

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А. Ф. ИОФФЕ РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи



**ЗАБЕЛЛО КОНСТАНТИН КОНСТАНТИНОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТОДНОГО ПЯТНА ВАКУУМНОЙ ДУГИ И  
ГЕНЕРИРУЕМОЙ ПЯТНОМ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ.**

Специальность 01.04.04 – Физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени

Кандидата физико-математических наук

**Санкт-Петербург 2015**

Работа выполнена в лаборатории Физики низкотемпературной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

**Научный руководитель:**

Кандидат физико-математических наук, **Школьник Сергей Маркович**, заведующий лабораторией Физики низкотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург.

**Официальные оппоненты:**

Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, **Юшков Георгий Юрьевич**, Лаборатория плазменных источников, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), г. Томск.

Кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, **Игнахин Владимир Станиславович**, Кафедра электроники и электроэнергетики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), г. Петрозаводск.

**Ведущая организация:**

Акционерное общество Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (АО "НИИЭФА"), г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **«19» февраля 2016 г. в 15 час. 30 мин.** на заседании диссертационного совета **Д212.190.06** при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении Высшего профессионального образования «Петрозаводский государственный университет» по адресу: 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина 33, ауд. 221.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет» и на сайте <http://dssp.petsu.ru/ds/index.php/candidates/32-zabello>

**Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_ г.**

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук, доцент



**Пикuleв В.Б.**

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Вакуумная дуга (ВД) – это сильнотоочный (несколько ампер – десятки килоампер) низковольтный (десятки вольт) электрический разряд, который поджигается в вакууме и горит в парах эродирующих электродов [1]. ВД могут гореть на «горячих» и «холодных» электродах. «Холодные» электроды – это электроды, средняя температура которых ниже той, при которой может происходить интенсивное испарение материала электрода. Наиболее широко ведутся исследования ВД с «холодными» электродами. Такие ВД существуют благодаря наличию на поверхности катода локальных нестационарных микропривязок, называемых катодными пятнами (КП). В них поверхность локально разогрета до очень высоких температур. КП являются источником эрозионных плазменных струй (ПС) и микрокапель [2].

КП ВД является одним из наиболее фундаментальных объектов исследования физической электроники и физики электрического разряда [3,4]. В настоящее время преобладает точка зрения, что элементарные процессы, происходящие в КП в процессе их горения, это не что иное, как акты взрывной эмиссии на микроскопических неровностях поверхности электродов [5,6]. Время жизни КП от его образования до погасания составляет от десятых долей до десятков микросекунд. Взамен отмирающего КП на некотором расстоянии образуется другое КП и т.д., т.е. в ВД происходят процессы, обеспечивающие регенерацию КП. Отмирание КП и его образование на новом месте принято называть «движением». В свободно горящей дуге движение КП является хаотическим и характеризуется «коэффициентом диффузии». В дуге, находящейся под действием внешнего тангенциального (параллельного плоскости катода) магнитного поля (в том числе, в случае сильнотоочных дуг, собственного магнитного поля дугового тока), на фоне хаотического движения КП появляется дрейф в «антиамперовом» или «обратном» направлении. То есть, в направлении, противоположном тому, в котором сила Ампера действует на ток, протекающий через КП. Если дуга находится под действием магнитного поля, наклонённого к поверхности катода, т.е. поля, у которого помимо тангенциальной есть и нормальная (перпендикулярная к поверхности катода) компонента, то траектория движения КП отклоняется на некоторый угол от антиамперового направления. Этот угол называют углом Робсона [4]. Движение КП под действием магнитных полей, иначе – динамика КП во многом определяет состояние дуги [7].

Различают два рода КП. Первый род относят к случаю горения дуги на окисленных или «загрязненных» (острова окислов микроскопического размера, включения серы, углерода и т.п.) электродах. Переход ко второму роду пятен осуществляется в ходе очистки электродов в процессе горения дуги пятнами первого рода. КП второго рода отличаются от первого намного большей скоростью эрозии, временем жизни (на порядок и более) и меньшей скоростью перемещения по поверхности катода. Расстояние, на которое перескакивает КП второго рода, как правило, порядка размера его кратера [8]. В дуговых устройствах после краткого процесса тренировки электрода горят только пятна второго рода. Поэтому в настоящей работе рассматриваются именно эти пятна - пятна второго рода.

Количество КП, одновременно горящих на поверхности катода, связано с током ВД  $I$ , т.к. средний ток, пропускаемый одиночным КП  $I_s$ , ограничен. При  $I > I_s$  происходит деление КП [9].

Для слабotoчной ( $10^1 - 10^2$  А) ВД характерно наличие одного или нескольких КП. Катодная привязка сильноточной ( $10^3 - 10^5$  А) дуги, состоит из множества КП.

Слаботочный вакуумный дуговой разряд широко используется в ионно-плазменных напылительных устройствах [10] и источниках металлических ионов [11]. Для повышения эффективности источника нужно использовать ионы с высоким средним зарядом. Использование аксиального магнитного поля (АМП) позволяет значительно увеличить средний заряд иона в плазме, генерируемой ВД. В установках для нанесения покрытий магнитное поле используется для контроля динамики КП [12, 13], а также для отделения ПС от потока капель, генерируемых КП, и транспортировки ПС к мишени [14]. Отметим, что в подобных установках дуги и, соответственно, КП, на которые они опираются, находятся под воздействием магнитных полей различной ориентации.

Большой практический интерес представляет исследование сильноточной ВД в связи с разработкой вакуумных аппаратов, предназначенных для коммутации сильноточных электрических цепей при высоком напряжении. При превышении определённых значений тока в таких аппаратах происходит контракция дуги на электродах и сильный перегрев их поверхностей, что приводит к интенсивному испарению материала электродов и далее к отказу вакуумного выключателя. Для увеличения отключаемого аппаратом тока необходимо обеспечить равномерное распределение плотности тока по поверхности электродов, т.е. удержать дугу в диффузном, не контрагированном состоянии. С помощью АМП удалось заметно перераспределить плотность тока по поверхности электродов и достичь больших токов отключения [15-17]. Необходимо отметить, что КП в сильноточной ВД, вообще говоря, находятся в наклонном магнитном поле даже в случае, когда внешнее поле однородно и обладает лишь аксиальной компонентой  $B_n$ . Тангенциальная компонента магнитного поля  $B_t$  создается самим током разряда и увеличивается по мере удаления от центра электродов.

Всё выше сказанное показывает, что как физический, так и практический интерес представляют различные, включая и динамические, характеристики КП, в дугах, находящихся под действием магнитных полей различной ориентации, в том числе наклонных к поверхности катода полях. К началу настоящей работы исследования характеристик КП в таких условиях были единичны [18, 19]. Мало исследованным оставался и вопрос воздействия магнитных полей на ПС КП [20, 21]. Это и определяет актуальность темы диссертационной работы.

### **Цель диссертационной работы.**

Целью диссертационной работы являлось определение характеристик катодных пятен и формы и направления распространения истекающей из них плазменных струй в магнитных полях различной ориентации относительно поверхности катода. Исследования велись в дугах с катодами из бескислородной меди, медь-хромовой композиции CuCr30 и из тугоплавких металлов – молибдена и вольфрама. Выбор материалов обусловлен тем, что медь является металлом, на основе которого создаются электродные сплавы и композиты. Медь-хромовые композиты являются основными материалами для электродов вакуумных дугогасительных камер. Тугоплавкие металлы рассматриваются как перспективные для применения в вакуумной коммутационной аппаратуре, однако остались мало исследованными с этой точки зрения.

