

На правах рукописи

Мельников Антон Дмитриевич

Исследование вакуумного дугового разряда с подогреваемым  
катодом на оксид-содержащих материалах и  
многокомпонентных смесях для задачи плазменной  
сепарации ОЯТ

Специальность 01.04.08 — физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель: Усманов Равиль Анатольевич  
кандидат физико-математических наук, ОИВТ  
РАН

Официальные оппоненты: Паперный Виктор Львович  
доктор физико-математических наук,  
профессор, Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Иркутский государственный университет»

Гаспарян Юрий Микаэлович  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный  
исследовательский ядерный университет  
«МИФИ»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт сильноточной  
электроники Сибирского отделения  
Российской академии наук

Защита состоится декабря 2023 г. в : часов на заседании диссертационного  
совета Д 002.110.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении  
науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук,  
расположенном по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОИВТ РАН

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
к.ф.-м.н.

Тимофеев А. В.

## **Общая характеристика работы**

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом. Источник плазмы на его основе рассматривается как способ конвертации в плазменное состояние металлических, оксидных и смесевых материалов для задачи плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Рассматриваются вопросы касающиеся условий реализации диффузного типа разряда, временной эволюции параметров генерируемой плазмы, роли теплофизических свойств материала катода и влияния внешнего магнитного поля на источник плазмы, а также ионного состава плазмы и других ее параметров в зависимости от режима разряда (тока, напряжения и температуры катода).

### **Актуальность темы исследования**

Актуальность представляемой квалификационной работы связана с тем, что работа относится к циклу исследований, направленному на развитие метода плазменной переработки ОЯТ. Актуальность проблемы переработки нарабатываемого ОЯТ и его рециркуляции подтверждается нацеленностью атомной энергетики на осуществление замкнутого топливного цикла, возрастающей экологической нагрузкой при захоронении ОЯТ и недостаточностью существующих темпов обращения с ОЯТ, что совокупно следует из докладов международных организаций относящихся к ядерной энергетике. Метод плазменной сепарации ОЯТ может стать альтернативой или дополнением к уже существующим и разрабатываемым методам переработки. Плазменный метод позволяет избежать появления значительного объема радиоактивных отходов, характерных для существующих методов, одновременно потенциально обеспечивая требуемую для промышленного применения производительность. С другой стороны, плазменный метод переработки может быть отнесен к высокотехнологичным, в виду сложности реализации и комплексности задачи, по этой причине неизбежен цикл исследований, подтверждающий целесообразность воплощения метода в индустриальном масштабе. Перевод ОЯТ в состояние низкотемпературной плазмы является одним из этапов предлагаемого метода. Источник плазмы, осуществляющий это может быть создан на основе диффузного вакуумного дугового разряда, так как в нем возможно удовлетворить требованиям метода: высокая степень ионизации выходного потока, однородность зарядового состава, производительность конвертации на уровне 100 г/ч. Диффузный тип вакуумного дугового разряда позволяет избежать появления капельной фракции эродирующего катода в генерируемом потоке, а возможность варьировать мощность подогрева катода позволяет контролировать ряд параметров генерируемой плазмы (энергию ионов, зарядовый состав, стабильность горения). Апробация такого источника требует

предварительного цикла исследований по конвертации материалов моделирующих ОЯТ в плазменное состояние, чему и посвящена данная работа.

С другой стороны, рассматривая историю исследований лабораторной плазмы можно заметить, что многие успехи ассоциированы с созданием новых методов генерации, позволявших создавать плазменную среду с новыми параметрами, определяющимися прикладными задачами будь то биологическое воздействие на живые ткани, генерация пучков многозарядных ионов или создание плазменных двигателей и др.. В контексте каждой прикладной задачи возникают и определенные инженерно-технические требования, реализация которых привела к имеющему сегодня место многообразию источников плазмы. Одним из методов генерации плазмы, позволяющим достичь новых характеристик плазменных систем, является вакуумный дуговой разряд с горячим катодом, который может быть основой для создания производительного источником плазмы, и благодаря внешнему подогреву катода, может быть использован для перевода в плазменное состояние как металлов, так и оксидов и их смесей. Помимо этого, полученные в работе данные могут быть востребованы при построении моделей привязки тока на катоде, т.к. в литературе имеет место недостаток данных о характеристиках катодных пятен на поверхностях неметаллических катодов.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Главной целью работы являлось экспериментальное исследование вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом для определения целесообразности его применения при создании источника плазмы сепарируемых веществ в рамках задачи плазменной сепарации ОЯТ. Последнее определяется возможностью реализации и длительного поддержания режимов разряда, в которых генерируется поток плазмы с высокой степенью ионизации, однородным зарядовым составом при отсутствии капельной фракции материала катода. Кроме того, источник плазмы должен осуществлять конвертацию в плазменное состояние как отдельных веществ (металлов или оксидов), так и их смесей, моделирующих ОЯТ.

