	3	1	0,09	0,09	0,4	0,2
4	Простота в обслуживании	0,01	5	3	2	2	0,8	0,75	0,36	0,25
5	Надежность	0,05	4	4	3	2	0,6	0,3	0,15	0,15
6	Срок службы без проверки и восполнения дугогасящей среды	0,05	5	4	1	1	0,3	0,1	0,2	0,15
7	Экологичность	0,1	5	3	1	2	0,8	0,45	0,2	0,2
8	Герметичность установки	0,1	5	5	3	1	0,09	0,09	0,05	0,01
9	Демонтаж и утилизация	0,07	5	4	1	4	0,6	0,3	0,25	0,1
Экономические критерии оценки эффективности										
1	Конкурентоспособность продукта	0,01	4	3	2	1	0,05	0,04	0,03	0,01
2	Уровень проникновения на рынок	0,01	4	4	3	1	0,04	0,05	0,02	0,01
3	Цена	0,09	3	4	2	2	0,36	0,3	0,18	0,1
4	Послепродажное обслуживание	0,08	5	4	2	3	0,4	0,3	0,16	0,15
5	Финансирование научной разработки	0,04	5	4	3	1	0,5	0,3	0,2	0,05
6	Срок выхода на рынок	0,01	3	4	3	1	0,04	0,05	0,05	0,05
	Итого	1	67	56	32	28	6,47	5,22	3,15	2,73

Исходя из проведенного анализа можно заключить, что уязвимость конкурентных технологических решений связана, прежде всего со слабой эксплуатационной, экологической безопасностью, большими габаритами, не

большим сроком службы без выхода в ремонт и большими финансовыми затратами на поддержания оборудования в рабочем состоянии. Реализации первого конкурента очень схожа, элегазовый выключатель (SF_6), поэтому коэффициенты их конкурентоспособности не сильно различаются. Компании, которые распространяют данный вид технологии, обладают практически единственным значительным достоинством – это уровень их проникновения на рынок, по причине того что множество производственных объединений являются в течении длительного времени приверженцами данной технологии.

Другие несколько конкурентов это масляный выключатель и воздушный, не могут соперничать с исследуемой технологией гашения дуги в вакууме по причине своих недостатков. В масляном выключателе очень высок риск возникновения взрыва или пожара при повышенном давлении, имеет большие размеры, после каждого отключения необходимо менять масло так как оно разлагается, так же свойства отключающей среды могут ухудшаться под воздействием окружающей среды (влажность, пыль...). Если говорить об отключении в воздухе то тут необходима частая замена и проверка дугогасительных контактов, периодическое обслуживание механизма управления и установка самих выключателей требует большой занимаемой площади.

Преимуществом вакуумного выключателя перед другими технологиями гашения дуги является то что нет риска возникновения взрыва или пожара как в масляном выключателе, не нужно менять контактные поверхности и не нужно большой занимаемой площади как в воздушном выключателе.

4.1.3 SWOT-анализ

Для выявления сильных и слабых сторон проекта был проведён SWOT-анализ, результаты представлены в таблице 6.

Таблица 6- SWOT-анализ исследования.

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Полностью контролируемый технический процесс С2. Экологически безопасен С3. Долгий период эксплуатации без выхода в ремонт С4. Высококвалифицированный персонал С5. Не требует постоянных проверок на состояние	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие некоторых комплектующих в стране Сл2. Для иностранных комплектующих нужна проверка для каждой партии.
--	--	--

	С6. Полностью автоматизированный тех. процесс	
Возможности: В1. Малые габариты установки В2. Замена любого элемента без использования специального оборудования В3. Отсутствие конкурентных технологий		
Угрозы: У1. Отказ заказчика в финансировании У2. Изобретение лучшего метода гашения дуги У3. Не достаточное качество поставляемых комплектующих У4. Ненадежность экспериментального оборудования.		

Согласно таблице 6, были выявлены зависимости сильных и слабых сторон проекта друг от друга. Результаты анализа представлены в таблице 7.
Таблица 7- Интерактивная матрица проекта.

		Сильные стороны проекта					
		С1	С2	С3	С4	С5	С6
Возможности проекта	В1	-	-	-	-	-	-
	В2	-	-	+	-	+	-
	В3	-	-	-	-	-	-
		Сильные стороны проекта					
		С1	С2	С3	С4	С5	С6
Угрозы проекта	У1	+	+	+	+	+	+
	У2	-	-	-	-	-	-
	У3	+	-	+	-	+	-
	У4	+	-	+	-	+	-

		Слабые стороны проекта	
		Сл1	Сл2
Возможности проекта	В1	-	-
	В2	+	+

	B3	-	-
		Слабые стороны проекта	
		Сл1	Сл2
Угрозы проекта	У1	+	+
	У2	+	-
	У3	+	+
	У4	+	+

Проделав анализ зависимостей до конца, необходимо внести результаты в табл.4и получить наглядную зависимость слабых и сильных взаимодействий. В дальнейшем, результаты из таблице 8 позволят избежать трудностей и усовершенствовать проект.

Таблица 8- Результаты SWOT-анализа.

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Полностью контролируемый технический процесс С2. Экологически безопасен С3. Долгий период эксплуатации без выхода в ремонт С4.Высококвалифицированный персонал С5. Не требует постоянных проверок на состояние С6. Полностью автоматизированный тех. процесс	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие некоторых комплектующих в стране Сл.2. Для иностранных комплектующих нужна проверка для каждой партии.
Возможности: В1. Малые габариты установки В2. Замена любого элемента без использования специального оборудования В3. Отсутствие конкурентных технологий	B1B2B3;B2C3C5	B1; B2Сл1Сл2 ;B3

Угрозы: У1. Отказ заказчика в финансировании У2. Изобретение лучшего метода гашения дуги У3. Не достаточное качество поставляемых комплектующих У4. Ненадежность экспериментального оборудования.	У1С1С2С3С4С5С6; У2; У3С1С3С5;У4С1С3С5	У1Сл1Сл2;У2Сл1;У3Сл1Сл2; У4Сл1Сл2
--	--	--------------------------------------

По итогам проведенного SWOT- анализа были выявлены сильные и слабые стороны научно технического исследования. Из анализа видно что возможности данной работы и её сильные стороны превосходят угрозы и слабые стороны данной работы. Можно заключить то что проект готов к обнародыванию и те угрозы что могут иметь место в большей своей части не зависят от исследователей и могут быть устранены при наличии заинтересованных инвесторов.

4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Таблица 9 – 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(накопленный объем научно-технической информации)	4	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	5	4
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	4
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	2
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	0	0
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации	0	0

	научной разработки		
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	0	0
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	0	0
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	0	0
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	4	4
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	1
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	3	3
	ИТОГО БАЛЛОВ	32	29

После исследования степени готовности научного проекта к коммерциализации выяснено то что знания у разработчика данной работы лежат в диапазоне от 29 до 32, что говорит о низкой перспективности данной работы. Многие пункты вывода данной работы для предложения на рынок не были достаточно изучены и проработаны. Можно заключить то что необходимы дополнительные исследования и затраты на более детальное изучение коммерциализации данной разработки.

4.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Проведенное исследование является перспективным так как поможет улучшить характеристики вакуумных выключателей среднего класса напряжения что приведет к лучшему контролю горения сильноточной вакуумной дуги, уменьшению эрозии контактов и.т.д. что повлияет на более длительных срок эксплуатации оборудования, а это в свою очередь ведёт к экономии денежных средств на закупку нового оборудования. Используя таблицу №8, можно сказать что основное НТИ закончено как видно из пунктов 1-5, но для того что- бы организовать предприятие этого недостаточно так как не исследованы другие факторы(маркетинговые исследования на рынке, стратегия реализации НТИ и т.д.). С информацией что имеется на данный момент НТИ можно: продать патент, либо передать исследование в другие руки.

4.2 Инициация проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели, 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

Таблица 10– Заинтересованные стороны проекта.

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
Государство	Финансовая выгода, простота в использовании, экологическая и эксплуатационная безопасность.
Частные предприятия	Малые габариты, более длительный срок службы без выхода в ремонт по сравнению с аналогичными технологиями, дешевле своих аналогов.
Студент	Выполненная диссертация
Научный руководитель	Конкурентные научные разработки, совместные публикации и т.д.

Цели и результат проекта представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Цели и результат проекта.

Цели проекта:	Исследование горения сильноточной дуги в вакууме
Ожидаемые результаты проекта:	Получение характеристик горения дуги: её температуру, ток в разрядном промежутке, концентрацию электронов в момент горения дуги и после. Получение результатов по регулированию горения сильноточной дуги с помощью магнитного поля.
Критерии приемки результата проекта:	Сравнение полученные характеристик горения электрической дуги в вакууме с ожидаемыми результатами рассчитанной модели
Требования к результату проекта:	Подобие параметров горения электрического разряда в вакууме с параметрами рассчитанной модели

4.2.2 Ограничения и допущения проекта

Таблица 12 – Ограничения проекта.

Фактор	Ограничения
1. Источник финансирования	Государство
2. Сроки проекта	08.01.2019 – 18.06.2019
3. Фактическая дата утверждения плана управления проектом	27.01.2019
4. Плановая дата завершения проекта	18.06.2019

4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

4.3.1 Последовательность структурных работ проекта

Планирование состоит из подпроцессов, совершаемых для точных действий которые необходимо совершить для достижения конкретной цели.

План проекта включает в себя последовательность этапов:

1. Последовательность структурных работ проекта;
2. Основные события проекта;
3. Основной план работ;

Последовательность структурных работ проекта- поэтапное описание действий которые нужно совершить для достижения конечной цели. На рисунке 43 представлено последовательность структурных работ для написания ВКР.

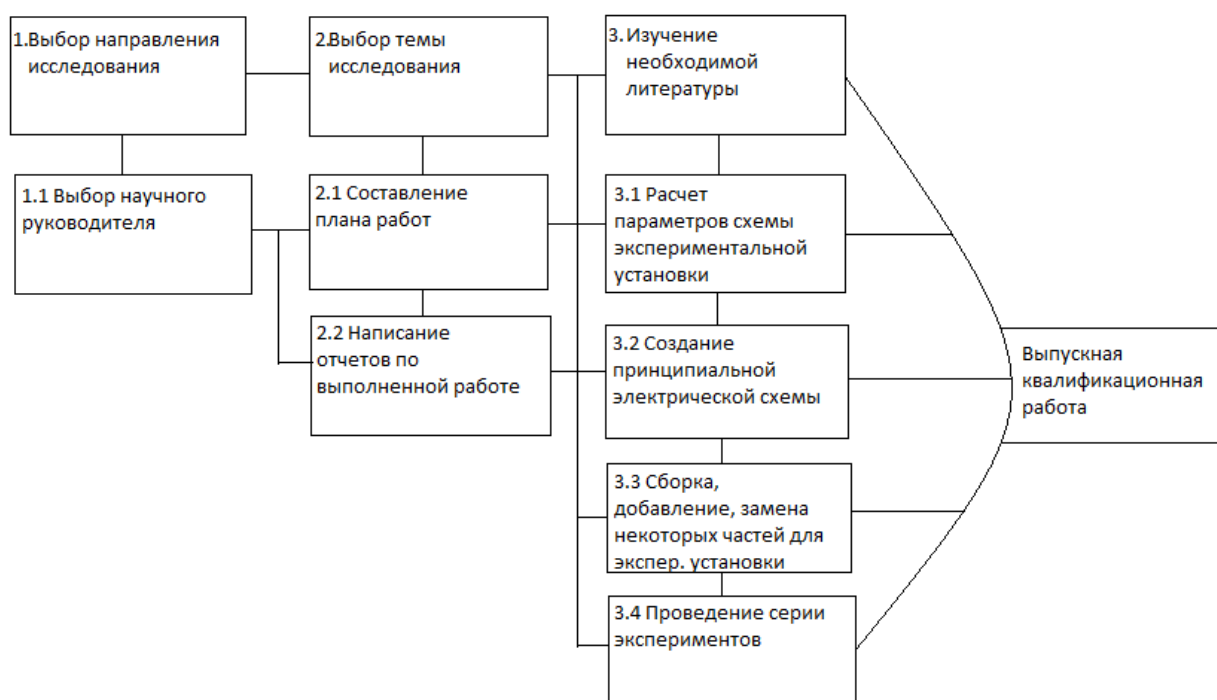


Рисунок 43-Последовательность структурных работ проекта.