В задачи работы входило определение в магнитных полях различной ориентации:

1. среднего тока, пропускаемого катодным пятном на различных материалах при разных длинах дуги;
2. напряжения горения слаботочной вакуумной дуги (с одиночным катодным пятном) на различных материалах при разных длинах дуги;
3. динамических характеристик катодных пятен в слаботочной вакуумной дуге (с одиночным катодным пятном), таких как скорость и направление движения (угол Робсона) на различных материалах при разных длинах дуги;
4. формы и направления распространения плазменной струи катодного пятна в слаботочной вакуумной дуге.

### **Научная новизна.**

1. Определен средний ток на пятно  $I_s$  на катодах из Cu, CuCr30, Mo и W в широком диапазоне магнитных полях различной ориентации. Впервые обнаружена зависимость  $I_s$  от длины вакуумной дуги.
2. В вакуумных дугах различной длины с катодами из Cu и CuCr30 определена зависимость напряжения горения слаботочной дуги от индукции аксиального магнитного поля  $B_n$  при различных величинах тангенциального поля  $B_t$ . Обнаружено, что она имеет V-образную форму. Все полученные зависимости сходятся к кривой, полученной при  $B_t = 0$ , при соотношении  $B_n / B_t \approx 1,5$  для катодов из меди и  $B_n / B_t \approx 3,5$  для катодов из CuCr30.
3. Проведены систематические измерения и определены динамические характеристики катодных пятен на катодах из Cu, CuCr30, Mo и W в широком диапазоне магнитных полях различной ориентации. Получены зависимости этих характеристик от переносимого катодным пятном тока и от длины вакуумной дуги.
4. Выполнены измерения угла Робсона на катодах из Cu, CuCr30, Mo и W. Впервые обнаружена зависимость угла Робсона от длины вакуумной дуги.
5. Определено направление распространения плазменной струи катодного пятна во внешнем магнитном поле. Установлено, что уже в относительно небольших полях ( $B \geq 0,1$  Тл) плазменная струя катодного пятна разворачивается вдоль направления внешнего магнитного поля на небольшом ( $\sim 1$  мм) расстоянии от поверхности катода.
6. С помощью спектроскопических измерений изучена форма свободногорящей плазменной струи и плазменной струи, стабилизированной аксиальным магнитным полем при  $B_n \leq 0,2$  Тл. Исследован результат взаимодействия плазменной струи с поверхностью анода.

### **Практическая значимость работы.**

Большинство полученных в работе результатов являются новыми и представляют интерес с точки зрения физической электроники и физики дугового вакуумного разряда. Они могут быть использованы для моделирования движения катодного пятна в различных разрядных устройствах, а также при выборе оптимальной конфигурации магнитного поля, контролирующего динамику катодного пятна в установках для напыления различных покрытий с помощью вакуумной дуги, и в вакуумной коммутационной аппаратуре (дугогасительных камерах). Знание свойств катодных пятен на разных металлах могут быть использованы при разработке новых электродных материалов.

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Впервые определены средние токи на катодное пятно  $I_s$  в магнитных полях, наклонных к поверхности катода. Показано, что зависимость  $I_s$  от магнитного поля существенна лишь при превышении некоторого критического значения угла наклона поля к нормали к поверхности катода  $\alpha^*$ , который определяется материалом катода. При  $\alpha > \alpha^*$  наблюдается сильная зависимость  $I_s$  от угла наклона поля, но зависимость от амплитуды магнитного поля  $|B|$  остаётся слабой. Амплитуда поля начинает оказывать сильное влияние при  $\alpha \rightarrow \pi/2$  ( $B_t/B_n \gg 1$ ). Обнаружено, что  $I_s$  зависит от длины межэлектродного промежутка  $h$ .
2. Впервые определены напряжения горения слаботочной вакуумной дуги в наклонных к катоду магнитных полях. Обнаружено, что зависимости напряжения дуги от индукции аксиального магнитного поля  $B_n$  при различных величинах тангенциального поля  $B_t$  имеют V-образную форму и сходятся к кривой, полученной при  $B_t = 0$ , при соотношении  $B_n / B_t \approx 1,5$  для катодов из меди и  $B_n / B_t \approx 3,5$  для катодов из CuCr30.
3. Проведены измерения скоростей движения катодного пятна в вакуумных дугах с катодами из Cu, CuCr30, Mo и W в магнитных полях различной ориентации при различных токах в пятне и длинах дуги. Полученные результаты существенно дополняют имеющиеся в литературе данные.
4. Впервые обнаружено, что соотношение между углом Робсона и углом наклона магнитного поля к поверхности катода зависит от величины межэлектродного промежутка. Зависимость от материала катода слабая.
5. Плазменная струя катодного пятна разворачивается по направлению линий магнитного поля, начиная с небольшого расстояния от катода. При полях  $B_n = 0,1$  Тл,  $B_t = 0,05$  Тл оно составляет  $Z_B \sim 1$  мм.
6. Плазменная струя катодного пятна в свободно горящей вакуумной дуге распространяется в конус с углом  $\approx 100^\circ$ . Под воздействием аксиального магнитного поля плазменная струя приобретает форму цилиндра радиусом  $\approx 1$  мм уже при воздействии аксиального поля с индукцией  $B_n \leq 0,05$  Тл.
7. В вакуумной дуге есть два основных источника атомов – поверхность катода (испарение с перегретой части поверхности вблизи работающего катодного пятна и с остывающих следов погасших пятен) и поверхность анода (эмиссия с части поверхности, подверженной бомбардировке быстрыми ионами плазменной струи катодного пятна.). При проникновении в межэлектродный промежуток атомы ионизируются на малых расстояниях от электродов.

**Достоверность результатов.**

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, определяется комплексным использованием различных экспериментальных методик, таких как высокоскоростное фотографирование с последующей компьютерной обработкой полученных результатов, эмиссионная спектроскопия с пространственным и временным разрешением. При этом измерения в выбранных режимах производились многократно и все представленные в диссертации результаты получены путём статистической обработки измерений. Достоверность

также подтверждается тем, что использованные в работе методы в тех режимах, которые ранее были исследованы, дают результаты, согласующиеся с имеющимися в литературе.

### **Апробация работы и публикации.**

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах и конкурсах в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, всероссийских и международных конференциях, в том числе:

Всероссийские конференции по физике низкотемпературной плазмы

1. ФНТП-2004 (Петрозаводск);
2. ФНТП-2007 (Петрозаводск);

International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (Международный Симпозиум по Разрядам и Электрической Изоляции в Вакууме)

3. XXI, Ukraine, 2004;
4. XXII, Japan, 2006;
5. XXIII, Romania, 2008;
6. XXIV, Germany, 2010;
7. XXV, Россия, 2012;
8. XXVI, India, 2014.

Материалы диссертации опубликованы в 18 печатных работах, из них 8 – статьи в рецензируемых журналах и 10 докладов в трудах конференций.

### **Личный вклад автора.**

Результаты экспериментального исследования получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор занимался разработкой и созданием экспериментальной установки. Обработка экспериментальных данных проведена лично автором и совместно с соавторами. Автор совместно с руководителем участвовал в постановке задачи и обсуждении результатов работы. Основные положения, выносимые на защиту, сформулированы лично автором диссертации.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 128 страниц, включая 55 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 124 наименований.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования. Выбран объект исследования. Обозначены цели и задачи исследования. Показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Приводятся положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен краткий обзор литературы, в котором выполнен анализ современных представлений о процессах поджига и горения КПВД и о воздействии магнитных полей на эти процессы.

В разделе I.2 обзора приведены современные представления о процессе зарождения КП благодаря взрывной электронной эмиссии на поверхности электрода после приложения к межэлектродному промежутку высокого напряжения и дальнейшего развития разряда через искровую стадию в дугу.