Для достижения сформулированной цели были поставлены следующие задачи:

- Провести исследование параметров генерируемой плазмы и источника плазмы на основе вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом из материалов моделирующих ОЯТ, а именно ионного состава плазмы, температуры электронов, среднего заряда плазмы, напряжения разряда, стационарности горения в зависимости от тока разряда, температуры катода и времени эксперимента.

- Исследовать возможность реализации диффузного дугового разряда с многокомпонентным катодом, выделить роль состава катода и определить принципиальную реализуемость режимов разряда, удовлетворяющих требованиям технологии плазменной переработки ОЯТ.
- Адаптировать метод времяпролетной масс-спектрометрии и создать масс-анализатор с разрешающей способностью достаточной для исследования непрерывного потока плазмы из металлов и их оксидов, т.е. разрешающего массовые пики отстоящие на 16 а.е.м..
- Создать экспериментальный стенд для исследования вакуумного дугового разряда во внешнем аксиальном магнитном поле включающий: вакуумную систему, систему генерации магнитного поля, диагностический комплекс для измерения параметров плазмы, источник плазмы.

### **Научная новизна**

Научная новизна данной диссертационной работы, посвященной исследованию вакуумной дуги с горячим катодом, обосновывается рядом факторов:

Были *впервые* проведены экспериментальные исследования временной эволюции диффузного вакуумного разряда с расходуемым катодом из оксидного материала, а именно было установлено как меняется во времени напряжение разряда, зарядовый состав плазмы, концентрация ионов, сделаны выводы о возможности поддерживать стационарный режим горения дуги.

Получены *новые* экспериментальные данные о зависимости ионного состава плазмы диффузной вакуумной дуги для нескольких материалов катода ( $\text{CeO}_2$ ,  $\text{CeO}_2+\text{Cr}$ ,  $\text{TiO}_2+\text{Cr}$ ) от параметров разряда. В случае катода из диоксида церия измерены зависимости ионного состава от силы тока разряда, и показано, что температура катода слабо влияет на него в стационарных режимах разряда.

Были получены *новые* данные об условиях реализации диффузного типа вакуумной дуги с подогреваемым катодом. Во-первых, с катодом из оксид-содержащего материала, а именно диоксида церия. Во-вторых, с несколькими смесевыми катодами, состоящими из металла и оксида ( $\text{CeO}_2+\text{Cr}$ ,  $\text{TiO}_2+\text{Cr}$ ). Смеси отличались между собой атом-электронным соотношением. *Впервые* описаны контролируемые переходы между диффузной и контрагированной дугой.

Получены **новые** экспериментальные данные о параметрах вакуумного дугового разряда на смесевых катодах (ВАХ, баланс энергии на катоде, стационарность горения). Измерены средний заряд, состав и концентрация плазмы, температура электронов.

Была предложена **новая** схема времяпролетного масс-спектрометра, адаптирующая традиционные подходы, для исследования непрерывного потока плазмы тяжелых металлов и обеспечивающая достаточное для исследования металлов и их оксидов разрешение.