В данной работе применена последовательность представленная на рисунке 43. Данную последовательность действий было решено принять как основную по причине ее наибольшей практичности для написания ВКР, так как она подходит для успешной сдачи отчетов в организацию(ТПУ).

4.3.2 План работы

Таблица 13 – Календарный план-график проведения НИОКР.

Код рабо ты (из ИСП)	Вид работ	Исполн ители	Т _к , ч.	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	20	■																		
4	Составление технического задания	Р,Т	10	▨	▨	▨																
5	Изучение литературы	С	80	■	■	■	■	■														
9	Расчет параметров схемы	Р,Т,С	80	▨	▨	▨	▨	▨	▨	■	■	■										
10	Создание принципиально й электр. схемы	Р,Т,С	80					▨	▨	▨	▨	■	■									
11	Сборка, замена некоторых частей установки	С	40										■	■	■							
12	Серии экспериментов	Р,Т,С	20											▨	▨	▨						
13	Обработка полученных данных	С	20														■					
14	Написание отчета	С	50															■				
15	Проверка работы	Р	20															▨	▨			

▨ – Руководитель(Р), Технолог(Т)

■ -Студент (С)

4.3.3 Расчет затрат на проведение исследования

Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ и расчет амортизационных отчислений

Таблица 14– Расчет затрат «Спецоборудование для научных работ».

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб	Сумма амортизации – за год	Сумма амортизации – проект
1.	Персональный компьютеры	1	20000	4000	2000
2.	высокоскоростная фотокамера Photron FASTCAM SA1	1	122780	24556	12278
3.	Турбомолекулярный насос	1	105370	21074	10534
4.	Форвакуумный насос	1	75830	15166	7583
5.	Источник питания маг. катушек	1	89450	17890	8945
6.	Генератор задержек	1	133075	26615	13307
7.	Вакуумная камера с комплектующими	1	340000	68000	34000
8.	Итого капитальных затрат	886000			
9.	Итого сумма амортизации за год	177301			
10.	Итого сумма амортизации за проект	88647			

По данным из таблицы 14, можно рассчитать сумма амортизации по формуле:

$$H_A = \frac{C_{\text{ПЕРВ}}}{T_A} \quad (4.1)$$

$C_{\text{ПЕРВ}}$ - первоначальная стоимость оборудования

T_A - нормативный срок службы оборудования (5 лет)

Основная заработная плата(ФОТ)

Таблица 15– Баланс рабочего времени потраченного на исследование.

Показатели рабочего времени	Руководитель	Технолог	Магистр
Календарное число дней	169	169	169
Количество нерабочих дней	49	49	65
- выходные дни	11	11	11
- праздничные дни			
Потери рабочего времени			
- отпуск и каникулы	-	-	-
- невыходы по болезни	-	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	109	109	93

Расчет основной заработной платы сводится в таблицу 16.

Таблица 16– Расчет основной заработной платы, с учетом районного коэффициента($k_{\text{доп}}=0,1$).

№ п/п	Исполнители по категориям	Заработная плата в месяц. руб	Всего заработная плата по тарифу (окладам), руб.	Итого: за месяц	Итого: за проект	Со всеми надбавками
1.	Руководитель	15800	15800	24831	148986	206658
2.	Технолог	6554	6554			
3.	Магистр	2477	2477			

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} \quad (4.2)$$

Где:

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

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата.

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

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}} \quad (4.3)$$

где $T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.

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

Значит, для руководителя:

$$Z_{\text{осн}} = 15800 \cdot 1,3 = 20540 \text{ рублей}$$

Для технолога:

$$Z_{\text{осн}} = 6554 \cdot 1,3 = 8520 \text{ рублей}$$

$Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб (в качестве месячного оклада магистра выступает стипендия, которая составляет 2477 руб);

Итого по статье $Z_{\text{осн}} = 31537$ за месяц.

За весь период исследования $Z_{\text{осн}} = 189222$ за полгода.

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} + Z_{\text{осн}} \quad (4.4)$$

где $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты ($k_{\text{доп}} = 0,1$);

$Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

Для руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = 20540 \cdot 0,1 = 2054 \text{ рублей}$$

Для технолога:

$$Z_{\text{доп}} = 8520 \cdot 0,1 = 852 \text{ рублей}$$

$$Z_{\text{доп}} = 2906 \text{ рублей за месяц}$$

$$Z_{\text{доп}} = 17436 \text{ рублей за полгода}$$

Итого заработная плата исполнителей со всеми надбавками

$$Z = 206658 \text{ рублей за полгода}$$

Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

Руководитель:

$$C_{\text{внеб}} \cdot k_{\text{внеб}} (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot (20540 + 2054) = 6778 \text{ руб. за месяц} \quad (4.5)$$

$$C_{\text{внеб}} = 40668 \text{ руб за полгода}$$

Технолог:

$$C_{\text{внеб}} \cdot k_{\text{внеб}} (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0.3 \cdot (8520 + 852) = 2811 \quad (4.6)$$

$C_{\text{внеб}}$ = 16866 руб за полгода

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

Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта (материальные затраты)

Затраты на потребляемую электроэнергию рассчитываются по следующей формуле:

$$C_{\text{эл}} = W_y \cdot T_g \cdot S_{\text{эл}} \quad (4.7)$$

где W_y – установленная мощность, кВт;

T_g – время работы оборудования, час;

$S_{\text{эл}}$ – тариф на электроэнергию.

Тариф на электроэнергию составляет – 3,93 руб/кВт·час.

Таблица 17 - Расчёт затрат на потребляемую электроэнергию.

Расчет затрат на потребляемую электроэнергию					
№ п/п	Наименование оборудования	Мощность прибора (кВт)	Продолжительность работы (часов)	Сумма (руб) в месяц	Сумма (руб) за полгода
1.	Персональный компьютер	0,25	300	294,75	1768
2.	Фотокамера PhotronFastcam SA	0,2	12	9,432	57
3.	Турбомолекулярный насос	0,4	80	125,76	755
4.	Форвакуумный насос	2,2	100	846,6	5080
5.	Источник питания маг. поля	9	80	2829,6	16978
6.	Генератор задержек	0,2	30	23,58	142
Итого затраты на электроэнергию				4129.722	24780

Таблица 18– Расчёт затрат по элементу «Материальные затраты»

№ п/п	Материал	Кол-во на проект	Ед. измерения	Цена, руб.	Итого за месяц	Итого за исследование
1.	Электроды	6	шт	6000	6360	38160
2.	Прокладки	3	шт	360		

Итого мат. Затрат: 327132

Накладные расходы(прочие затраты)

В эту статью относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 0,1–0,9 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации в месяц. На базе ИСЭ СО РАН= 0.3%.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (4.8)$$

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

Руководитель:

$$C_{\text{накл}} = 0.3(20540 + 2054) = 6778 \text{ руб. в месяц} = 40668 \text{ за исследование.}$$

Технолог:

$$C_{\text{накл}} = 0.3(8520 + 852) = 2811 \text{ руб. в месяц} = 16866 \text{ за исследование.}$$

Бюджет затрат НТИ

Таблица 19 – Общий бюджет затрат НТИ.

№ п/п	Затраты по статьям						
	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Накладные расходы	Отчисления на социальные нужды	Сумма(руб) за исследование
1.	38160	886000	189222	17436	57534	57534	1245664

В результате было получено, что общий бюджет затрат НТИ составит 1245664 руб.

Сравним сумму оборудования данного НТИ с технологией гашения дуги в масляном выключателе(табл.20)

Таблица 20 – Бюджет затрат для технологии гашения дуги в масляном выключателе.

№ п/ п	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Количество(шт,лг)	Цена(руб)
1.	Выключатель масляный ВТ-35-630-12,5	1	600000
2.	Привод к масляному выключателю	1	120000
3.	Устройство для подогрева масла	1	110000
4.	Трансформатор тока	1	137588
5.	Масло	216,5 литров	17172
6.	Подвижный и не подвижный контакт	1+1	5320
Итого: плановая себестоимость без учета зарплаты обслуживающему персоналу, а так же без мелких частей установки составляет			989492

В результате расчета было получено то что затраты на оборудование в НТИ составляют 886000 руб. У конкурирующей технологии затраты на оборудование без учета зарплаты обслуживающему персоналу и частей установки которые нужно менять после каждого срабатывания масляного выключателя составляет 989492 рублей, из чего можно сделать вывод что исследуемый метод гашения дуги в вакууме будет экономически выгоднее чем конкурентная методика.

4.3.4 Организационная структура проекта

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

Для выбора наиболее подходящей организационной структуры можно использовать таблицу 21.

Таблица 21 – 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 организационной структуре данного исследования из-за того что данный способ является более подходящим. Составляющая проекта является связанной между собой системы, работающие в постоянной последовательности друг с другом. Также одной из причин выбора данной структуры является обязательства по срокам завершения работы.

4.3.5 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта (таблица 22).

Таблица 22 –План управления коммуникациями.

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
1.	Статус проекта	Студент	Представителю заказчика(ТПУ)	Во время сессии
2.	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Студент	Участникам проекта(Научный руководитель и ТПУ)	1 раз в семестр
3.	Отчеты и информация по проекту	Студент	Представителю заказчика(ТПУ)	Не позже сроков графиков и к. точек
4.	О выполнении контрольной точки	Студент	Представителю заказчика(ТПУ)	Не позже дня контрольного события по плану исследования

4.3.6 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 (таблица 23).

Таблица 23– Реестр рисков.

№ п/п	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления
1.	Прорыв в области выключателей безэлектрической дуги на основе электронных элементов		2	5	Средний	Продолжение исследований в области избавления от токов среза и переходного восстанавливающегося напряжения, путем нахождения подходящего материала электродов. Продолжение исследований в области диффузного горения дуги путем регулирования его горения с помощью маг.поля.	Решение проблем в области - большое рассеяние тепла; - высокая чувствительность к перенапряжениям и току перегрузки; - возникновение тока утечки в состоянии блокировки; - ограничение по напряжению обратной последовательности.
	Создание новой		1			Что и в первом	Признание всех

2.	технологии и защиты электрического оборудования от перегрузки, короткого замыкания и отключения			3	Малый		действующих методик устаревшими и не подходящими для дальнейшего применения.
3.	Усовершенствование методик разъединения дуги в масляном выключателе и воздушном		2	3	Малый	Что и в первом	Решение проблемы огромных габаритов масляного выключателя и воздушного. Уменьшение опасности взрыва масляного выключателя. Уменьшение выброса в окружающую среду отработанных продуктов гашения дуги. Повышение электрической прочности воздушного выключателя

							ля.
--	--	--	--	--	--	--	-----

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

4.4.1 Оценка абсолютной эффективности исследования

Динамические методы оценки инвестиций базируются на применении показателей:

- чистая текущая стоимость (**NPV**);
- срок окупаемости (**ДРР**);
- внутренняя ставка доходности (**IRR**);
- индекс доходности (**PI**).

Оценка абсолютной эффективности исследования

Динамические методы оценки инвестиций базируются на применении показателей:

- чистая текущая стоимость (**NPV**);
- срок окупаемости (**ДРР**);
- внутренняя ставка доходности (**IRR**);
- индекс доходности (**PI**).

Все перечисленные показатели основываются на сопоставлении чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности, и их приведении к определенному моменту времени. Теоретически чистые денежные поступления можно приводить к любому моменту времени (к будущему либо текущему периоду). Но для практических целей оценку инвестиции удобнее осуществлять на момент принятия решений об инвестировании средств.

Таблица 24 - Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом(NPW).