В разделе I.3 обзора описываются виды КП в зависимости от состояния поверхности катода - так называемые пятна первого и второго рода. Как уже было отмечено, настоящая работа посвящена исследованию характеристик пятен второго рода.

В разделе I.4 обзора описывается движение КП. Подробно описано движение КП в свободноточащих дугах и закономерности «обратного» движения КП под действием наложенного на дугу тангенциального поля. Проанализированы имеющиеся в литературе данные по измерению так называемого угла Робсона.

В разделе I.5 обзора рассмотрены известные результаты измерения напряжения горения ВД в зависимости от тока и от наложенных на дугу магнитных полей.

В разделе I.6 обзора обсуждаются результаты исследования одного из важных параметров, характеризующих КП, - среднего тока, пропускаемого КП, на разных материалах.

В разделе I.7 обзора описаны эрозионные процессы, происходящие в КП. Проанализированы имеющиеся в литературе результаты исследования ПС, испускаемой КП, и эмитируемых КП капель.

В разделе I.8 обзора описываются известные результаты по исследованию воздействия магнитного поля на ПС КП.

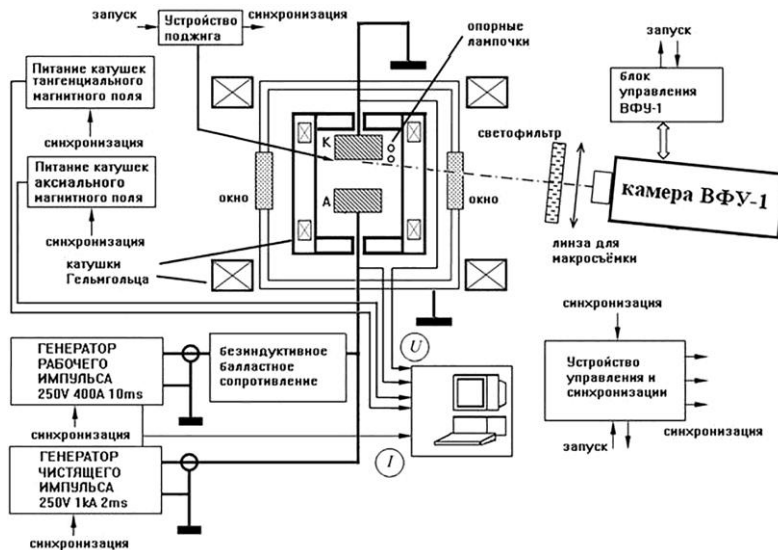
Анализ литературы показал, что воздействие магнитных полей на слаботочную ВД и на её привязку к катоду – КП – изучено недостаточно и позволил выявить конкретные пробелы существующих знаний. Совершенно недостаточно изучены представляющие большой интерес для различных приложений результаты воздействия на КП и генерируемую им ПС наклонных к поверхности катода магнитных полей.

**Во второй главе** дано описание конструкции двух экспериментальных установок, использовавшихся для проведения работы, а также описана и обоснована методика определения направления распространения ПС КП в наклонённом к поверхности катода магнитном поле.

В разделе II.1. описана установка для определения динамических характеристик КП и напряжения горения ВД с одиночным КП в магнитных полях различной ориентации, которая была специально разработана и изготовлена под данную задачу. На установке проводились электрические измерения и высокоскоростное фотографирование катодной привязки дуги (КП).

Блок-схема этой экспериментальной установки представлена на Рисунке 1. В камере достигалось давление  $p \approx 10^{-4}$  Па. Использовались цилиндрические электроды диаметром 30 мм с накладками на торцевой поверхности из исследуемого материала (бескислородная медь, композиция CuCr, молибден или вольфрам). Межэлектродный промежуток мог изменяться в диапазоне  $h = 0 - 12$  мм. Аксиальное и тангенциальные магнитные поля создавались парами катушек Гельмгольца, находящихся вне и внутри камеры. Величину обоих компонент магнитных полей можно было регулировать независимо в пределах  $B_n = 0 - 0,4$  Тл. Разряд поджигался с некоторой задержкой после подачи питания в катушки. Длительность задержки подбиралась такой, чтобы обеспечить установление магнитного поля в межэлектродном



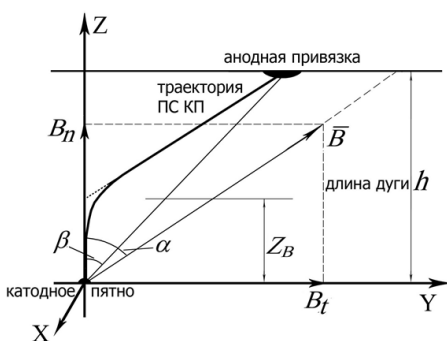


**Рисунок 1.** Блок-схема экспериментальной установки для исследования динамических характеристик КП и напряжения горения дуги в магнитных полях различной ориентации.

промежутке. Это обеспечивало горение разряда в однородном квазистационарном магнитном поле. Источник тока, использовавшийся для питания ВД, позволял генерировать прямоугольный импульс тока, величиной до  $I = 300$  А и длительностью до  $t = 10$  мс. Поджиг дуги производился на заземленном катоде путём размыкания контакта во вспомогательной цепи катод – молибденовая игла. Очистка рабочей поверхности электродов осуществлялась с помощью сильноточной ВД, для питания которой использовался отдельный источник, генерировавший чистящий импульс тока амплитудой  $\sim 1$  кА. Для фотографирования использовалась высокоскоростная фотографическая установка ВФУ-1. Результаты фотографирования после проявки оцифровывались и вводились в компьютер. Специальная программа позволяла определить местонахождение КП на электроде. Пространственное разрешение оценивалось как 0,25 мм. В ряде недавних экспериментов съёмка ВД проводилась при помощи высокоскоростной видеокамеры Phantom MiGo M310. Скорость съёмки составляла 29000 кадров/с.

В разделе II.2. обсуждается методика определения направления распространения ПС в наклонном магнитном поле, а также модернизация экспериментальной установки, описанной в разделе II.1. и контрольные измерения по разработанной методике.

В разделе II.2.1 изложена и обоснована методика определения направления распространения ПС с помощью высокоскоростного фотографирования. Суть метода помогает понять Рисунок 2. Из результатов работы [22] следует, что траектория ПС лежит практически полностью в плоскости (на Рисунке 2 это плоскость Z,Y). Траектория может быть разделена на две основные части. Действительно, в основании ПС КП плазма в ПС настолько плотная, что замагнитить её полем с индукцией даже  $\sim 1$  Тл невозможно. Ускорение плазмы ПС до высоких



**Рисунок 2.** Схематичное изображение ПС КП в наклонном к катоду магнитном поле.

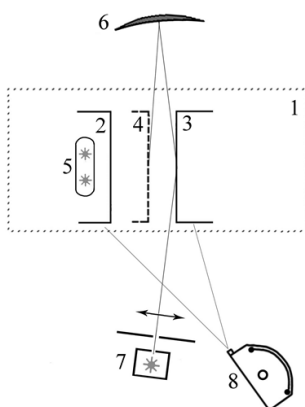
скоростей происходит как раз в этой области, где плотность плазмы чрезвычайно высока. Потому из КП вылетает ПС, которая, не смотря на наличие поперечного магнитного поля, некоторое расстояние пролетает по направлению нормали к поверхности катода. По мере удаления от катода

концентрация в ПС быстро падает вследствие расширения и ускорения ПС. Кроме того, плазма остывает. На расстоянии  $\sim 10^{-1}$  см от катода концентрация плазмы падает настолько, что она может быть сильно замагничена ( $\omega_e \tau_e \gg 1$ ) относительно небольшим полем. ПС с сильно замагниченной плазмой должна распространяться вдоль направления магнитного поля. Таким образом, траектория ПС (канал дуги) должен иметь два основных участка. На начальном, относительно коротком участке ПС распространяется нормально к катоду. На втором участке, на некотором удалении от катода ПС распространяется по направлению, заданному силовыми линиями магнитного поля. Определив в эксперименте одновременно положение обеих привязок дуги к электродам, можно достаточно просто определить расстояние от катода  $Z_B$ , на котором происходит поворот ПС на направление, задаваемое направлением поля. Действительно, из Рисунка 2 видно, что зная угол наклона магнитного поля  $\alpha$ , длину межэлектродного промежутка  $h$  и, определив из эксперимента угол наклона отрезка, соединяющего привязки дуги к электродам  $\beta$ , можно с помощью простого соотношения вычислить  $Z_B = h \cdot (1 - \operatorname{tg}\beta / \operatorname{tg}\alpha)$ .