Предложена **новая** конфигурация источника плазмы на основе вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом. Осуществлена инициация диффузной формы вакуумного дугового разряда в аксиальном магнитном поле с катодом из гадолиния. Проведено исследование влияния магнитных полей в арочной и аксиальной конфигурации на параметры разряда и тип катодной привязки.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Результаты экспериментальных исследований, представленные в данной квалификационной работе, могут быть использованы для дальнейшего развития моделей физических процессов в катодном слое вакуумных дуг, что важно т.к., к примеру, сейчас не существует непротиворечивой модели катодного пятна. В частности, в работе представлены уникальные данные демонстрирующие особенности вакуумных дуг с катодами комплексного состава включающие оксидные материалы. Была предложена новая схема времяпролетного масс-спектрометра, адаптирующая традиционные подходы, для исследования непрерывного потока плазмы тяжелых металлов и обеспечивающая достаточное для исследования металлов и их оксидов разрешение. Полученные результаты позволяют сделать выводы о целесообразности создания источников плазмы на основе диффузной вакуумной дуги для технологии плазменной переработки ОЯТ, методов создания функциональных покрытий или других технологий подразумевающих высокопроизводительный перевод оксидов в состояние потока низкотемпературной плазмы.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Метод времяпролетной масс-спектроскопии направленного, непрерывного потока плазмы диффузной вакуумной дуги, позволяющий проводить измерения относительного и абсолютного содержания генерируемых атомарных и молекулярных ионов продуктов эрозии катода, и созданный на основе данного метода масс-спектрометр.
2. Температурные условия для катода из диоксида церия, определяющие переход от диффузного типа привязки тока на катоде вакуумного дугового разряд к

контрагированному, и для формирования обнаруженных медленно движущихся катодных пятен.

3. Снижение доли молекулярных ионов с ростом тока и слабое влияние температуры катода на ионный состав плазмы диффузной вакуумной дуги с катодом из  $\text{CeO}_2$  при стационарном горении разряда, а также присутствие заметной доли ионов молибдена или вольфрама (материалов тигля) в ионном составе плазмы (до 40%), снижающейся со временем.
4. Впервые реализован и исследован диффузный вакуумный дуговой разряд с мультикомпонентным расходуемым катодом ( $\text{CeO}_2\text{-Cr}$ ) и показано, что массовое соотношение термоэмиссионного оксида и нетермоэмиссионного металла определяет характер зависимости напряжения разряда от температуры катода и параметры плазмы.
5. Создан источник плазмы вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом (ток разряда 0-300 А, напряжение 0-60 В, мощность подогрева катода до 2 кВт) для генерации плазмы тяжелых металлов и оксидов, моделирующих ОЯТ.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Экспериментальные данные были получены с использованием общепринятых методов диагностики и современного измерительного оборудования, обеспечивающих высокую надежность и необходимую точность измерений. Достоверность результатов анализа обеспечивается проверкой работы всех систем на ранее изученных катодах, взаимной согласованностью экспериментальных данных, получаемых при помощи различных диагностических методик, их воспроизводимостью, а также согласованностью с имеющимися данными других авторов.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: 60-65 Всероссийские научные конференции МФТИ (Долгопрудный, 2017-2022), Международная конференция Equations of State for Matter (Эльбрус 2018), международная конференция ЛаПлаз 2018 (Москва, 2018), Научно-координационная сессия РАН "Исследования неидеальной плазмы" (Москва, 2019), XLIX Международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2022), международная конференция Plasma Tech (Барселона, 2022), 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects EFRE-2022 (Томск, 2022),

Всероссийская (с международным участием) конференция Физика Низкотемпературной Плазмы ФНТП-2023 (Казань, 2023)

Результаты по отдельным главам диссертационной работы были удостоены премий в конкурсах научных работ: конкурс научных работ студентов и молодых ученых ОИВТ РАН 2019 года, категория - студенты, первая премия; конкурс научных работ студентов и молодых ученых ОИВТ РАН 2020 года, категория – аспиранты, вторая премия.

### **Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в 28 печатных работах, среди которых 7 — это публикации в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК [1-7], и 21 работа в сборниках трудов конференций и тезисов докладов.

### **Личный вклад автора**

Основные выносимые на защиту положения работы, и содержание диссертации отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка полученных результатов к публикациям проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в квалификационной работе результаты получены автором лично.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 5-ти глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем диссертации 140 страниц, из них 130 страниц текста, включая 82 рисунка и 10 таблиц. Библиография включает 143 наименования.

### **Благодарности**

Автор работы выражает глубокую признательность своему научному руководителю Усманову Р.А. за неоценимый переданный опыт, внимание и терпеливость как наставника и высокие стандарты профессионализма в исследовательской деятельности. Автор также благодарен Гаврикову А.В. за важнейшее участие в постановке научных задач и продуктивную атмосферу товарищества в коллективе. Кроме того, автор искренне признателен Полищуку В.П. и Антонову Н.Н. за многочисленные обсуждения, помощь в проведении экспериментов и анализе результатов, и, конечно, всему коллективу лаборатории 2.1 ОИВТ РАН за помощи и поддержку. Большую благодарность автор высказывает Иосилевскому И.Л. за раскрытие важности рассмотрения особенностей фазовых переходов. Отдельную благодарность автор высказывает Седину А.А. за конструкторское сопровождение работы, Быкову Ю.А. за консультации по схемотехнике, а также Тугушеву В.И. и Лукину О.Ю. за помощь в создании экспериментальных узлов.