№ п/п	Наименование показателя	Шаг расчета							
		0	1	2	3	4	5	6	7
1.	Выручка от реализации, руб.	0	15000 00	15000 00	15000 00	15000 00	15000 00	15000 00	15000 00
2.	Итого	0	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000

	приток, руб.		00	00	00	00	00	00	00
3.	Инвестиционные издержки, руб.	- 1245664	0	0	0	0	0	0	0
4.	Операционные затраты, руб. С+Ам+ФОТ	0	410373	410373	410373	410373	410373	410373	410373
5.	Налогооблагаемая прибыль		50867	50867	50867	50867	50867	50867	50867
6.	Налоги, руб Выр-опер=донал. приб*20%	0	10173	10173	10173	10173	10173	10173	10173
7.	Итого отток, руб. Опер.затр.+ налоги	- 1245664	420546	420546	420546	420546	420546	420546	420546
8.	Чистый денежный поток, руб. ЧДП=Пчист+Ам Пчист=Пдонал.-налог	- 1245664	369837	369837	369837	369837	369837	369837	369837
9.	Коэффициент дисконтирования (приведения при $i = 20\%$)	1,0	0,833	0,694	0,578	0,482	0,402	0,335	0,279
10.	Дисконтированный чистый денежный поток, руб. (с8*с9)	- 1245664	308074	256666	213765	178261	148674	123895	103184
11.	То же нарастающим	- 1245	- 937590	- 680924	- 467159	- 288898	- 140224	- 16329	86855

	итогом,руб. (NPV =86855 руб.	664							
--	------------------------------------	-----	--	--	--	--	--	--	--

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 86855рублей, что позволяет его эффективности.

Дисконтированный срок окупаемости

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (таблица 25).

Таблица 25– Дисконтированный срок окупаемости

№ п/ п	Наименование показателя	Шаг расчета							
		0	1	2	3	4	5	6	7
1.	Дисконтированный чистый денежный поток ($i=0,20$)	- 124566 4	308074	256666	213765	178261	148674	123895	103184
2.	То же нарастающим итогом	- 1245664	-937590	-680924	-467159	-2888 98	-140224	-16329	86855
3.	Дисконтированный срок окупаемости	$PP_{диск} = 1 + 16329/103184 = 0,158$ года							

Индекс доходности (рентабельности) инвестиций (PI)

Индекс доходности показывает, сколько приходится дисконтированных денежных поступлений на рубль инвестиций.

Расчет этого показателя осуществляется по формуле

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧПД_t}{(1+i)^t} / I_0 \quad (4.9)$$

где I_0 – первоначальные инвестиции.

$$PI = \frac{123895 + 103184}{1245664} = 0,18$$

$$PI=0,18<1$$

$$NPV=1011000\text{руб.}$$

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населения или групп лиц, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты.

Таблица 26 – Критерии социальной эффективности.

ДО	ПОСЛЕ
Опасность получения травм и увечий обслуживающему персоналу в ходе эксплуатации.	Вакуумный выключатель безопасен в эксплуатации так как его дугогасящая среда не является взрывоопасной.
Большие габариты устройств и как следствие большая занимаемая площадь.	Имеет небольшие габариты и легко может быть заменён без использования тяжелого оборудования.
Необходимость постоянно проверять уровень дугогасящей среды и периодически следить за комплектующим оборудованием.	Все стенки и стыки камеры полностью герметичны, а после срабатывания выключателя свойства вакуумной изоляции восстанавливаются в течении минуты. Срок службы без какого либо обслуживания в независимости от внешней среды составляет 20 лет.

4.4.2 Оценка сравнительной эффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования. Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы (таблица 27).

Таблица 27– Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта.

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
---------------	-------------------------------	----------------	----------	----------

1. Быстрое восстановление дугогасящих свойств	0,1	5	3	4
2. Удобство в эксплуатации	0,15	5	4	3
3. Помехоустойчивость	0,15	5	3	4
4. Энергосбережение	0,20	4	3	3
5. Надежность	0,25	4	4	4
6. Точность срабатывания	0,15	5	4	4
ИТОГО	1	28	21	22

Аналог 1- Применены электроды с другим составом контактного материала что привело к изменению способности отключения электрической дуги в вакууме.

Аналог 2- Применена методика контроля электрической дуги магнитный полем с помощью тока электрической дуги а не с помощью отдельного источника как в текущем проекте.

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_i^p}{\Phi_{max}} = \frac{5}{28} = 0.17 \quad (4.9.1)$$

$$I_{\Phi}^a = \frac{\Phi_i^a}{\Phi_{max}} = \frac{4}{21} = 0.19 \quad (4.9.2)$$

$$I_T^p = 5 * 0,1 + 5 * 0,15 + 5 * 0,15 + 4 * 0,2 + 4 * 0,25 + 5 * 0,15 = 4,55 \quad (4.9.3)$$

$$I_{T1}^a = 3 * 0,1 + 4 * 0,15 + 3 * 0,15 + 3 * 0,2 + 4 * 0,25 + 4 * 0,15 = 2,77 \quad (4.9.4)$$

$$I_{T2}^a = 4 \cdot 0.1 + 3 \cdot 0.15 + 4 \cdot 0.15 + 3 \cdot 0.2 + 4 \cdot 0.25 + 4 \cdot 0.15 = 3.65 \quad (4.9.5)$$

$$I_{финр}^p = \frac{I_T^p}{I_{\Phi}^p} = \frac{4.55}{0.17} = 26.7 \quad (4.9.6)$$

$$I_{финр}^a = \frac{I_T^a}{I_{\Phi}^a} = \frac{2.77}{0.19} = 14,5 \quad (4.9.7)$$

$$\Xi_{cp} = \frac{I_{\Phi}^p}{I_{\Phi}^a} = \frac{0.17}{0.19} = 0.89 \quad (4.9.8)$$

Таблица 28- Сравнительная эффективность разработки.

№ п/п	Показатели	Аналог	Разработка
1.	Интегральный финансовый показатель разработки	0.19	0.17
2.	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	2.77	4.55
3.	Интегральный показатель эффективности	14,5	26.7
4.	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0.85	1,117

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Сравнение интегральных показателей эффективности показало, что более эффективным вариантом решения поставленной в магистерской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности является исполнение 1, так как имеет более длительный срок эксплуатации и является наиболее эффективным для гашения дуги в вакууме.

Вывод:

Проведено исследования по финансовому менеджменту, ресурсоэффективности и ресурсосбережению. Проведено исследование степени готовности научного проекта к коммерциализации. С информацией что имеется на данный момент НТИ можно: продать патент, либо передать исследование в другие руки. Сравнение значений интегральных показателей эффективности показало, что более эффективным вариантом решения поставленной в магистерской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности является исполнение 1, так как имеет более длительный срок эксплуатации и является наиболее эффективным для гашения дуги в вакууме. Произведено сравнение бюджета затрат(полный) НТИ с бюджетом затрат (только оборудование) гашения электрической дуги в масле, выяснено что НТИ является финансово и ресурсо более выгодным и эффективным. Дисконтированный срок окупаемости НТИ составил 0,158 года. Чистый

денежный доход(ЧДД) составил 86855рублей, тем самым можно говорить что проект является выгодным.

5 ГЛАВА. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Краткое описание исследования

Работа выполнена в ИСЭ СО РАН, в лаборатории вакуумной электроники на вакуумном выключателе среднего класса напряжения(до 54 кВ). Данная работа представляет научно-техническое исследование физических процессов происходящих в вакуумных выключателях среднего класса напряжения. Разработка, представляет собой вакуумный выключатель который защищает оборудование в штатных и не штатных (короткое замыкание) ситуациях методом образования сильноточной и высокотемпературной дуги.

Цель исследования- сравнение различных методик изготовления электродов для вакуумной камеры и методы регулирования сильноточной электрической дуги с помощью магнитного поля для выявления наилучшей технологии изготовления данных комплектующих вакуумной камеры и системы управления регулированием возникновения и горения дуги в вакууме.

Площадь рабочего пространства в помещении составляет 60м², с температурой воздуха в летнее время 23-26 °С, а в зимнее время 24-27 °С. Влажность воздуха 40-50%. Для освещения помещения используются лампы люминесцентная Philips 18Вт G13. В помещении имеется вакуумная установка, два блока питания для высокого напряжения(на малые токи) и для менее высокого напряжения(на большие токи), компьютерный стол и т.д.

5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В вопросы обеспечения безопасности включены не только нормы, которые установлены государством, сюда так же входят нормы организации, который предоставил ему закон.

В лаборатории вакуумной электроники, в которой осуществляют работы связанные с исследованием, модификацией элементов дугогасящей вакуумной камеры и вакуумного оборудования для гашения дуги. В соответствии с внутренним распорядком ИСЭ СО РАН ЛПЭЭ для работ в лаборатории и на установках существуют специальные правовые нормы трудового законодательства. В лабораторию для работ не допускаются: лица не являющимися сотрудниками лаборатории и лица не имеющие доступа для работ с установками; персонал лаборатории не прошедшие аттестацию по ТБ и

ознакомление с техническими и паспортными данными установки; лица не достигшие совершеннолетия не допускаются к работам в лаборатории; лица не имеющие специфическое (техническое) образование по исследованиям и не имеют права находиться в лаборатории посторонние люди без сопровождения ответственного человека. Также администрация лаборатории не имеет права на применение труда в ночное время все лица женского пола и лица мужского пола, не достигшие 18-летнего возраста; к производству сверхурочных работ не допускаются все лица женского пола, а из лиц мужского пола - не достигшие 18-летнего возраста; женщины, имеющие детей в возрасте от трех до 14 лет, мужчины, имеющие детей в возрасте до 14 лет, работники, имеющие детей-инвалидов или инвалидов с детства до достижения ими возраста 18 лет, и работники, осуществляющие уход за больными членами их семей в соответствии с медицинским заключением, не могут привлекаться к сверхурочным работам и направляться в командировки без их согласия; запрещается применение труда женщин на тяжелых работах и на работах с вредными условиями труда, а также требования по (СанПиН 2.2.0.555-96) и (ГОСТ 12.0.004-2015).

Мероприятия для оснащения трудовой зоны:

В лаборатории для питания электрооборудования используется переменное напряжение на 220 и 380В, промышленной частоты 50Гц. Перед началом работы в данных условиях существуют конкретные требования: Убедиться что все выключатели находятся в положении отключено, внимательно осмотреть все оборудование на выявление неисправностей и повреждений, и в случае обнаружения таких неисправностей необходимо их устранить; Использовать провода и соединения с качественной изоляцией; Перед подключением питания необходимо предупредить всех людей что находятся возле оборудования; Технический паспорт установки должен находиться на видном и доступном месте; Процессы связанные с работой установки или замены ее частей всегда проводятся не менее чем двумя людьми;

5.1.1 Производственная безопасность

Анализ вредных и опасных производственных факторов

ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ, согласно данному госту все вредные и опасные факторы подразделяется на:

- Биологические.
- Психофизические.
- Химические.
- Физические.

В приведенной ниже таблице были отмечены вредные и опасные факторы при работе с вакуумным оборудованием (таблица 29).

Таблица 29- Вредные и опасные факторы в лаборатории.

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовлен	Эксплуатация	
1) Отклонение показателя микроклимата в помещении	+	+	+	1. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ ^[3] 2. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ ^[4] 3. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ ^[5] 4. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ ^[6] 5. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ ^[7] 6. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ ^[8] 7. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ ^[9] 8. ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ ^[10] 9. ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ ^[11] 10. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ ^[12] 11. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ ^[13] 12. СанПиН 2.2.4.548-96 ^[14] 13. ГН 2.2.5.3532-18 ^[15] 14. ГН 2.2.5.2308 – 07 ^[16]
2) Утечки токсичных-вредных веществ в атмосферу	+	+	+	
3) Повышенный уровень шума и вибрации	+	+	+	
4) Недостаток освещённости рабочей зоны	+	+	+	
5) Повышенный уровень электромагнитного излучения	+	+	+	
6) Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	

Отклонение показателя микроклимата в помещении

Показатели микроклимата в рабочих помещениях определяются следующими параметрами: 1) Температура воздуха в рабочем помещении; 2) Относительная влажность воздуха; 3) Циркуляция воздуха в помещении.

Источниками тепла в помещении являются: вакуумный выключатель, источники зарядки конденсаторов, различные резисторы, компьютер и т.д.

При повышенной температуре воздуха в замкнутой, плохо-обдуваемой среде, кровеносные сосуды в теле человека расширяются, приводя к повышенному притоку крови к поверхности тела для выделения тепла в

окружающую среду. Для нормального человеческого самочувствия важно соблюдать комфортные условия, а это; равновесие температуры в помещении, достаточный уровень влажности и достаточная циркуляция воздуха.