Для одновременного определения положения катодной и анодной привязок была модернизирована существовавшая экспериментальная установка. Было предложено одновременно фотографировать поверхность анода и действительное изображение поверхности катода, созданное сферическим зеркалом, расположенным вне вакуумной камеры.

В разделе П.2.2 описаны модернизация установки и контрольные измерения. Для определения направления распространения ПСКП использовалась та же вакуумная камера, разрядный узел и источники питания, что и при исследовании динамических характеристик КП. Ток дуги устанавливался  $I = 65$  А. Магнитные поля (нормальное и тангенциальное) устанавливались в пределах от 0 до 0,2 Тл. Использовались цилиндрические электроды из бескислородной меди диаметром 30 мм. С помощью сферического зеркала, расположенного вне разрядной камеры вблизи смотрового окна, противоположного тому, через которое велось фотографирование, в межэлектродном промежутке создавалось действительное изображение рабочей поверхности катода (Рисунок 3). Рабочая поверхность катода в момент фотографирования освещалась при помощи вспышки «Луч М1». В результате мы получаем возможность одновременной съёмки поверхностей анода и действительного изображения поверхности катода.

Для проверки работоспособности разработанного метода и определения его ошибок, были выполнены многократные измерения дуги, помещённой в АМП, т.е. дуги, не имеющей наклона к оси разрядной системы. Эксперимент позволил обнаружить искажения при

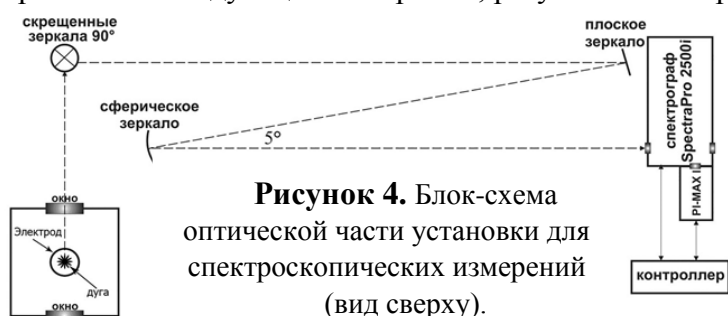


**Рисунок 3.** Блок-схема оптической части установки для определения направления распространения ПСКП.

1 – вакуумная камера; 2 – анод; 3 – катод; 4 – действительное изображение катода; 5 – опорные лампочки; 6 – сферическое зеркало; 7 – фотовспышка для освещения катода; 8 – ВФУ-1.

фотографировании электродов и предложить методы корректировки этих искажений. Искажения появляются из-за того, что мы вынуждены были работать с широкими световыми пучками, а также из-за того, что плоскости электродов расположены не перпендикулярно к оптическим осям сферического зеркала и ВФУ

(Рисунок 3), и, следовательно, разные участки электродов находятся на различных расстояниях от фокальной плоскости и имеют различные увеличения. Контрольные измерения позволили также обнаружить систематическую ошибку при определении угла  $\beta$ , которая была учтена при обработке последующих измерений, результаты которых изложены в следующей главе.



**Рисунок 4.** Блок-схема оптической части установки для спектроскопических измерений (вид сверху).

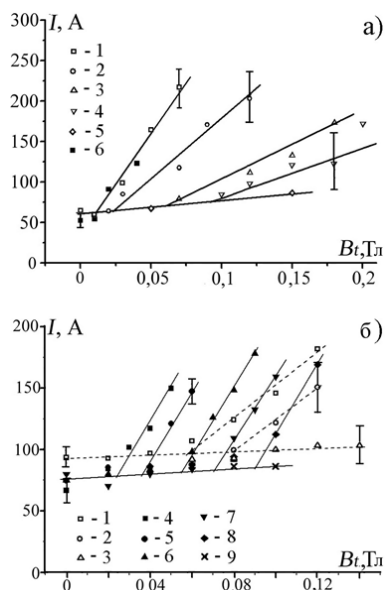
В разделе II.3. описана установка для спектроскопических измерений и методика эксперимента. С помощью спектроскопических измерений проводились исследования ПС КП, находящейся под действием АМП. Экспериментальная установка

принципиально устроена так же, как и установка, описанная ранее. На камеру были установлены смотровые кварцевые окна. Использовались торцевые цилиндрические электроды диаметром  $D = 30$  мм из бескислородной меди. Ось электродов была размещена вертикально. Межэлектродный промежуток  $h$  составлял 4 и 8 мм. Дуга питалась прямоугольными импульсами тока амплитудой 60 А и длительностью  $\tau \approx 4$  мс. На камеру была одета пара катушек Гельмгольца, генерировавшая АМП с индукцией до  $B \leq 0,4$  Тл. Оптическая схема установки показана на Рисунке 4. Излучение регистрировалось

спектрографом SpectraPro 2500i с приёмной камерой серии PI-MAX производства Princeton Instruments. Изображение на входной щели спектрографа формировалось с помощью системы зеркал. Изображение ПС, ось которой ориентирована вертикально, разворачивалось с помощью скрещенных зеркал на  $90^\circ$  и фокусировалась поперёк входной щели спектрографа с помощью сферического зеркала. Увеличение системы зеркал было 0,3. Пространственное разрешение оптической системы оценивалось как 0,25 мм, апертура – 1/30. Ширина входной щели спектрографа была 75 мкм, что позволяло иметь спектральное разрешение не хуже 0,15 нм. Измерения проводились на различных расстояниях  $z$  от катода при различных величинах индукции АМП. Измерялись радиальное распределение интенсивности спектральных линий различных ионизационных состояний меди в диапазоне  $\Delta\lambda = 275 - 285$  нм, где находятся четыре достаточно интенсивные линии трех ионизационных состояний: атома – CuI ( $\lambda = 282,44$  нм), однократного иона – CuII ( $\lambda = 276,96$  нм и  $\lambda = 283,74$  нм) и двукратного иона – CuIII ( $\lambda = 281,3$  нм).