## Содержание работы

**Во введении** приводится обоснование актуальности диссертационной работы, формулировка целей проведенных исследований и конкретных задач, решавшихся для их осуществления, обсуждается теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** последовательно описывается актуальное состояние исследований диффузного вакуумного дугового разряда, рассматривается возможная роль представляемого исследования в современной науке, приводится концепция метода плазменной переработки ОЯТ. Особое внимание уделяется в главе формированию информационного базиса полученных ранее результатов (разделы 1.4-1.6), послуживших отправной точкой для данной квалификационной работы.

**В разделе 1.1** кратко проводится анализ истории науки в области физики плазмы с целью ответа на вопрос о целесообразности современных исследований спустя два века после их начала. Целью подобного рассмотрения является формирование целостного понимания роли данной работы, которое необходимо квалифицированному специалисту.

**В разделе 1.2** приводится описание метода плазменной сепарации, в рамках развития которого выполнена данная диссертационная работа [8]. Обсуждается актуальность задачи переработки ОЯТ для современной ядерной промышленности. Формулируются требования к источнику плазмы разделяемых веществ, возникающие при постановке задачи плазменной сепарации ОЯТ. Степень ионизации в выходящем потоке близкая к 100%, преобладающее содержание однократных ионов в составе, а также производительность, в перспективе представляющая интерес для промышленности.

**Раздел 1.3** посвящен краткому освещению физики процессов в вакуумном дуговом разряде [9-10]. Приводится классификация дуговых разрядов и отмечается место вакуумной дуги. Описываются принципиальные отличия двух типов вакуумных дуг: контрагированной и диффузной [11]. Часть раздела затрагивает связанные с катодными пятнами процессы, обсуждается их разделение по типам [12]. Вопрос классификации важен при анализе результатов, излагаемых в последующих главах. Кроме того, проводится обзор существующих теоретических моделей процессов в катодном слое вакуумных дуг и механизмов замыкания тока разряда.

**В разделе 1.4** рассматриваются полученные ранее результаты исследований диффузной вакуумной дуги с катодом из термоэмиссионного материала [13-14]. Определяется атом-электронное отношение и его роль при описании процессов в прикатодном слое

вакуумных дуг. Для разряда с катодом из Gd, изучавшегося и в данной диссертационной работе, рассматривается тепловой баланс на катоде, ВАХ разряда. Описаны результаты исследований плазмы с использованием ряда зондовых диагностик: одиночного зонда Ленгмюра, многосеточного зонда, конденсационного зонда, а также анализа оптических спектров излучения плазмы при разных режимах вакуумной дуги, задаваемых током, напряжением разряда и мощностью подогрева катода. Кроме того, приводятся результаты исследования другого термоэмиссионного материала в качестве катода – углерода.

**В разделе 1.5** описывается проводившиеся ранее исследования диффузной вакуумной дуги с катодом из не термоэмиссионного материала [15-16]. Рассмотрены работы, в которых использовались катоды из хрома, свинца и титана. Как и в предыдущем разделе приводятся ВАХ разрядов, и данные о тепловом балансе на катоде. Обсуждаются теоретические модели позволяющие объяснить недостаток тока термоэмиссии.

**В разделе 1.6** проводится обзор исследований диффузной вакуумной дуги с катодом из керамического материала, а именно диоксида церия [17]. В предшествующих работах было показано, что измеренная ВАХ разряда в диапазоне токов 30-100 А имела линейно возрастающий вид с коэффициентом наклона  $\sim 0.03$  Ом. Температура электронов оказалась независимой от тока разряда и не превышала 1 эВ. Наиболее вероятная энергия ионов с ростом тока дуги монотонно возрастает от 8 до 15 эВ, средний заряд тяжелых частиц увеличивался с ростом тока дуги и при значениях выше 70 А стабилизировался на уровне 0.8–0.9e. В третьей главе данной диссертационной работы приводятся результаты экспериментов, являющиеся прямым продолжением исследований, результаты которых изложены в данном разделе.