Понижение влажности в помещении (20%-25%) ведет к пересыханию слизистых дыхательных путей. Допустимые нормы относительной влажности, температуры воздуха и циркуляции воздуха в рабочем помещении должны соответствовать значениям указанным в таблице 29. (СанПиН 2.2.4.548–96).

Разновидность работ делится на три степени тяжести, основываясь на энергетические возможности организма человека. Энергозатраты которые относятся к инженерам-исследователям относятся к степени 1б, с количеством затрачиваемой энергии 120- 150 ккал/ч, это работа производимая сидя и стоя связанная с движением и некоторым напряжением. Комфортная атмосфера для работы в разное время года приведена в таблице 30.

Таблица 30- Комфортная атмосфера в рабочей зоне производственных помещений.

Период года	Категория работы по уровню энергозатрат, ккал/ч	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	1б(120- 150)	21 - 23	20 - 24	60 - 40	0.1
Теплый	1б(120- 150)	22 - 24	21 - 25	60 - 40	0.1

Главной возможностью для регулирования подходящего микроклимата в производственном помещении является обеспечение хорошей циркуляции воздуха с использованием вытяжек и тепловая изоляция всех нагревательных элементов (для оборудования это кожухи, битумные материалы и т.д.).

Для обеспечения комфортных условий труда в холодное время года следует применять радиаторные батареи, воздушные вентиляторы, системы с воздушным отоплением. В летнее время года следует предусмотреть защиту от прямых солнечных лучей занавески, затемненные плёнки, и щиты от нагрева оборудования.

Вывод:

В исследуемой лаборатории в летнее время года работать комфортно, открываются окна и обеспечивается достаточный приток воздуха. В зимний период года включается отопление и в помещении иногда бывает душно, что не

хорошо влияет на трудоспособность персонала. Есть необходимость установить дополнительную вентиляцию в помещении.

5.1.2 Утечки токсичных веществ в атмосферу

Процессы происходящие в вакуумном выключателе с применением газа Азот являются экологически чистыми так как сам по себе этот газ без цвета и запаха и используется растениями для фотосинтеза. Но при неправильном подборе не того газа(элегаз SF₆) может привести к вредным выбросам в окружающую среду, проблемам с экологией и со здоровьем человека. Сам по себе элегаз не опасен, опасность представляет его большая концентрация(При работе с чистым элегазом опасно разбавление кислорода ниже 16%. За счет высокой плотности элегаз способен длительное время сохраняться в открытых сосудах с горловиной в верхней части и заполнять углубления, траншеи, кабельные каналы, закрытые помещения, вытесняя из них воздух. Пребывание человека в среде с пониженной концентрацией кислорода (ниже 16%) может привести к удушью и потере сознания. Причем человек теряет сознание без каких-либо тревожных симптомов. Также опасен выброс газа из баллона под давлением, поскольку может произойти обморожение.). Содержание токсичных веществ в атмосфере не должно превышать уровня ПДК(предельно допустимая концентрация).

Основным рабочим газом в лаборатории является азот, но в соседней лаборатории применяется элегаз, при неправильных условиях транспортировки и при нарушении условий хранения баллоны с газом могут перепутать. По правилам работы различные газы должны храниться на специальных подставках, в специально предназначенных ёмкостях и в отдельном шкафу.

Необходимо строго следовать правилам ПДК вредных веществ на рабочем месте (ГН 2.2.5.3532–18), и в закрытом помещении. По той причине что все эксперименты требуют применения газа азот, существует вероятность утечки газа и его заполнение пространства в помещении, что может привести к отравлению человека (Несмотря на то, что это вещество входит в состав воздуха, которым мы постоянно дышим, намеренно вдыхать его в чистом или концентрированном виде довольно опасно. Он поражает центральную нервную систему. Его молекулы попадают в нервные клетки, нейроны, и нарушают его работу. Такие процессы приводят к нарушению умственной активности, работы сердечнососудистой системы и дыхания. Последствия: панические атаки и появление ощущения сильного страха. Человек становится беспокойным и взволнованным; судороги в скелетных мышцах (икроножных, бедренных и т. д.). Эти процессы сопровождаются сильной

болью, спазмами; ощущение общей слабости, заторможенности. Отравившийся азотом человек может жаловаться на снижение работоспособности и сонливость; боль в области грудной клетки развивается вследствие поражения легких; нарушение сознания, впадение в глубокое коматозное состояние развивается на фоне острой дыхательной недостаточности. Человек перестает реагировать на голос окружающих людей и тактильное раздражение.).

Исследовательские организации в которых применяется любой газ, должны следовать нормам представленными в ГН 2.2.5.2308 – 07 .

Таблица 31- Ориентировочно безопасный уровень воздействия (ОБУВ) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

Наименование вещества	Формула	Величина ПДК, (мг/м ³)	Преимущественное агрегатное состояние в воздухе в условиях производства	Класс опасности	Особенности действия на организм
Азота диоксид	NO ₂	2	п	3	О
Азота оксиды (в пересчете на NO ₂)		5	п	3	

В перечне использованы следующие обозначения:

3 - вещества умеренно опасные

п - пары или газы,

О - вещества с остронаправленным механизмом действия, требующие автоматического контроля за их содержанием в воздухе.

При нахождении утечек газа из баллона, необходимо срочно сообщить начальству, предупредить сотрудников и ликвидировать утечку с целью предотвращения ЧС. Так же необходимо проветрить помещение то- есть провести работы по обеспечению циркуляции воздуха в лаборатории с помощью вентиляции которая служит для откачки пыли и газов из помещения и создания комфортных условий труда для персонала, так же можно открыть окна и форточки для обеспечения более быстрого притока свежего воздуха. В зимнее время года, рабочее помещение проветривается не менее одного раза в час с условием, что температура в помещении не падает ниже установленной нормы.

5.1.3 Превышение уровня шума и вибрации

Предельно допустимый уровень (ПДУ) шума- это уровень шума при ежедневной работе не превышающей 40 часов в неделю, который не вызывает отклонений в здоровье человека.

В лаборатории источниками шума и вибрации являются: затворы, насосы, подвижные контакты и т.д.

Даже при соблюдении ПДУ по шуму не исключено нанесение вреда человеческому организму(человек становится раздражительным, нервным, забывчивым, тревожным, ухудшается интеллектуальная деятельность, быстро утомляемым, приобретает гипертоническую болезнь, бессонницу, неправильный обмен веществ), так как некоторые обладают повышенной чувствительностью к шумовым нагрузкам. Допустимый уровень шума ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ, ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ.

Таблица 32- Предельно допустимые уровни шума и эквивалентные уровни шума на рабочих местах для трудовой деятельности.

Категория напряженности трудоового процесса	Категория тяжести трудоового процесса	
	Легкая физическая нагрузка	Средняя физическая нагрузка
Напряженность средней степени	70дб	70дб

В лаборатории главными методами защиты персонала от шума является установка на оборудование металлических кожухов, установка оборудования в отдельные залы и управление ими из другого помещения, установка звукопоглощающих обшивок. Так же в основные методы защиты входит обеспечение каждому сотруднику в лаборатории персональных средств индивидуальной защиты(СИЗ): беруши и наушники.

Средства защиты от вибрации (ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ), различных патологий вплоть до профессиональной вибрационной болезни. СИЗ рук оператора подразделяют на: рукавицы; перчатки; вкладыши; прокладки. СИЗ ног оператора подразделяют на: обувь; подметки; наколенники. СИЗ тела оператора по форме исполнения подразделяют: нагрудники; пояса, специальные костюмы.

5.1.4 Недостаток освещенности рабочей зоны

Значение хорошей освещенности для человеческого отдыха или работы трудно переоценить. Правильное рассчитанное и подобранное освещение очень сильно влияет на трудовую деятельность работника обеспечивая высокий

уровень работоспособности и психического состояния. Не правильно подобранное освещение создает тени на рабочем месте, формы объектов могут искажаться, в итоге зрение напрягается, появляется усталость и падает производительность труда.

Таблица 33- Требования к освещенности рабочего помещения(СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03).

Помещение	Рабочая поверхность нормирования Коэф Естествен Осв (Г -горизонтальная, В-вертикальная) , высота поверхности над полом, м	Естественное освещение		Совмещенно е освещение		Искусственное освещение		
		КЕО e_n , %		КЕО e_n , %		Освещенность, люмен		
		При освещении вверху и комбинированном	Освещение с боку	Освещение с верху или комбинированное	Освещение с боку	При комбинированном освещении		При общем освещении
						итого	от общего	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Конструкторские и проектные организации, научно-исследовательские учреждения								
Лаборатории научно-технические отделы	Г - 0,8	3,5	1,2	2,1	0,7	500	300	-

Исходя из СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 в лаборатории где происходят электротехнические исследования при нахождении людей в помещении с комбинированным освещением, яркость света должна быть не ниже 500 люмен.

Вывод:

В лаборатории где проводились исследования, освещенности достаточно. На всю стену вставлено окно, через которое проникает дневной свет, кроме этого установлены лампы люминесцентные Philips 18Вт G13. Работать и проводить исследования в таком помещении комфортно и приятно, так как столы и установка расположены таким образом что свет попадает в любые необходимые для человеческого глаза зоны.

5.1.5 Превышение уровня электромагнитного полей (ЭМП)

Источники сильных электромагнитных полей в лаборатории: магнитные катушки, источник питания катушек, высоковольтный контур установки(менее сильноточный), низковольтный контур(сильноточный), все измерительные и контролирующие устройства.

При длительном воздействии ЭМП на организм человека ведет к негативным последствиям: нарушение сна, головные боли, нарушение сердечного ритма что сопровождается болями в сердце.

Допустимая напряженность электрического и магнитного поля промышленной частоты(50Гц) в зависимости от времени воздействия на организм описаны в ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ.

Максимальное значение напряженности электромагнитного поля на рабочем месте в течении одного календарного дня 5кВ/м.

- При значении напряжения электромагнитного поля 5-20 кВ/м время пребывания рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{50}{E} - 2 \quad (5.1)$$

где T – допустимое время пребывания в ЭМП при соответствующем уровне напряжённости(в часах).

E - напряженность ЭМП в контролируемой зоне, кВ/м.

- При напряженности электромагнитного поля 20-25 кВ/м максимально допустимое время нахождения под таким полем 10 минут. Нахождение под воздействием поля больше 25 кВ/м без облачения в средства защиты не допустимо.

Средства коллективной защиты (СКЗ). Проводятся специальные технические и организационные мероприятия для защиты работников от воздействия на их организм электромагнитных полей.

Организационные мероприятия: расчет помещений таким образом что бы персонал не находился под воздействием электромагнитных полей(пребывание вблизи оборудования и его токоведущих частей), правильно рассчитанный рабочий график, ограничение работ в месте нахождения электромагнитных полей.

Технические мероприятия: уменьшение воздействия электромагнитных полей на организм человека(установка поглатителей электромагнитных полей

таких как экраны в виде стальной сетки или из прутьев, установка предупредительных ограждений и знаков для зон с высокой концентрацией электромагнитных полей, экранировка источников испускающих полей, применение индивидуальных средств защиты (очки, комбинезоны, перчатки, ботинки, щитки для лица). Все средства СИЗ (средства индивидуальной защиты) изготавливают из металлизированной ткани или любой другой ткани с высокой электропроводностью.

Вывод:

В самое загруженное время в лаборатории, установка работала по 7-8 часов в неделю, по этой причине нельзя говорить что люди работающие с ней подвергались длительному воздействию сильных электромагнитных полей постоянно. Максимальное поле которое было создано в эксперименте 1-2кВ. Можно рассчитать по формуле допустимое время нахождения людей в таком поле (в часах). Рассчитаем для максимального предела- 2кВ.

$$T = \frac{50}{E} - 2 = 23(\text{ч}) \quad (5.2)$$

где T – допустимое время пребывания в ЭМП при соответствующем уровне напряжённости (в часах).

E - напряженность ЭМП в контролируемой зоне, кВ/м

Допустимое время нахождения в таком магнитном поле составляет 23 часа. Так как исследования проходили всего по 7-8 часов в неделю, можно заключить что работать в лаборатории было безопасно и не требовалось каких либо средств защиты от электромагнитных полей.