**В третьей главе** приводятся результаты исследований и их обсуждение.

В разделе III.1 приведены результаты определения среднего тока, пропускаемого КП в зависимости от комбинации приложенных магнитных полей. В результате обработки фотографий установлено, что количество КП в свободногорящей ВД при фиксированном токе хорошо аппроксимируется нормальным распределением. Параметры распределений сильно зависят от материала катода. При наложении магнитного поля распределения количества пятен остаются нормальными, но параметры распределений зависят от магнитного поля. Зависимость от магнитного поля существенна лишь при превышении некоторого критического значения угла наклона поля к нормали к поверхности катода  $\alpha^*$ , который определяется материалом катода и составляет  $\alpha^* \approx 45^\circ$  (для электродов из CuCr30) и  $\alpha^* \approx 30^\circ$  (для электродов из меди). При  $\alpha > \alpha^*$  наблюдается сильная зависимость параметров распределения, а, значит, и среднего



**Рисунок 5.** Зависимость среднего тока, пропускаемого КП, от магнитного поля.

а) Молибденовый катод. 1 – 5:  $h = 2$  мм; 6:  $h = 6$  мм. 1 –  $B_n = 0$ ; 2 –  $B_n = 0,025$  Тл; 3 –  $B_n = 0,05$  Тл; 4 –  $B_n = 0,075$  Тл; 5 –  $B_n = 0,1$  Тл; 6 –  $B_n = 0$ .

б) Вольфрамовый катод. 1 – 3:  $h = 2$  мм; 4 – 9:  $h = 6$  мм. 1 –  $B_n = 0$ ; 2 –  $B_n = 0,025$  Тл; 3 –  $B_n = 0,05$  Тл; 4 –  $B_n = 0$ ; 5 –  $B_n = 0,025$  Тл; 6 –  $B_n = 0,05$  Тл; 7 –  $B_n = 0,75$  Тл; 8 –  $B_n = 0,1$  Тл; 9 –  $B_n = 0,12$  Тл.

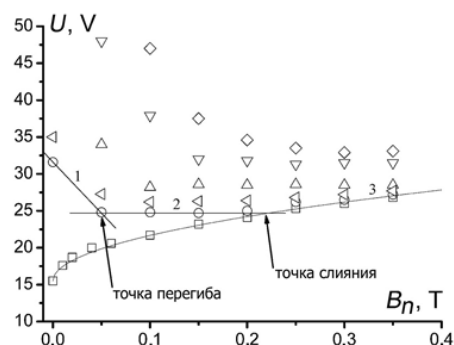
наклону к поверхности катода магнитных полей качественно выглядят так же, как и распределения для меди и медь-хромовой композиции. Как и для катодов из меди и CuCr30 при  $\alpha < \alpha^*$  средний ток слабо зависит от магнитного поля:  $I_s \approx I_{s0}$ . В экспериментах с катодами из Мо и W впервые было обнаружено, что средний ток, пропускаемый КП,  $I_s$  зависит не только от величины магнитного поля и его наклона, но и от длины межэлектродного промежутка  $h$  (Рисунок 5). Зависимость среднего тока от наклона магнитного поля ранее не была исследована.

В разделе III.2. представлены результаты исследования зависимости напряжения горения дуги от приложенного магнитного поля. Измерения были проведены в дугах с катодами из меди и медь-хромовой композиции. Получены зависимости средних напряжений горения дуги  $U$  (при фиксированном токе) от амплитуды вектора индукции нормального магнитного поля. Все полученные зависимости удовлетворительно аппроксимируются корневыми функциями. Было обнаружено, что зависимости  $U(B_n)$  при отличных от нуля значениях тангенциальной компоненты магнитного поля имеют характерную V-образную форму. Полученные V-образные кривые отчетливо разбиваются на три участка (Рисунок 6). Участок 1 характеризуется быстрым спадом напряжения по мере увеличения аксиальной компоненты наложенного на дугу магнитного поля.

Участок 2 плоский, напряжение на нём не меняется. На участке 3 наблюдается медленный рост напряжения. Переходные области между указанными участками, по сравнению с протяжённостью самих участков, относительно невелики. Переход от одного участка к другому происходит при определённых значениях угла наклона магнитного поля  $\alpha$ . Переход от участка 1 к участку 2 происходит при  $\alpha_1 \approx 45^\circ$ , который не зависит от материала электрода. Переход от участка 2 к участку 3 происходит при  $\alpha_2 \approx 15^\circ$  в дугах с катодом из CuCr30 и при

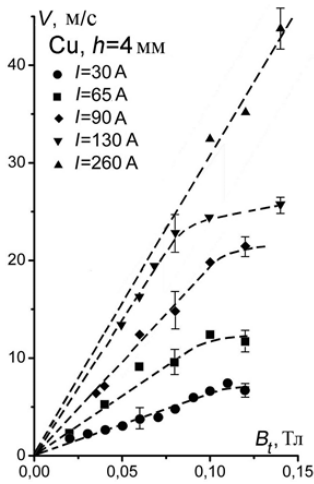
по распределению тока, пропускаемого КП, от угла наклона поля, но зависимость от амплитуды магнитного поля  $|B|$  остаётся слабой. Амплитуда поля начинает оказывать сильное влияние на распределение при  $\alpha \rightarrow \pi/2$  ( $B_t/B_n \gg 1$ ).

Средние значения тока, пропускаемого КП,  $I_s$  для тугоплавких металлов Мо и W при воздействии различных по величине и



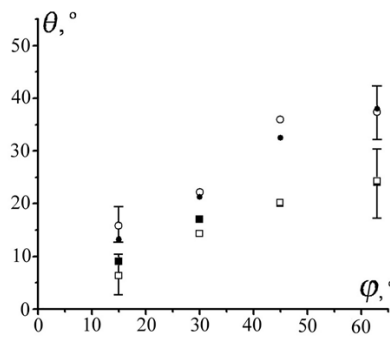
**Рисунок 6.** Зависимость напряжения на дуге от  $B_n$  при различных  $B_t$ .

CuCr30;  $h = 4$  мм;  $I = 30$  А:  
 $\square$  –  $B_t = 0$ ;  $\circ$  –  $B_t = 0,05$  Тл;  $\triangleleft$  –  $B_t = 0,07$  Тл;  $\triangle$  –  $B_t = 0,1$  Тл;  
 $\nabla$  –  $B_t = 0,2$  Тл;  $\diamond$  –  $B_t = 0,25$  Тл.  
 1 – участок 1; 2 – участок 2;  
 3 – участок 3.



**Рисунок 7.** Скорость ретроградного движения КП в тангенциальном магнитном поле на эродированной поверхности для разных токов. Медный катод.  $h = 4$  мм.

Скорость КП также зависит от стабильности горения дуги. В магнитных полях, индукция которых превышает  $B_0$ , зависимость скорости КП от поля насыщается. Величина  $B_0$  определяется материалом катода. В качестве примера на Рисунке 7 приведены результаты, полученные при разных токах на медном катоде. Видно, что при токе, вдвое превосходящем средний ток на пятно  $I_s$ , зависимость скорости от тока насыщается. Эти закономерности были известны и ранее [23], однако систематические измерения для целого ряда материалов в широком диапазоне изменения различных параметров выполнены в настоящей работе впервые.



**Рисунок 8.** Зависимость угла Робсона от угла наклона магнитного

поля. Заполненные символы – молибденовый катод, пустые символы – вольфрамовый катод. Кружки –  $h = 6$  мм, квадраты –  $h = 2$  мм.

$B_n$ , Т	$B_t$ , Т	$\alpha$ , град.	$Z_{B, мм}^{расч.}$	$Z_{B, мм}^{эксп.}$
0,1	0,1	45	1,4	0,8
	0,05	26,6	2,9	0,9
0,05	0,05	45	–	1,1
	0,025	26,6	–	1,5

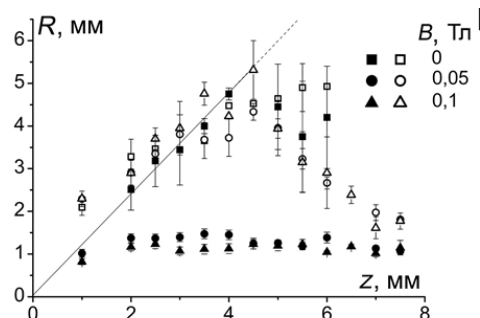
**Таблица 1.** Сравнение расчетов [24] и экспериментальных результатов.