**Раздел 1.7** посвящен обзору работ, в которых исследовалось влияние внешнего магнитного поля на вакуумный дуговой разряд [18]. Последовательно перечисляются физические процессы в разряде, которые в первую очередь подвержены влиянию со стороны магнитного поля.

**В разделе 1.8** формулируются выводы к первой главе

Во **второй главе** диссертации представлены результаты разработки и апробации времяпролетного масс-спектрометра, созданного для исследования ионного состава непрерывного потока плазмы.

**В разделе 2.1** вкратце описывается метод времяпролетной масс-спектрометрии (ВМС). Выделяются основные причины, ограничивающие разрешающую способность времяпролетных масс-спектрометров, перечисляются существующие методики повышения разрешения.

В разделе 2.2 проводится обзор работ, в которых методы ВМС применялись для исследования плазменных систем. Формулируются требования и специфика научных задач, которым должен удовлетворять масс-спектрометр (МС). Обосновывается необходимость разработки собственного МС, удовлетворяющего следующим требованиям: времяпролетный МС должен функционировать в условиях плазменного разряда и постоянного напыления тяжелых металлов и их оксидов (являющимися диэлектриками), т.е. электроды будут требовать частой замены и обслуживание должно быть относительно простым. Более того, должна быть учтена потенциальная возможность его применения при наличии внешнего аксиального магнитного поля. В силу подобных условий многие разработанные методики повышения разрешающей способности времяпролетных масс-спектрометров, неприменимы, и требуется поиск новых решений.

В разделе 2.3 представлено описание созданного времяпролетного масс-спектрометра. Описана общая концепция работы прибора, подразумевающая использование одной из классических схем повышения разрешающей способности. Рассматриваются основные узлы масс-спектрометра: система экстракции пучка ионов из плазмы, система транспортировки ионного пучка, система детектирования ионов. Подробно рассмотрены схемы и технические особенности каждой из систем.

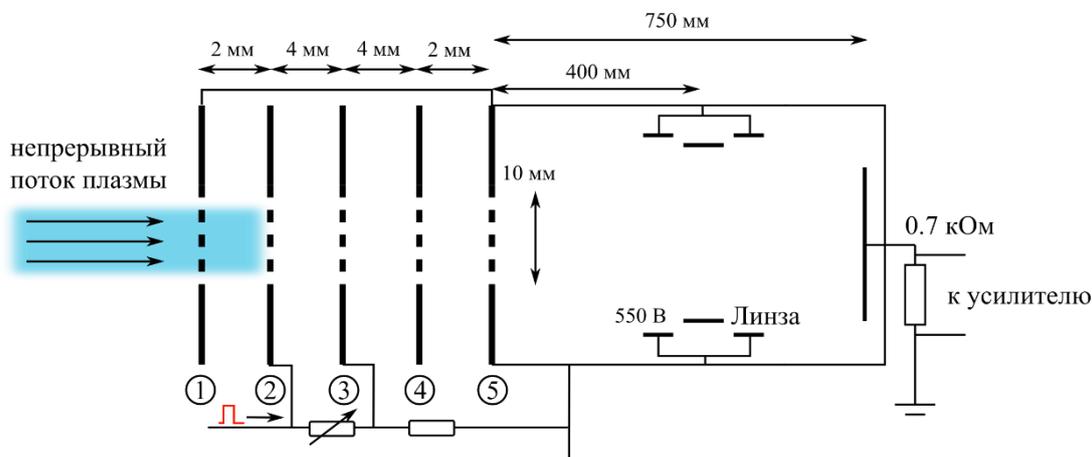


Рис. 1. Схема масс-спектрометра.

Раздел 2.4 содержит описание результатов экспериментов по апробации созданного масс-анализатора на плазме диффузного вакуумного-дугового разряда с катодом из Gd. Описана схема эксперимента. Приведена измеренная аппаратная функция и разрешающая способность прибора (может быть оценена как 24). Описана методология обработки данных эксперимента, позволяющая по масс-спектру определять концентрации отдельных компонент.