5.2 Опасные факторы проектируемого производственного помещения

Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

Электробезопасность это система мероприятий обеспечивающих защиту людей от воздействия электрического тока, электромагнитного поля и электрической дуги.

Все электроустановки разделяются на две категории: до 1кВ и свыше 1кВ (ПУЭ пункт 1.1.32).

У помещений есть свой уровень опасности: 1) Помещения без повышенной опасности (в которых отсутствуют установки которые могут создавать повышенную и особую опасность для человека). 2) Помещения с

повышенным уровнем опасности, это те помещения в которых существует один фактор который может быть причиной негативного воздействия на человеческий организм(прикосновение к электрооборудованию которое имеет соединение с землей, токопроводящая пыль, сырость, токопроводящие полы).

3) Помещения представляющие особую опасность, те помещения в которых существуют одно из нижеследующих условий: сильная сырость, активные химические среды, одновременно двух или более условий повышенной опасности.

В лаборатории установлено электрооборудование и металлоконструкции которые имеют соединение с землей(вакуумная камера, турбомолекулярный насос, форвакуумный насос, источник питания магнитных катушек и т.д.), поэтому данное помещение относится к пункту два(помещения с повышенным уровнем опасности).

В данной лаборатории существуют меры предосторожности от поражения человека электрическим током, такие как: знаки безопасности, защитные преграды, безопасное расположение токоведущих линий их изоляция, защитное заземление (ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ).

Освобождение пострадавшего от воздействия электрическим током происходит путем отключения системы электропитания на оборудование, после этого пострадавшему следует вызвать скорую и оказать первую помощь до ее приезда.

5.3 Экологическая безопасность

Охрана окружающей среды- действия направленные на ограничения отрицательного влияния человеческой деятельности на природу, путем проведения природоохранных мероприятий.

Во время выполнения диссертации были определены источники загрязнения окружающей среды: использование пожароопасных и загрязняющих веществ(спирт, обезжириватель, масло), бытовые отходы, азот.

В рассматриваемой лаборатории а так же в схожих с ней необходимо решить вопрос выброса отходов в окружающую среду, если нет метода их исключить полностью, то нужно их минимизировать. На данный момент отработанный газ из вакуумной камерой вместе с остаточными продуктами гашения дуги выбрасывается в атмосферу (выбрасываются продукты горения

дуги на электродах из CuCr. Влияние большой концентрации пыли из хрома на организм человека не желательно ($1-2\text{мг/м}^3$) по причине возникновения риска отклонения функциональных систем организма: заболевания верхних дыхательных путей, бронхо- легочным заболеваниям, кожного покрова, слизистых оболочек глаз, органов пищеварения). Есть необходимость сбора данного газа и не попадание его в окружающую среду (ГН 2.1.6.3492 – 17).

Спирт и обезжириватель используются как очистители поверхностей от жировых пятен и грязи образцов, соединений. Остатки от использования данных веществ необходимо собирать и утилизировать в специальных установках которые не наносят пагубное влияние на окружающую среду.

Отходы бытового характера (металлическая стружка, использованная бумага, техника) должны храниться в отдельных контейнерах за пределами лаборатории с их последующей переработкой.

5.4 Безопасность в ЧС

Чрезвычайные ситуации делятся на три типа: природного происхождения, биолого-социального характера, техногенного характера.

Одним из наиболее частых ЧС техногенного характера которая может произойти в лаборатории это пожар, возникший при повреждении газовых баллонов находящихся под высоким давлением, короткого замыкания в оборудовании, большом скачке напряжения в сети (ГОСТ 12.1.004-91).

По взрывоопасной и пожароопасной ситуации помещения разделяются на категории А, Б, В1, В2, В3, В4, Г, Д, в свою очередь здания подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д, так же существует разделение на категории пожарной опасности наружных установок А_н, Б_н, В_н, Г_н, Д_н (НПБ 105-03).

Исследуемая лаборатория относится к категории пожарной опасности Д-помещения относимые к негорючим и материалы в холодном состоянии.

По классу огнестойкости лаборатория относится к первому классу (СНиП 21-01-97) (лаборатория защищена трудно возгораемым материалом (кирпич)). Возможность возникновения пожара по причине возгорания электрического оборудования может произойти по причине как электрического характера, так и не электрического.

Причины возникновения пожара по электрическим причинам: Одним возможным фактором возникновения пожара может быть резкий скачок напряжения в линии электропередач. Данный скачок может быть виновником нагрева всех передающих сетей в лаборатории и отключению некоторого

фильтрующего вакуум оборудования (насосы) что может привести к пожароопасной ситуации из-за возрастания концентрации масла в камере. Возможен нагрев, оплавление и даже возгорание коммутационного и защитного оборудования (автоматы, предохранители). В ходе возникновения сбоев в работе электропитания и пожара, может произойти утечка азота из баллонов, что приведет к взрывоопасной ситуации.

Все рассмотренные выше ситуации могут произойти по вине работающего персонала, его не компетенции и не подготовленности к чрезвычайным ситуациям (не своевременная замена устаревших комплектующих газового оборудования(шланги, манометры и т.д.)).

В исследуемой лаборатории для ликвидации возгорания используются переносные средства пожаротушения(огнетушители, набор для резки электрических кабелей, топор, пожарный крюк), которые применяются для тушения возгорания до приезда пожарного расчета.

Топор служит для вскрытия простейших конструкций при эвакуации, набор для резки электрических кабелей нужен для обесточивание электрического оборудования. Пожарный крюк предназначен для разбора конструкций в труднодоступных местах. Огнетушитель служит для гашения возгорания или бушующего пламени (запрещено применять воду как средство ликвидации пожара так как в лаборатории находятся электрическое оборудование и источники электрического питания).

Размещение средств пожаротушения в зданиях и в помещениях не должно препятствовать проходу или эвакуации людей. На этажах должно размещаться не менее двух огнетушителей.

Эксплуатируемое здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности(наличие запасных выходов которые должны быть в исправном состоянии, наличие на каждом этаже и комнате пожарной сигнализации, таблички с направлением в сторону выхода).



Рисунок 44- План эвакуации из лабораторий и расположения средств пожаротушения

Мероприятия которые должны проводится для своевременного упреждения, предотвращения или ликвидации чрезвычайной ситуации: повышение уровня подготовленности рабочего персонала, повышение безопасности эксплуатируемых зданий (замена проводов питания, надлежащий уход за конструкцией здания); работа квалифицированных кадров на исправном оборудовании; своевременное пополнение фондов пожарного оборудования и пожарной охраны.

Вывод:

Произведено исследование рабочего пространства в лаборатории вакуумной электроники ИСЭ СО РАН для раздела «социальная ответственность». Анализ вредных и опасных производственных факторов при работе с вакуумным оборудованием. Были определены условия для комфортного труда для зимнего и летнего времени года. Проводилось исследование возможных рисков с использованием газа в исследовании и его

воздействие на человеческий организм, найдены нормы и государственные стандарты для работы с газом, определены последовательность действий рабочего персонала при нахождении утечек.

Исследованы факторы превышения уровня шума и вибрации на человеческое состояние и возможные последствия воздействия данных раздражителей на человека. Определены предельные нормы воздействия шума на работника и рассмотрена методика защиты от них.

Проведено исследование- влияние уровня освещенности на человеческое самочувствие и его последствия. Определены нормы для продуктивной деятельности трудящегося.

Изучены возможные факторы превышения уровня электромагнитных полей и последствия такого влияния на человека. Рекомендованы стандарты которые помогут уменьшить данные воздействия на человека.

Изучены правила электробезопасности для работы с оборудованием и выявлена методика защиты от возможных воздействий.

Приведены экологические аспекты безопасности, в которых рассмотрены методы защиты окружающей среды от негативного воздействия на нее. Изучена методика предотвращения угрозы и средства и методы защиты от нее.

Были изучены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, рассмотрены методы которые применяются государством и предприятием для защиты от угроз обеспечивая безопасность персонала на рабочем месте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, из всей линейки разновидностей автоматических выключателей, диапазоном работы относящегося к среднему классу напряжения до 35 кВ, существует наибольшее количество методов отключения, таких как отключения в воздухе, вакууме, элегазе и в масле. Перечисленные виды выключателей специализируются на отключении с возникновением между контактами электрической дуги, которая при горении рассеивает запасенную электрическую энергию электрической цепи до полного ее обнуления. Самыми перспективными на данный момент являются элегазовая и вакуумная технология отключения. Но самым безопасным с точки зрения

эксплуатации является именно вакуумный выключатель, которому посвящено данная работа.

Проведён ряд экспериментальных исследований по определению тока среза. Средний ток среза на контактах, изготовленных методом электронно-лучевой наплавкой составляет $5,15 \pm 0,71$ А. На контактах, изготовленных методом порошкового спекания значение тока среза составляет $4,3 \pm 1,9$ А. А на контактах, изготовленных в ИСЭ СО РАН ток среза равен $3,38 \pm 1,55$ А.

Таким образом, по значению тока среза наиболее хороший результат показывают контакты, изготовленные методом магнетронного распыления. Однако, что бы понять, как влияет методика изготовления контактов на характеристики вакуумного выключателя необходимо провести более глубокие исследования, включающие в себя исследования по отключающей способности разрядного промежутка в условиях быстро-нарастающего напряжения, устойчивость контактных пар на холодную сварку, устойчивость к дуге (эрозия контактов при воздействии сильноточной дуги) и т.д.

Проведен цикл исследований по влиянию аксиального магнитного поля на процессы контроля горения дуги в вакуумной дугогасительной камере. Наложение внешнего магнитного поля предотвращает контрагирование разряда, в результате чего разряд горит в диффузном режиме. Кроме того, магнитное поле уменьшает напряжение горения разряда на 20 вольт. Приложение короткого магнитного поля, так или иначе, влияет на характеристики разряда. Пока оно приложено, разряд функционирует в диффузном режиме. Как только поле пропадает, разряд стремится перейти в контрагированную форму.

В ходе проведения исследования характеристик плазмы на стадии горения электрической дуги, эффективно себя показала система двойного

зонда Ленгмюра. Измеряемыми параметрами были: температура электронов, ионный ток насыщения и разность потенциалов. Данный метод применим для определения параметров плазмы в течение горения сильноточного разряда. Однако вблизи перехода тока через ноль сигнал двойного зонда ослабевает и становится сравним с наводками от установки. В связи с этим, для исследования характеристик достаточно редкой плазмы (вблизи и после перехода тока через ноль) целесообразнее использовать одиночные зонды Ленгмюра, работающие в режиме электронного тока насыщения. Использование данного метода позволяет восстановить концентрацию

электронной компоненты плазмы в разрядном промежутке в окрестностях нуля тока, а так же восстановить динамику катодного слоя после перехода тока через ноль в условиях эскалации напряжения. Показано, что концентрация электронов в плазме вблизи нуля тока остается $<10^{12} \text{ см}^{-3}$, а средняя скорость расширения катодного слоя составляет порядка 1 мм/мкс.

Проведён анализ научно-технического исследования в разделе «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», который показал что исследование является конкурентно-способным и перспективным в плане капиталовложений. В ходе сравнения характеристик аналогичных методов отключения с возникновением электрической дуги, метод гашения в вакуумном пространстве показал себя одним из лучших.