$\alpha_2 \approx 30^\circ$  в дугах с катодом из Cu. Эти характерные значения  $\alpha$  слабо зависят от длины дуги и тока.

В разделе III.3 приведены результаты определения динамических характеристик КП. Измерения в тангенциальных магнитных полях показали, что на катодах из всех исследованных материалов в некотором диапазоне значений индукции магнитного поля  $0 < B_t < B_0$  скорость КП линейно зависит от  $B_t$ :  $V = k \cdot B_t$ . Коэффициент пропорциональности  $k$  зависит от тока дуги, её длины и степени эрозии поверхности катода.

Обнаружено, что наклон магнитного поля к поверхности катода незначительно влияет на абсолютное значение вектора скорости КП. Однако, как было известно и ранее, на направление движения КП влияние угла наклона поля  $\varphi$  значительно. Движение КП под действием наклонного поля происходит по направлению, которое составляет некоторый угол  $\theta$  (называемый углом Робсона) с направлением ретроградного движения. Впервые было обнаружено, что соотношение между углами  $\varphi$  и  $\theta$  существенно зависит от длины межэлектродного промежутка (Рисунок 8). Соотношение между углами  $\varphi$  и  $\theta$  зависит также и от материала катода, однако, эта зависимость несильная.

В разделе III.4 третьей главы приведены результаты определения направления распространения ПС КП в зависимости от магнитного поля. Впервые экспериментально определено расстояние от поверхности катода, на котором ПС КП поворачивает по направлению внешнего магнитного поля. Видно, что поворот происходит на сравнительно небольшом расстоянии (Таблица 1) от поверхности катода, даже при умеренных значениях индукции магнитного поля (в частности, при  $B_n = 0,1$  Тл,  $B_t = 0,05$  Тл расстояние, которое струя пройдет по нормали к катоду,  $Z_B < 1$  мм). Сравнение результатов измерения с результатами расчёта разворота ПС, выполненными в работе [24], показывает, что эти результаты

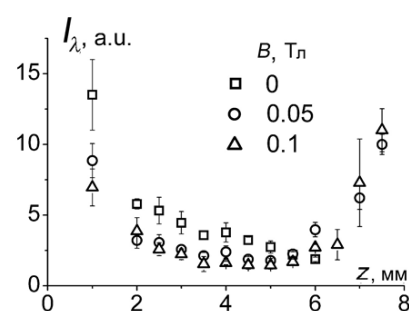


**Рисунок 9.** Полуширины распределений интенсивности излучения  $R$  в зависимости от расстояния от катода при различных значениях АМП для различных ионизационных состояний меди,  $h = 8$  мм. Пустые символы – CuI; заполненные символы – CuII.

находятся в качественном согласии с результатами расчета, однако расчеты систематически переоценивают расстояние, на котором струя поворачивает вдоль линий поля.

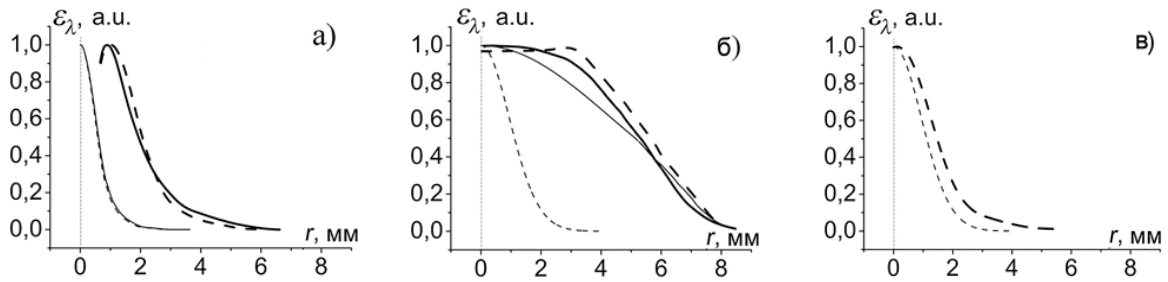
В разделе III.5 приведены результаты спектроскопических исследований ПС КП. Следуя результатам работы [25] будем считать, что размер зоны светимости иона (CuII) определяет размер зоны проводимости канала ВД. Полученные результаты показывают, что в свободно горящей ВД несущая ток ПС, истекающая из КП, распространяется в конусе с углом при вершине  $\sim 100^\circ$ . При воздействии на ВД АМП с индукцией  $B \geq 0,02$  Тл форма ПС меняется и, начиная с расстояния от катода  $z = (1 - 2)$  мм, струя приобретает форму цилиндра, которую сохраняет на всей длине вплоть до анода. При  $B=0,05$  Тл радиус цилиндра примерно 1 мм (Рисунок 9; Полуширина – половина ширины на уровне половины амплитуды). Этот результат находится в удовлетворительном согласии с расчётами, выполненными в работе [26].

Интересные результаты получены при исследовании излучения атомной компоненты. Из Рисунка 10 видно, что атом сильно излучает вблизи катода. В свободногорящей ВД по мере удаления от катода интенсивность излучения атома быстро уменьшается и тонет в шумах. Однако в дуге, стабилизированной АМП, когда ПС КП приобретает форму цилиндра, интенсивность излучения атома возрастает в окрестности анода, достигая максимума вблизи его поверхности. При этом полуширина распределения интенсивности свечения атома практически совпадает с полушириной свечения иона (Рисунок 9).



**Рисунок 10.** Осевое распределение интенсивностей атомной линии.

Абелевская инверсия радиального распределений интенсивности излучения позволила определить радиальное распределение эмиссионного коэффициента  $\varepsilon_\lambda(r)$  атомов и ионов (Рисунок 11). Из Рисунка 11 видно, что радиальные распределения  $\varepsilon_\lambda(r)$  иона достигают максимума на оси ПС во всём промежутке, в то время, как радиальные распределения  $\varepsilon_\lambda(r)$  атома вблизи катода имеет вне осевые максимумы. Это значит, что вблизи катода ПС КП практически полностью ионизована, концентрация атомов вблизи оси низкая. Излучение атома приходит с периферии, т.е. вблизи катода ПС окружена «шубой» слабоионизованной плазмы. Возможным источником плазмообразующего вещества для слабо ионизированной «шубы», окружающей токовый канал ВД, является перегретая часть поверхности катода вблизи КП и остывающие следы погасших КП [27]. Из рисунка так же видно, что в дуге, находящейся под действием АМП, при приближении к аноду полуширина радиального распределения  $\varepsilon_\lambda(r)$  атома несильно отличается от полуширины радиального распределения  $\varepsilon_\lambda(r)$  иона. Сопоставляя результаты, приведённые на Рисунках 10 и 11, можно сделать вывод, что, часть поверхности анода, которая



**Рисунок 11.** Радиальное распределение эмиссионных коэффициентов CuI (толстые линии) и CuII (тонкие линии).

a)  $z = 1$  мм; б)  $z = 4,5$  мм; в)  $z = 7,5$  мм.

контактирует с ПС КП, а, значит, подвергается бомбардировке быстрыми катодными ионами, становится источником потока атомов. Быстрый спад интенсивности излучения атома при удалении от анода является следствием «выгорания» (ионизации) эмитированных атомов. Ранее эмиссия атомов с поверхности анода в ВД была обнаружена в [28].