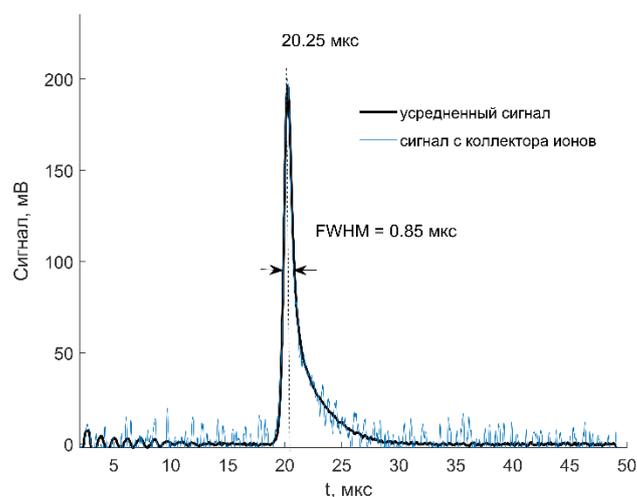


Рис. 2. Зарегистрированный сигнал массового спектра ионов  $Gd^{+}$  и усредненные 300 последовательных сигналов. Ток разряда 64 А, напряжение 4.6 В.

В разделе 2.5 сформулированы выводы к второй главе.

В третьей главе изложены результаты экспериментальных исследований диффузного вакуумного дугового разряда с катодом, представленным отдельным веществом. Эксперименты проводились с веществами, моделирующими процессы конвертации ОЯТ в плазменное состояние, а именно с гадолинием и диоксидом церия.

В разделе 3.1 описывается экспериментальная установка и применявшиеся методы исследования плазмы. Вакуумный дуговой разряд инициировался в цилиндрической вакуумной камере при давлении остаточных газов  $\sim 5-10$  мПа. Анод разряда представлял собой неохлаждаемый молибденовый диск. Катод разряда представлял собой рабочее вещество – диоксид церия или гадолиний, помещенное в тигель из тугоплавкого металла (в зависимости от эксперимента или молибден, или вольфрам). Тигель разогревался при помощи электронно-лучевого подогрева мощностью (ЭЛП) до 1.5 кВт. Температура тигля измерялась яркостным пирометром. Далее под словами «температура тигля» или «температура катода» подразумевается средняя температура боковой поверхности тигля. Дуговой разряд с диоксидом церия инициировался при температуре тигля  $\sim 2,1$  кК, с гадолинием инициация происходила при температуре тигля  $\sim 1900$  К.

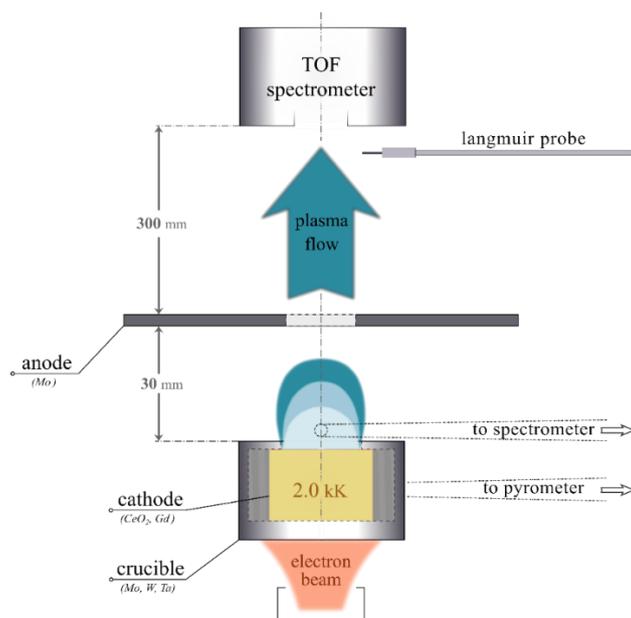


Рис. 3. Схема эксперимента.

Во время эксперимента непрерывно регистрировались напряжение разряда и температура тигля, проводилась видеозапись внешнего вида струи плазмы в разрядном промежутке. Взвешиванием определялся унос массы с катода за время опыта. Непрерывно регистрировался эмиссионный спектр плазмы. Для этого использовался спектрометр с разрешающей способностью 0.3 нм в спектральном диапазоне 200-400 нм. Сбор излучения производился из области вблизи выходного отверстия тигля. Для исследования ионного состава плазмы использовался времяпролетный масс-спектрометр. Применялись зондовые методы диагностики параметров плазмы.