В разделе «социальная ответственность», были рассмотрены все опасные для здоровья факторы, опасность которых существует при работе в лаборатории с вакуумным оборудованием. Приведены методы защиты персонала от опасных и вредных факторов. Были рассмотрены методы упреждения ЧС и средства их ликвидации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ:

- [1] Тейлор С. Технология отключения в сетях среднего напряжения (СН) / С. Тейлор // Техническая коллекция Schneider Electric.- 2008.- №15.- с. 4-31.
- [2] Изучение существующих технологий использования выключателей в распределительных сетях. IREQ, апрель 1991 года.
- [3] Пико Ф. Отключение электрического тока в вакууме / Ф. Пико // Техническая коллекция Schneider Electric.- 2008.- №14.- с. 1-32.
- [4] Д. Дюфурне. Элегазовые выключатели. Разработка 1959 -1994 гг. / Д. Дюфурне, ELECTR № 155, август 1994 г.
- [5] Slade P.G. The Vacuum Interrupter. Theory, Design, and Application / P.G. Slade -NY: CRC Press, 2008, ch. 2.
- [6] Д.Ф. Алферов. Физико-технические основы создания вакуумных электрических аппаратов для коммутации импульсных и постоянных токов. :Дис. док. тех. наук: 05.09.01. / Алферов Дмитрий Федорович. Москва. 2010. 297 с.
- [7] Месяц Г.А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга / Г.А. Месяц.— М.: Наука, 2000. – 424 с.
- [8] Boxman R.L. Handbook of vacuum arc science and technology; fundamentals and applications / R.L. Boxman, D.M. Sanders and P.J. Martin. - Park Ridge: Noyes, 1995.
- [9] Juttner B. Cathode Spots / B. Juttner, V.F. Puchkarev, E. Hantzsche, I. Beiliis. - Handbook of Vacuum Arc Science and d Technology, R.L. Boxman, P. Martin, D. Sandersrs (editors), Noyes Publications (Park Ridge, NJ) 1995, с. 73 – 281.
- [10] Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation / A. Anders. -Springer Science + Business Media, LLC. 2008. 540 p.
- [11] Kimblin C. Vacuum arc ion currents and electrode phenomena / C. Kimblin // Proc. IEEE. vol. 59, no. 4, 1971, pp. 546-555
- [12] Андерс А. Определение удельной ионной эрозии катода вакуумной дуги на основе измерения полного ионного тока из разрядной плазмы / А. Андерс, Е.М. Окс, Г.Ю. Юшков, К.П. Савкин, Я. Браун, А.Г. Николаев // ЖТФ. 2006. Т. 76,вып. 10. с. 57-61.

- [13] Schneider A.V. Diagnostics of the Cathode Sheath Expansion after Current Zero in a Vacuum Circuit Breaker / A.V. Schneider, S.A. Popov, A.V. Batrakov, G. Sandolache, and S. W. Rowe // IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 39, no 6, pp. 1349-1353, June 2011.
- [14] Шнайдер А.В. Зондовый метод диагностики катодного слоя после нуля тока вакуумной дуги / А.В. Шнайдер, С.А. Попов, А.В. Батраков // Известия ВУЗов. Физика, 2013. Т. 56. № 7-2. С. 373-378.
- [15] Rusteberg C. On the ion energy distribution of high current arcs in vacuum / C. Rusteberg, M. Lindmayer, B. Juttner, H. Pursch // IEEE Trans. on Plasma Sci., December 1995. – Vol. 23.– pp. 909-914.
- [16] Зимин А.М.. Динамика катодных пятен на поверхности бериллия в дуговом вакуумном разряде / А.М. Зимин, В.А. Иванов, Б. Ютнер. // Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез, 2001, вып. 2, с. 44 – 50.
- [17] Miller H.C. Vacuum Arc Anode Phenomena / H.C. Miller // IEEE Trans. on Plasma Sci., 1983. – Vol. PS-11. – No 5. – pp. 76-89.
- [18] Miller H.C. Discharge Modes at the Anode of a Vacuum Arc / H.C. Miller // IEEE Trans. on Plasma Sci., 1983. – Vol. PS-11. – No 3. – pp. 122-126.
- [19] Miller H.G. A Review of Anode Phenomena in Vacuum Arcs / H.G. Miller // Contrib. Plasma. Phys. – 1989. Vol. 29. No 3. pp. 223-249.
- [20] Технология отключения в сетях среднего напряжения. Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск №14, март 2008.
- [21] Лафферти Дж. Вакуумные дуги. Теория и приложения / Дж. Лафферти. – М.: Мир, 1982. – 432 с., ил.
- [22] Lanen E.P.A. Current- Zero Characteristics of a Vacuum Circuit Breaker at Short-Circuit Current Interruption / E.P.A. van Lanen, R.P.P. Smeets, M. Popov, L. van der Sluis // XXII ISDEIV, 2006, Matsue.
- [23] Козлов О.В.. Электрический зонд в плазме. // О.В. Козлов - Москва.:Атомиздат, 1969.
- [24] Проскуровский Д.И. Эмиссионная электроника. Учеб. Пособие для ВУЗов / Д.И. Проскуровский – 2-е изд., испр. и доп. – Томск: Томский государственный университет, 2010. – 288 с.

- [25] Andrews J.G. Sheath Growth in a Low Pressure Plasma / J.G. Andrews and R.H. Varey // the Physics of Fluids, Vol. 14, No 2, Feb. 1971, pp. 339-343.
- [26] Kaumanns J. Measurements and Modeling in the Current Zero Region of Vacuum Circuit Breakers for High Current Interruption / J. Kaumanns // IEEE Trans. Pl. Sci., vol.25, no 4, pp. 632-636, August 1997.
- [27] Child C. D. Discharge from hot CaO / C. D. Child // Phys. Rev. (Series I), vol. 32, no. 5, May 1911, pp. 492–511.
- [28] Garrigues L. Two Dimensional Model of the Sheath Expansion in the Post-Arc Phase of a Vacuum Circuit Breaker / L. Garrigues, G.J.M. Hagelaar, T.W. Kim, J.P. Boeuf, and S.W. Rowe // XXVII ICPIG, 2005, Netherlands, Topic 17.
- [29] Steinke K. Post-Arc Currents of Vacuum Interrupters with Axial Magnetic Field Contacts under High Current and Voltage Stress / K. Steinke, M. Lindmayer, K.-D. Weltmann // XIX ISDEIV, 2000, Xi'an, China.
- [30] Arai K. Probe measurement of residual plasma of a magnetically confined high-current vacuum arc / K. Arai, S. Takahashi, O. Morimiya, and Y. Niwa // IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 31, no. 5, pp. 929–933, Oct. 2003.
- [31] Klajn A. Langmuir probes in switching vacuum arc measurements / A. Klajn // IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 33, no. 5, pp. 1611–1617, Oct. 2005.
- [33] Сливков И.Н. Электроизоляция и разряд в вакууме / И.Н. Сливков - М: Атомиздат, 1972.- 304 с.
- [34] Санкт- Петербургский ГГИ им. Г.В. Плеханова. Лабораторный практикум №5, Измерение напряжения магнитного поля на короткой катушке, 2003- 5с.
- [35] A. Khakpour, S. Franke, R. Methling, D. Uhrladt, S. Gortschakow, S. Popov, A. Batrakov, and K.-D. Weltmann, “Optical and electrical investigation of transition from anode spot type 1 to anode spot type 2”, IEEE Trans. Plasma Sci, vol. 45, no. 8, 2017, pp. 2126-2134.
- [36] Anton Schneider, Elena Dubrovskaya, Sergey Popov, Alexander Batrakov, «2-D Lengmuir Probe Set for Diagnostics of Plasma Density Distribution and Cathode Sheath Expansion after Current Zero in a Vacuum Interrupter »,Institute of High Current Electronics Tomsk, Russia.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Введение, литературный обзор

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4NM71	Исмаилов Эльдар Мамедбагиоровлы		

Консультант школы отделения (НОЦ) ИШНПТ, отделения материаловедения :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Карнаухова Анна Алексеевна	к.ф.м.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы ИШНКБ, отделения иностранных языков

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

INTRODUCTION

We all live in time of scientific and technological progress. No one can imagine a house without electricity or without a computer, and few people think about how electricity is generated and transmitted through the network. Fewer people know how the voltage is divided and how it works. In other words, after receiving electric energy at power plant it is transferred on power lines to the consumer. You must be able to turn off the current at any time to provide maintenance or if there is a fault in the network section. Heavy loads occur when equipment switches on and off, loads occur in the electrical network when fault currents or short-circuit currents appear and an electric arc occurs that does not work well for the life of the electrical equipment. Emergency situations are rare, and if it happens, then they are manageable due to years of experience, knowledge and new technologies, and practical research in this direction. From the whole list of switching devices, the most popular are circuit breakers, because they allow you to turn on, operate and turn off the current both in normal operating modes and in abnormal operational modes[1]. In my work, I talk about turning off the current with the help of an automatic switch. It operates in the middle class voltage up to 35 kV, due to the fact that for this class of voltage a lot of types of shutdown occur, for example, shutdown in air, vacuum, gas and oil. These types of switches operate in the shutdown mode with the origin between the contacts of the electric arc, which, when burning, spends the stored electrical energy of the circuit until it is completely consumed[1]. There are no better devices that can protect equipment, be cost-effective and safe.

I propose to deal with the types of switches of the middle class voltage up to 35 kV and understand how they work, as well as what are the advantages and disadvantages of them.

Off in the air.

The first devices for switching off electric lines were air switches because they have a simple design, and because they work at atmospheric pressure. Air does not have very high electrical strength, but these switches are now working at voltages up to 20 kV. Firstly, for good equipment work, it is necessary to cool electric arc when the current passes through zero to turn it off[2].

This switch's work and its equipment concerns the following: the electric arc in a chamber is very short and then goes out. An arc chute for all poles of this equipment is necessary. This space at contacts is separated by non-hot plates (the main task is heat energy consumption), in which the arc is attracted and cooled when exposed to

non-burning material. The power that comes to the arc from the electrical network is less than cooling power, which leads to electric arc quenching[2].

Shutdown in the oil.

The possibility of oil as a protecting material has long been known. At the beginning of the last century, it was used as a voltage cut-off agent in its class, before this technology allowed making simple and inexpensive equipment. This switch works like this: the switch contacts are immersed in oil. When the opening of the contacts begins, then an electric arc appears, due to which the oil is divided into hydrogen gas (70%), ethylene (20%) and methane (10%). These gases are collected in a bubble, which acts upon the oil pressure (50-100 bar) until the shutdown. Until the current is reduced to zero, the gas pressure will not be less and so arc will be extinguished by electric blowing. Quenching of an electric arc occurs due to appeared hydrogen, this gas extinguishes well because it has thermal properties and its constant deionization, that is better than air has[2].

Shutdown in a vacuum.

Properties of vacuum as a medium isolating electricity have been known for a long time and used in devices since 1920. But due to the lack of vacuum technology, the use of this medium began in 1960. The advantages of this environment over other extinguishing technologies are the small size of equipment, good safety and long-term service compared to other technologies. Well, vacuum is a clean medium and there are no impurities in it, it means vacuum is an excellent dielectric medium, but the reality is different. Vacuum has never been good and there is always a maximum mark of electrical strength. In a vacuum chamber, the combustion of an electric arc is obtained because there is steam from the metal electrodes and charged particles (electrons and ions)[3]. In other types of switches arc combustion is obtained due to an ionized gas, that is between the contacts. Arc quenching in a vacuum chamber is possible due to alternating current zero and there is an extreme arc current, which has small values in amperes for known metals. Thus, if sinusoid current reaches zero, a number of spots on the cathode (source of electrons) is smaller and the last spot remains, which immediately disappears when current falls below the minimum value. The rapid attenuation of the last cathode spot leads to a current break and complete arc quenching. There are two facts on which vacuum unit disconnection depends: contact material composition and arc control by magnetic field. An axial or radial magnetic field can be used to control arc. These two fields are formed by arc current, using different geometry of the slots in the contacts.

Shutdown of the installation is also dependent on choice of contact material, because of a large amount of steam in metal of a vacuum after extinguishing the arc, the arc may re-ignite. It is necessary the material used in contacts and on entire surface that vacuum holds is as clean as possible and there are no foreign elements and gases in it. One of the features of the technology using a vacuum medium is its versatility, as it is suitable for the protection and control of overhead lines, transformers, capacitor banks, motors and shunt inductors [3].

Shutdown in the gas.

Relevance of technology:

In the middle class voltage is the best now are gas-insulated and vacuum circuit breakers, they give the best performance in everything that can not do other types of switches. If you choose between switching off in vacuum or in SF₆, then it is better to have a look at scope and customer's technological desires. But there is one significant difference, which I think makes the best vacuum technology - the switch does not require any maintenance and guarantees operation for 20 years without going to repair or replace despite the environment in which it works. If we talk about the gas-insulated switch, it does not require frequent inspection and the products of gas decay in such installations can cause harm to people who serve it. Now there is no technology that can replace the shutdown in a gas-isolated environment and in a vacuum environment, working with the same characteristics:

1. Security. No risk of explosion, fire or environmental damage like oil circuit breakers.

2. Longer service life than air circuit breakers and oil and do not require frequent maintenance as air circuit breakers.