**В заключении** сформулированы основные результаты работы. В соответствии с поставленной целью в работе было изучено влияние магнитных полей различной ориентации на динамические характеристики КП, средний ток, пропускаемый КП, напряжение горения слаботочной ВД и направление распространения ПС КП на электродах из различных материалов в различных межэлектродных промежутках. Кроме того, была изучена форма ПС в свободно горящей и в стабилизированной АМП дуге.

Для проведения работы была создана экспериментальная установка, позволяющая проводить исследование ВД при непрерывной откачке при давлении  $p \approx 10^{-4}$  Па и лучше. В установке было возможно исследовать дугу при питании прямоугольным импульсом тока с амплитудой до 300 А на цилиндрических электродах диаметром до 30 мм. На дугу возможно было накладывать магнитное поле в двух взаимно перпендикулярных направлениях (аксиальное и тангенциальное) с индукцией до 0,4 Тл. С помощью специального источника тока была обеспечена дуговая очистка электродов.

Для экспериментов по исследованию направления распространения ПСКП в магнитных полях различной ориентации использовалась та же вакуумная камера, разрядный узел и источники питания, что и при исследовании динамических характеристик КП. Однако для обеспечения возможности фотографирования поверхностей обоих электродов одновременно оптическая часть установки была модернизирована. Из полученных фотографий были получены положения привязок дуги на обоих электродах в один и тот же момент времени и далее определено направление распространения ПС. Для проведения спектроскопических исследований была использована другая, ранее созданная в лаборатории установка, в которую были внесены некоторые изменения.

В результате работы удалось определить следующее:

1. На катодах из меди и CuCr30 при фиксированном токе во всём исследованном диапазоне изменения результирующего магнитного поля количество КП в привязке ВД распределено по нормальному закону. Обнаружена существенная зависимость параметров распределений от материала катода.

2. Зависимость параметров распределений от магнитного поля наблюдается только при превышении некоторого значения угла наклона поля к нормали к поверхности катода. Из полученных данных были определены средние токи, пропускаемые КП в магнитных полях различной ориентации.
3. В экспериментах с катодами из Мо и W было обнаружено, что средний ток, пропускаемый КП, зависит не только от величины магнитного поля и его наклона, а также от длины межэлектродного промежутка.
4. Зависимость среднего напряжения на дуге от величины нормального магнитного поля при фиксированном значении тангенциального поля имеет характерную V-образную форму.
5. Скорость ретроградного движения КП на катодах из Cu, CuCr, W и Mo в некотором диапазоне значений тангенциального магнитного поля  $0 < B_t < B_0$  линейно зависит от индукции поля. Коэффициент пропорциональности зависит от тока дуги, длины дуги и степени эрозии поверхности. В магнитных полях, индукция которых превышает  $B_0$ , зависимость скорости КП от поля насыщается. Значение  $B_0$  определяется материалом катода.
6. Соотношение между углами  $\varphi$  (угол наклона магнитного поля к поверхности катода) и  $\theta$  (угол Робсона) существенно зависит от длины межэлектродного промежутка, зависимость от материала катода несильная.
7. ПС КП поворачивает по направлению внешнего магнитного поля на сравнительно небольшом расстоянии от поверхности катода даже при умеренных значениях индукции магнитного поля. Для  $B_n = 0,1$  Тл,  $B_t = 0,05$  Тл расстояние, которое струя пройдет по нормали к катоду  $< 1$  мм.
8. ПС, истекающая из КП в свободно горящей дуге, распространяется в конус с углом  $\sim 100$  градусов. Под воздействием АМП на расстояния от катода  $z = (1-2)$  мм струя приобретает форму цилиндра радиусом  $\sim 1$  мм уже при воздействии АМП с индукцией  $B_n \approx 0,05$  Тл.
9. Плазма в ПС КП практически полностью ионизована, концентрация атомов низкая. Вблизи катода ПС окружена «шубой» слабоионизованной плазмы. Анод является источником атомной струи, истекающей с его поверхности в межэлектродный промежуток. Эмиссия атомов с анода происходит вследствие бомбардировки поверхности анода быстрыми ионами ПС КП. При попадании в плазму эти атомы быстро ионизируются.

Большинство изложенных в данной работе результатов являются новыми и представляют интерес с точки зрения физической электроники и физики дугового вакуумного разряда. Результаты могут быть использованы для моделирования движения КП, а также при выборе оптимальной конфигурации магнитного поля, для контроля динамики КП в различных разрядных устройствах. Разносторонние измерения свойств КП на разных металлах могут быть использованы при разработке новых электродных материалов.

### Литература

1. Вакуумные дуги. Теория и приложения. // Под ред. Дж. Лафферти., Москва: Мир, 1982, 432 с.
2. Батраков А.В., Юттнер Б., Попов С.А., Проскуровский Д.И., Фогель Н., Капельное пятно - новый объект в физике вакуумного разряда. // Письма в ЖЭТФ, 2002, т.75, вып.2, с.84-91.
3. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И., Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984, 295 с.



4. Juttner B., Puchkarev V. F., Hantzsch E., and Beilis I., Cathode spots in Handbook of Vacuum Arc Science and Technology. // Ed by Boxman R.L., Sanders D. M., and Martin P. J. Eds. Park Ridge, NJ: Noyes, 1995, pp.73–281.
5. Месяц Г.А., Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. Москва: Наука, 2000, 424 с.
6. Mesyats G.A., Ecton Mechanism of Cathode Spot Phenomena in a Vacuum Arc. // IEEE Trans. Plasma Sci., 2013, vol.41, №4, pp.676-694.
7. Chaly A.M., Logatchev A.A., Shkol'nik S.M., Cathode processes in free burning and stabilized by axial magnetic field vacuum arcs. // IEEE Trans. Plasma Sci., 1999, vol.27, №4, pp.827-835.
8. Любимов Г.А., Раховский В.И., Катодное пятно вакуумной дуги. // УФН, 1978, т.125, №4, с.665-714.
9. Djakov B.E., Holmes R., Cathode spot division in vacuum arcs with solid metal cathodes. // J. Phys. D: Appl. Phys., 1971, vol.4, pp.504-508.
10. Boxman R.L., Recent Developments in Vacuum Arc Deposition. // IEEE Trans. Plas. Sci., 2001, vol.29, №5, pp.762-767.
11. Oks E., Anders A., Brown I.G., Dickinson M.R., MacGill R.A., Ion charge state distribution in high current vacuum arc plasmas in a magnetic field. // IEEE Trans. Plasma Sci., 1996, vol.24, №3, pp.1174-1183.
12. Karpov D.A., Saksagansky G., Magnetically stabilized plasma sources of getter films. // Contrib. Plasma Phys., 1990, vol.30, №4, pp.523-545.
13. Karpov D.A., Nazikov S.N., Multicomponent electric-arc source of metallic plasma. // Plasma devices and operations, 1991, vol.1, pp.239-246.
14. Стрельницкий В.Е., Аксёнов И.И., Плёнки алмазоподобного углерода. Харьков: ИПП «Контраст», 2006, 344 с.
15. Chaly A.M., Magnetic Control of High Current Vacuum Arc With the Aid of an Axial Magnetic Field: A Review. // IEEE Trans. Plas. Sci., 2005, vol.33, №5, pp.1497-1503.
16. Chaly A.M., Logatchev A.A., Zabello K.K., Shkol'nik S.M., High-current vacuum arc appearance in nonhomogeneous axial magnetic field. // IEEE Trans. Plasma Sci., 2003, vol.31, №5, pp.884-889.
17. Shkol'nik S.M., Afanas`ev V.P., Barinov Y.A., Logatchev A.A., Zabello K.K., Chaly A.M., Malakhovsky S.I., Poluyanov I.N., Distribution of cathode current density and breaking, capacity of medium voltage vacuum interrupters with axial magnetic field. // IEEE Trans. Plasma Sci., 2005, vol.33, №5, pp.1511-1518.
18. Robson A.E., The motion of an arc in magnetic field. // in Proc. IV Int. Conf. Phen. Ionised Gases, Uppsala. 1959, vol.IIb. pp.346-349.
19. Juttner B., Cathode processes of electric discharge in vacuum. // Thesis B, Acad. Sci., Berlin, Germany, 1983.
20. Rondeel W.G.J.. The vacuum arc in an axial magnetic field, // J. Phys. D: Appl. Phys., 1975, vol.8., №8, pp.934-942.
21. Heberlein J.V.R., Porto D.R. The interaction of vacuum arc ion currents with axial magnetic fields. // IEEE Trans. Plasma Sci., 1983, vol.PS-11, №3. pp.152-159.