3. Compared to the other two switches, vacuum and gas-insulated switches are small in size.

Chapter 1. Literature review

1.1. The appearance of a vacuum arc by opening the contacts

At the moment of opening the contacts, through which an electric current flows with a force much higher than the minimum value for the formation of an arc discharge, an electric arc lights up between them. Due to the unevenness of the contact surface in places of the last contact, the current density becomes very large, which leads to overheating and melting of the contact material and a liquid metal bridge appears. Due to further opening contacts, the bridge heated to a liquid state by

means of a current becomes unstable, and then its rupture will be accompanied by the appearance of an electric arc between the contacts. The instability of the bridge can be caused by several factors: 1) the Effect of surface tension caused by the boiling current of the liquid contact area with subsequent heat exchange by molten metal flows. The area where the broken bridge is a source of vapor of the contact material of the electrodes. Now contacts voltage can exceed the minimum allowable voltage for the appearance of an electric arc for this contact material. Thus, between contacts with a potential difference of several tens of volts, an area with a large amount of steam is formed. As a result of the next vapor ionization, the first plasma is formed, the ion current density in which can be 10^{10} A/m² [5], or 10^7 A/m² as a result of the formation of the electron transition mechanism from the cathode surface of the material [5]. Such a transition of electrons from the cathode surface is called a temperature transition and the subsequent processes, which begin on the cathode surface as a result of ion bombardment. After the destruction of liquid bridge, the voltage in contacts begins to increase rapidly and due to the existence of a large amount of steam from the metal, an electric arc in the form of a bridge is burning [15], which has the form of a pillar, lights up. This type of electric discharge is called "bridge arc". In [16] note that this type of arc combustion is the first stage of the birth of the next arc discharge when the contacts are diluted for any value of the cut-off current. This arc is stable. The burning time of the bridge arc and its transition to the last form of vacuum arc depends on the current cut-off. The transition process from the bridge to the vacuum arc burning in the diffuse mode is shown in figure 1.

As burning time of the arc in a bridge mode expires, shown in figure 1, the arc goes into the diffuse condition of the burning in metal vapor, evaporated from the surface of the electrodes.

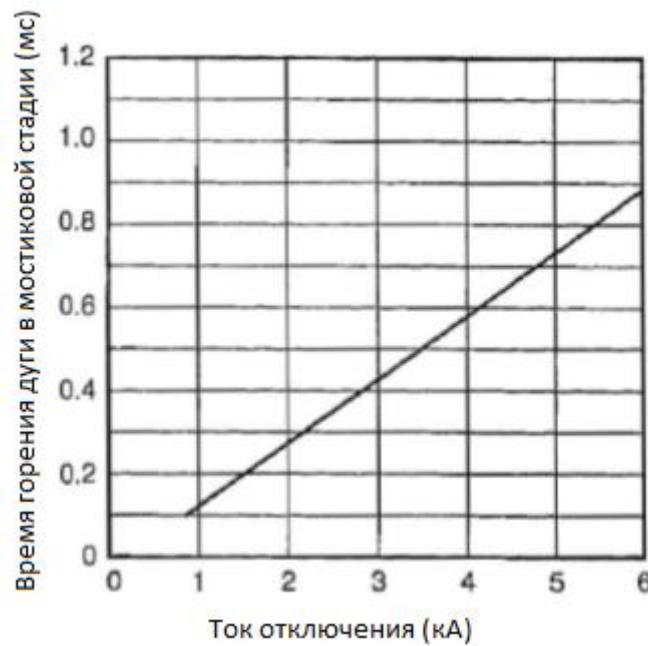


Figure 1– Dependence of the arc burning time in bridge mode on the cut-off current [5].

1.1. Diffuse mode of arc combustion in vacuum

The diffuse mode of arc burning takes place with small breaking currents, of the order of a few (~ 6 kA). The mode of diffuse combustion of the electric arc occurs with a uniform distribution of the electric field over the area of the gap between the contacts with a small drop in potential and occupies almost all interelectrode space. In this case, the effect of the anode on the combustion of the electric column of the arc is small. All the voltage drop on the electric arc is in the cathode region, which depends on the material of two contacts and can be a value of $10 \div 25$ V [5,6]. The cathode surface is covered with a large number of constantly moving cathode spots. Thus, the arc discharge is divided into three main sections (figure 2): 1) the cathode Region, 2) the arc Column, 3) the anode Region.

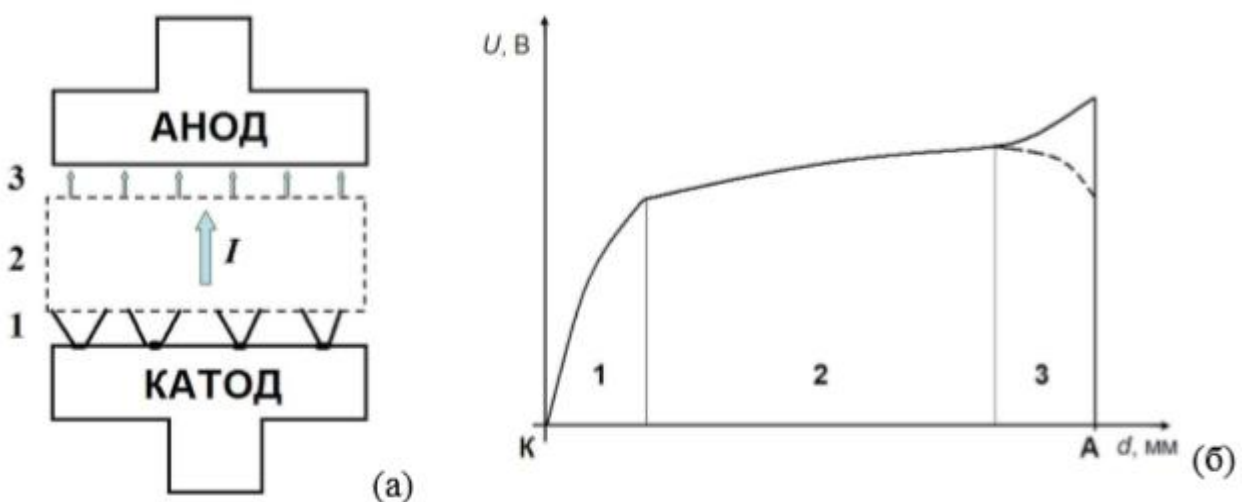


Figure 2. – Representation scheme of the vacuum arc (a) potential distribution between electrodes (b)[5].

The first area is the source of the first plasma, a spot on the cathode (CP). KP is a small (about 10^{-4} ÷ 10^{-2} cm) area that glows on the cathode. Because of this area, there is a transfer of electric current from the cathode to the electric arc column [7,8], [9,10]. Under the spot that glows the cathode material is heated above the boiling point, this is the reason of the strong evaporation of the cathode material. At this time, a large flow of electrons passes through the vapor of the material due to the emission from the boundary of the liquid substance. This will result in the formation of a cathode over the plasma surface of the cathode material. The second area is the arc burning area, the area between the anode and the cathode. An electric arc is a neutral plasma composed of destroyed cathode particles. Ion current, according to the authors [11,12], can be 7÷12 % of the total current, and depends entirely on the contact material. The charge of ions for copper and chromium is two.

The electronic temperature in the electric arc, according to different data, can lie from 1 to 4 eV. In such works as [13,14] the authors took the average temperature of electrons equal to 3 eV.

At time disconnection of the electrodes with a consequent increase in the arc current appears many of the glowing cathode spots (KP) at the cathode. Each CP emits plasma. The closer towards the surface of the anode, the stronger the plasma hybridize with each other, forming area of the cathode plasma interactions (figure 3). Due to the fact that the plasma density is very high, elastic and inelastic collisions between plasma particles occur in plasma interaction region. There is an influence on ions distribution by energy [15]. Due to the flowing current, an azimuthal magnetic field is formed. In the end, the arc column begins to shrink, increasing the voltage of the arc between the electrodes due to an increase in the resistance of the channel in the plasma.

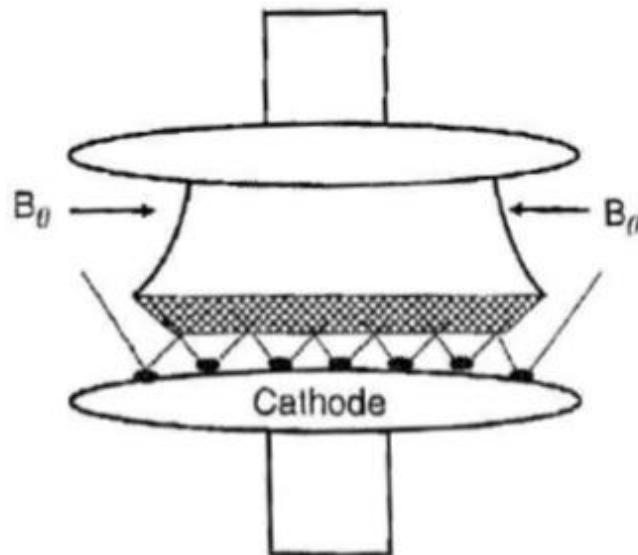


Figure 3. – Formation of the plasma overlap region at the cathode [5].

The third area is the area located between the electric arc and the anode, it is a layer of charge in space– the anode area. In such an area, the energy of electrons can only increase due to acceleration in the fall of the potential near the anode. After that, the vapor from the anode surface begins to ionize, which causes slow ions to appear. Then there is a voltage drop on the anode electrode and processes that occur on its surface are completely dependent on the combustion modes of the electric arc (from its mode: diffuse mode or counteragent).

In the mode of diffuse arc combustion, the anode potential drop is completely negative (figure 2, (b) dotted line). The processes that occur at time of combustion of the vacuum arc and its behavior depends on the area near the cathode. During the increase in the current of the electric arc, the voltage drop in the electric column begins to increase, while the negative barrier at the anode decreases, the temperature of the anode surface increases, causing its greater evaporation into the space between the electrodes.

1.2. Compressible mode of arc combustion in vacuum.

When the discharge current becomes greater, this situation which is described in 1.2, changes will occur, first from the anode side. The change of arc combustion from diffuse mode to compressible combustion mode is accompanied by a change in the sign of the anode fall (figure 2, (b) solid curve). The mechanism of rapid (positive) anode jump here is a connection with the ion deficiency near the anode region called ion starvation [11,16]. With the appearance of ion starvation, as they say in [11], there is an inhibition of cathode ions. Under fieldbv, which is formed by its discharge current, the electric column of the arc begins to shrink, followed by

focusing in another part of the anode. Accelerated electrons in the anode region successfully heat the anode, which leads to its strong evaporation. The vapor from the anode surface begins to ionize with the help of the first electrons, and the plasma of the second category begins to appear in the anode region with ions slower in speed than ions from cathode spots. Such a mechanism leads to spatial compensation of the charge in the layer, but the rapid growth of the current will again lead to a shortage of ions on the boundary layer. As a result of the above processes, a bright spot appears on the anode, which will become a source of anode plasma. At the time of the formation of a spot on the anode, high-frequency oscillations begin to occur at the arc-burning voltage. The appearance of a spot on the anode contact depends on the current of the electric arc, the burning time of the electric arc and the distance between the electrodes. Different modes of anode spot life are considered in [17,18,19]. The spot on the anode looks like a bath of molten metal, which in turn is a source of vaporized metal vapor. At the moment of transition of the arc current through the boundary zero, the gap between the electrodes is filled with a large amount of metal vapor, and the electrical conductivity of this gap can be easily restored due to ionization processes during the increase in the voltage at the contacts. For this reason, an electric arc in a vacuum with an anode spot that has arisen is the cause of a strong destruction of the contacts, and the gap between the electrodes becomes a zone of low disconnection ability.

1.4. The influence of external axial magnetic field on the modes of discharge

To ensure that there was no formation of anode spots in vacuum interrupters, a longitudinal magnetic field (axial MAG. field (figure 4)) is formed. It is a well-known fact that in the axial magnetic field technology, electrons and ions are given a spiral direction of motion along the magnetic field lines, which stabilizes the arc in the diffuse mode and prevents the appearance of the focused arc mode. This, in turn, prevents the anode spot from appearing, and contacts erosion remains minimal, which makes it possible to provide a high ability to disconnect [20].

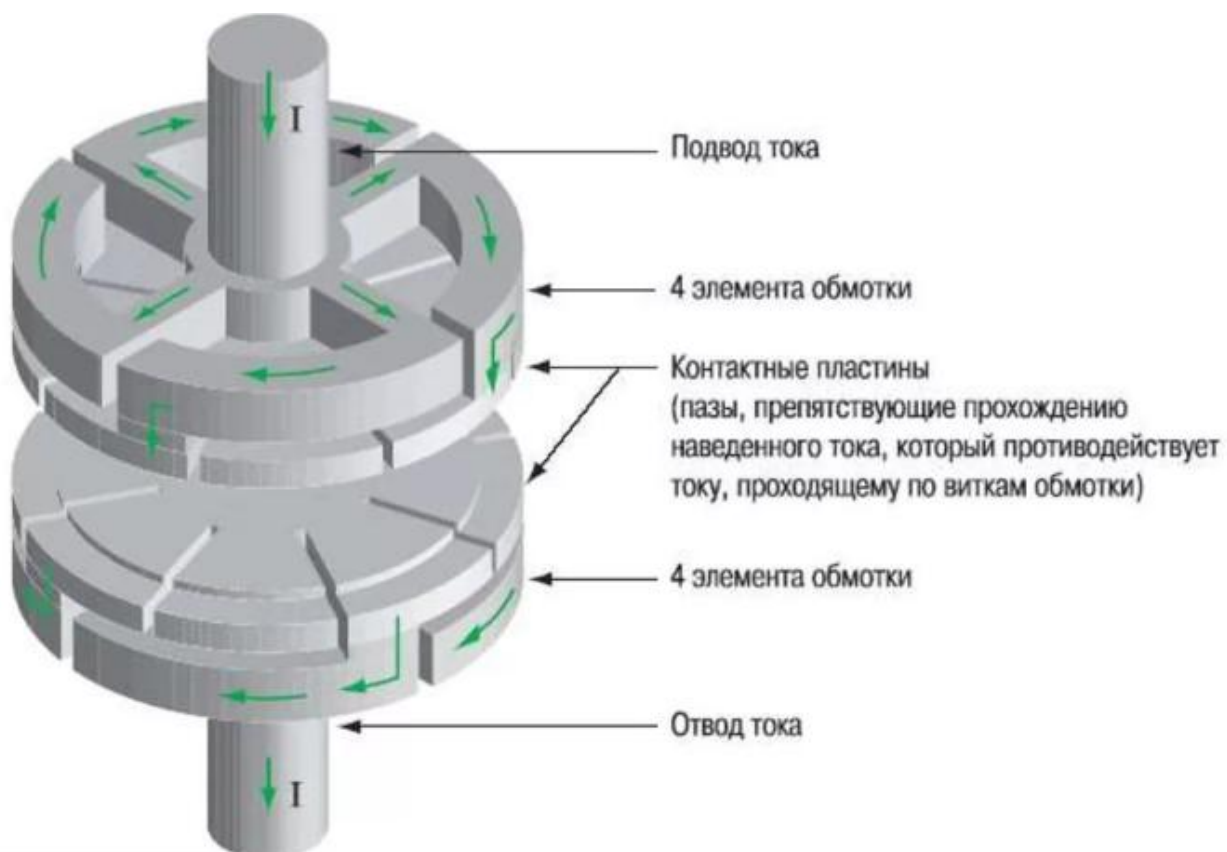


Figure 4. – Electrodes forming a magnetic field of the longitudinal direction[20].

1.3. Formation of the cathode layer after the current transition through zero at the time of voltage increase in the interval

After the end of the arc combustion phase and the current transition through zero, the vacuum gap restores its insulating properties (section 1.2). At this time, there is still plasma in the interval, which consists of electrons and ions that were formed as a result of ionization of neutral atoms evaporated from the electrodes. Phase after the arc is of time, as this time period of increasing applied transient voltage (PVN). If at the moment of the applied voltage the insulating gap withstands and there is no breakdown of the gap, then the vacuum chamber has successfully performed its function. At the time of application of PVN, a positive spatial charge is formed in the cathode layer, which begins to expand and push the plasma out of the gap. During the time of $1\ \mu\text{s}$ until the transition of the arc current through the zero mark, there is a phenomenon called "current cut" at a value of $1.8 - 1.9\ \text{A}/\mu\text{s}$ [21.5] which indicates the disappearance of cathode spots at extreme currents. This leads to the disappearance of the source of supersonic plasma from the cathode, and after a time of $1\ \mu\text{s}$, which corresponds to the transition of the arc current through the zero mark, a small amount of plasma remains in the interval, which has no directional velocity. At this point, PVN growth does not yet occur and the post-arc current in the

interval (post-arc current) is supported by the existing plasma decay. This period is called the "zero voltage phase" [22].

VDC electrodes can be represented in the framework of the Langmuir double probe theory, since the dependence between voltage and current is determined [23], if the following assumptions are taken into account:

- the distance between the electrodes and their dimensions are much longer than the Debye length,
- stationary plasma distribution, uniformly along the entire discharge gap, in turn, the particles trapped on the electrode are absorbed by it,
- the temperature of ions is much less than the temperature of electrons,
- there are no any collisions of particles in the plasma and in the layer,
- no new plasma formation.

During a current equal to zero, the current and voltage in between the electrodes are zero. The thermal velocity of electrons is greater than the velocity of ions. For this reason, the electron flow to the electrode is greater than the ion flow, which leads to the appearance of an electric current. A large current of electrons leads to the emergence of a floating potential of the negative sign of the electrode with respect to the plasma, which stops the flow of electrons and equates it with the flow of ions. Due to the fact that the cathode (former anode) begins to grow PVN, the growing electric field repels more electrons. But at the same time, a small part of high-energy electrons at the beginning of the growth period of PVN can overcome the electric field that inhibits them and reach the cathode. Due to the fact that PVN is growing, the value of the cathode potential reaches almost complete closure of the electron flow. From now on, the current at the cathode is determined only by the flow of ions (ion saturation current) that have reached the cathode surface. The subsequent increase in PVN will only lead to an increase in the thickness of the layer at the cathode and will not have any effect on the ion saturation current, which will begin to decrease over time due to a decrease in the plasma concentration in the interval.

The electric field at the cathode, penetrating into the quasi-neutral plasma, accelerates ions and slows electrons to a speed that is higher than thermal. In the end, with the speed of Bohm ions are in the cathode layer[24]:

$$V_E \approx \sqrt{\frac{kT_e}{M}}, \quad (1.1)$$

where k is the Boltzmann constant, T_e is the temperature of electrons, M is the mass of ions. The Bohm rate and the ionic saturation current are related by the formula:

$$i_{i, \text{sat}} = q_i v_i n_i A, \quad (1.2)$$

where q_i is the average ion charge, n_i is the ion density at the plasma-layer boundary, and A is the contact surface area. We think that the electrons at the plasma-layer boundary have a Maxwell energy distribution, for the electron current we obtain the formula:

$$i_e = j_{e, \text{sat}} A \exp \left(\frac{q_e V_p}{k T_e} \right), \quad (1.3)$$

where $j_{e, \text{sat}}$ is the electron saturation current, q_e is the elementary charge, V_p is the voltage drop in the layer. In this equation, expect that the electrons in the plasma layer have the initial speed v to satisfy the condition $\frac{1}{2} m_e v^2 \geq e V_p$. The electron saturation current is possible only when the potential at the contact has a large positive value in contrast to the plasma potential. In full value, the electron saturation current is much superior to the ion. For full current according to [22] there is an expression:

$$i = i_{i, \text{sat}} \tanh \left(\frac{q_e V_p}{2 k T_e} \right), \quad (1.4)$$

where V_p is the potential difference between the electrodes. In this expression, the total current is limited to the ionic saturation current. The expansion of the cathode layer, as a temporary function of $s(t)$, is described in [25]. Schematically, the growth of the cathode layer is shown in figure 5. This model says that there are no electrons inside the cathode layer, and equation (1.2) is used for all points in space inside the cathode layer, and at the layer - plasma boundary. Since the layer passes into the plasma grows, ions that are in the plasma move to the layer - plasma boundary. In this case, an additional ion current begins to flow through the layer, for this reason, the current at the boundary of the layer is calculated by [26]:

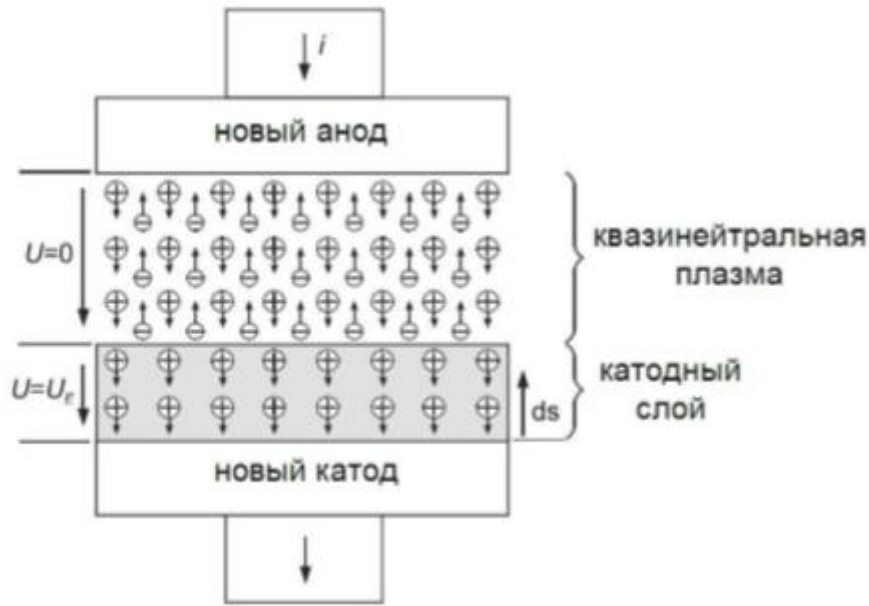


Figure 5. –Representation of the growth of the cathode layer in the discharge gap after the current transition through zero[26].

$$i = g_i \left[(v)_i + \frac{ds}{dt} \right] i_i A, \quad (1.5)$$

where v_i is the rate of ions at the plasma-layer boundary and ds/dt is the rate of expansion of the layer boundary. The connection between the current i , voltage V and the thickness of the cathode layer s is described in the work of Child [27] and has the form (after conversion to SI):

$$i = \frac{4\epsilon_0 A}{9} \sqrt{\frac{g_i V^2}{M s^2}}, \quad (1.6)$$

where ϵ_0 is the permittivity of the vacuum. Child's model suggests that ions begin their movement from a stationary state. But the equation (1.5) assumes that the ions have an initial velocity as the layer moves.

In [25] complemented the model of Child's method of making the initial speed of the flow of ions. As a result, the expression of the expansion of the cathode layer takes the form described in [26]:

$$s^2 = \frac{4\epsilon_0 V_0}{9 g_i n_i} \left[\left(1 + \frac{V}{V_0} \right)^{3/2} + 3 \frac{V}{V_0} - 1 \right], \quad (1.7)$$

where V_0 is calculated as:

$$V_0 = \frac{M}{(2g_i) \left(v_i + \frac{ds}{dt} \right)^2}, \quad (1.8)$$

This model tells about the increase of the cathode layer after the transition of the current value through zero in the conditions of voltage growth. To study the characteristics of the cathode layer devote a lot of time, since this is the area on which the restoration of the insulating strength of the VDC depends. Models of expansion of the cathode layer are widely considered in such works as [26,28,29], and the parameters of the plasma that remains after quenching the electric arc using the probe technique are considered in [30,31].

1.6 The relevance of the work

Disconnection in a vacuum environment is not a new technology, the VDC has a good potential for studying and improving its parameters, especially noteworthy is the technology of creating an axial magnetic field and the study of alloys of contact surfaces. I admit the possibility that the work on reducing the dimensions of the switch housing and increasing the voltage class will continue and will bear fruit. To do this, you need to continue to investigate the arc quenching processes, the processes after the current transition through zero, the selection of a suitable magnetic field. Research and solving these problems will help to better understand the processes in the WDC, and possibly improve the characteristics of the WDC as a whole.