22. Баренгольц С.А., Месяц В.Г., Шмелев Д.Л., Влияние тангенциального магнитного поля на эктонные процессы в катодном пятне вакуумной дуги. // Письма в ЖТФ, 2010, т.36, вып.23, стр.91-97.
23. Олещук О.В., Брецких А.Ф., Сысун В.И., Динамика катодных пятен сильноточного импульсного разряда в аксиальном магнитном поле. // Известия Академии наук, Серия физическая, 1999, т.63, №11, с.2265-2268.
24. Michael Keidar, Eric D. Taylor, A Generalized Criterion of Transition to the Diffuse Column Vacuum Arc. // IEEE Trans. Plasma Sci., 2009, vol.37, №5, p.693-698.
25. Раховский В.И., Эрозия электродов в контрагированном разряде. // Изв. СО АН СССР Серия Технических наук, 1975, т.3, вып.1, стр.11-27.
26. Anan'in Yu., Afanas'ev V.P., Hydrodynamic model of plasma jet of cathode spot of vacuum arc in the presence of external axial magnetic field. // IEEE Trans. Plas. Sci. 2009, vol.37, №8, pp.1393-1397.
27. Eckhardt G., Interpretation of data on cathode erosion and efflux from cathode spots of vacuum arcs. // J. Appl. Phys., 1975, vol.46, №8, 3282-3285.
28. Logatchev A.A., Shkol'nik S.M, Spectroscopic investigation of translation motion characteristics of the heavy plasma component in a high-current vacuum arc. // in Proc. 17th Int. Conf. Elect. Cont., 1994, Nagoya, Japan, pp.907-914

#### **Публикации автора по теме диссертации**

##### ***-В российских и зарубежных рецензируемых журналах:***

1. Zabello K.K., Barinov Y.A., Chaly A.M., Logatchev A.A., Shkol'nik S.M., "Experimental study of cathode spot motion and burning voltage of low-current vacuum arc in magnetic field," IEEE Trans. Plasma Sci., 2005, vol. 33, №5, pp.1553-1559.
2. Chaly A.M., Logatchev A.A., Zabello K.K., Shkol'nik S.M., "Effect of amplitude and inclination of magnetic field on low-current vacuum arc," IEEE Trans. Plasma Sci., 2007, vol. 35, №4, pp.946-952.
3. Chaly A.M., Logatchev A.A., Taktarov R., Zabello K.K., Shkol'nik S.M., "Optical Investigation of the Plasma Jet of Vacuum-Arc Cathode Spot," IEEE Trans. PlasmaSci., 2009, vol.37, №8, pp.1426-1432.
4. Забелло К.К., Логачев А.А., Чалый А.М., Школьник С.М., "Характеристики статистического распределения тока, пропускаемого катодным пятном вакуумной дуги, в магнитных полях различной ориентации," ЖТФ, 2009, т.79, №6, стр.58-66.
5. Zabello K.K., Logatchev A.A., Taktarov R.A., Shkol'nik S.M., "Spectroscopic Studies of Low-Current (Single-Spot) Short Vacuum Arcs in Axial Magnetic Field," IEEE Trans. PlasmaSci., 2011, vol.39, №6, pp.1319-1323.
6. Забелло К.К., Чалый А.М., Школьник С.М., "Измерение угла Робсона в вакуумных дугах различной длины," Письма в журнал технической физики, 2013, т.39, №2, стр.44-51.
7. Chaly A.M., Barinov Y.A., Minaev V.S., Myatovich S.U., Zabello K.K., Shkol'nik S.M., "Characteristics of vacuum-arc cathode spots on the refractory metal electrodes," IEEE Trans. Plasma Sci., 2013, vol.41, №8, pp.1917-1922.

8. Zabello K.K., Myatovich S.U., Logatchev A.A., Shkol`nik S.M., "Influence of magnetic field on the direction of cathode spot plasma jet propagation," IEEE Trans. Plasma Sci., 2013, vol.41, №8, pp.1917-1922.

***-В трудах международных конференций:***

1. Zabello K.K., Barinov Y.A., Logatchev A.A., Shkol`nik S.M., "Cathode spot motion and burning voltage of low-current vacuum arc with electrodes of copper-chromium composition in magnetic field," Proceedings - XXIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV; 27 September - 1 October 2004; Yalta, vol.1, pp. 280-283.
2. К.К. Забелло, Ю.А. Баринов, А.А. Логачев, А.М. Чалый, С.М.Школьник, "Исследование слаботочной вакуумной дуги в магнитном поле", ФНТП-2004, Петрозаводск, том.2, стр. 52-57.
3. Chaly A.M., Logatchev A.A., Zabello K.K., Shkol`nik S.M., "Effect of amplitude and inclination of magnetic field on low-current vacuum arc," Proceedings -XXII International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV. 25–29 September, 2006, Matsue, Japan, vol.1, pp.313-316.
4. К.К. Забелло, А.А. Логачёв, А.М.Чалый, С.М.Школьник, "Влияние магнитного поля на ток, пропускаемый катодным пятном," ФНТП-2007, Петрозаводск, том.2, стр.53-57.
5. Chaly A.M., Logatchev A.A., Taktarov R., Zabello K.K., Shkol`nik S.M., "Optical investigation of vacuum arc cathode spot plasma jet in axial magnetic field," Proceedings -23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 23rd ISDEIV; ; 15-19 September 2008; Bucharest, vol1, pp.268-271.
6. Zabello K.K., Logatchev A.A., Taktarov R.A., Shkol`nik S.M., "Some results of the spectroscopic study of a low-current (single spot) short vacuum arc in an axial magnetic field," Proceedings -24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV 2010; 30 August - 3 September 2010; Braunschweig, pp.328-331.
7. Chaly A.M., Minaev V.S., Myatovich S.U., Zabello K.K., "Experimental study of a short low-current vacuum arc on the electrodes of refractory metal," Proceedings -24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV 2010; ; 30 August - 3 September 2010; Braunschweig, pp.316-319.
8. Chaly A.M., Barinov Yu.A., Zabello K.K., Shkol`nik S.M., "Comparison of the characteristics of vacuum arc cathode spots on the tungsten and the molybdenum electrodes," Proceedings -25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV 2012; ; 2-7 September 2012; Tomsk pp.349-352.
9. Zabello K.K., Myatovich S.U., Logachev A.A., Shkol`nik S.M., "Influence of magnetic field on direction of cathode spot plasma jet propagation," Proceedings -25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV 2012; 2-7 September 2012; Tomsk pp.277-280.
10. Chaly A.M., Zabello K.K., Shkol`nik S.M., Cathode Spot Velocity in Tangential Magnetic Field on Cathode of Copper-Chromium Composition in Vacuum. // in Proc. XXVI ISDEIV, Mumbai, India, 2014, vol.1, pp.229 - 232.