**Раздел 3.2** содержит результаты экспериментов с металлическим катодом из гадолиния. Зарядовый состав плазмы дуги с ДКП исследовался в зависимости от величины напряжения разряда. Ток дуги поддерживался постоянным и составлял 50 А. Температура тигля изменялась от 1900 до 1950 К, напряжение разряда при этом уменьшалось от 14 до 4 В. Представлены измеренные зависимости концентраций компонент плазмы от напряжения дуги. Проведено сравнение с результатами оптических измерений компонентного состава плазмы. На основе данных о среднем заряде и составе плазмы сделаны выводы о степени ионизации плазмы. В частности, обнаружено, что режим с напряжением 4 В (температура тигля 1950 К) и током 65 А соответствует генерации потока плазмы со степенью ионизации близкой к 1 и преобладающим содержанием однократных ионов, т.е. соответствует требованиям задачи плазменной сепарации ОЯТ.

В разделе 3.3 описываются результаты серии экспериментов по исследованию временной эволюции параметром диффузной вакуумной дуги с катодом из  $\text{CeO}_2$ . В ходе экспериментов были зафиксированы значения температуры тигля и тока разряда, использовался молибденовый тигель. Выявлены закономерности в эволюции напряжения разряда. Во-первых, напряжение флуктуирует, причем амплитуда флуктуаций напряжения снижается с течением времени. Во-вторых, среднее значение напряжения снижается с течением времени примерно на 10 % от первоначального значения. Представлено возможное объяснение такого характера изменений напряжения. Помимо напряжения, флуктуировали и другие параметры плазмы. Обнаружено, что вакуумный дуговой разряд с подогреваемым катодом из диоксида церия заметно отличается по стабильности от разрядов на металлах. Во всех сериях экспериментов присутствовали интервалы времени, на которых наблюдались случайные скачки параметров разряда, сопровождающиеся повышением доли двукратных ионов. Причем частота возникновения таких событий как правило возрастала примерно после 800 с от начала эксперимента (при массе катода около 5 г). Описаны режимы горения вакуумной дуги, в которых наблюдалось появление движущихся макроскопических пятен на катоде и приведено описание их характеристик, сделан вывод о типе наблюдавшихся пятен.

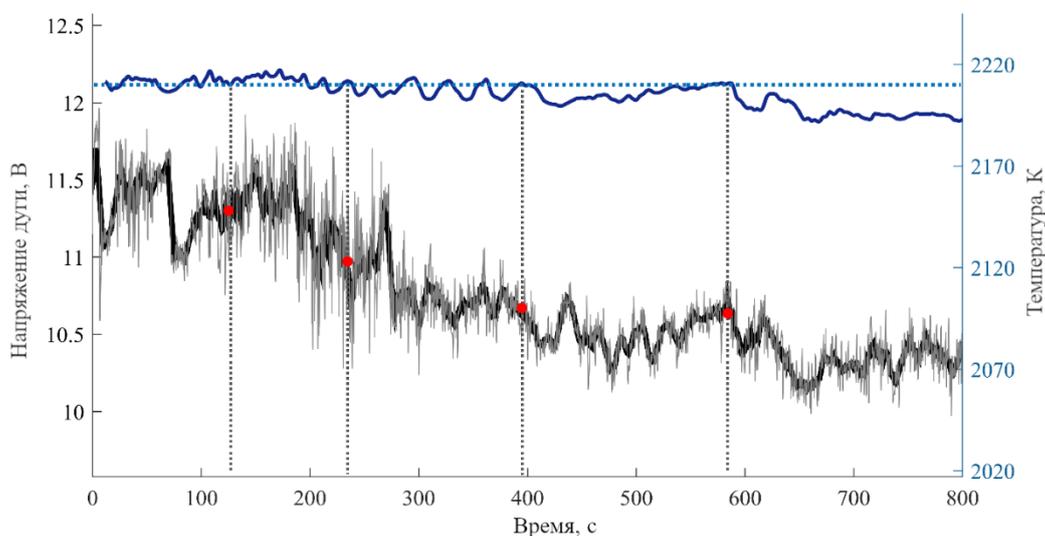


Рис. 4. Временная эволюция напряжения разряда (красные точки обозначают одинаковую температуру). Ток дуги 65 А, молибденовый тигель.

В разделе 3.4 представлены результаты исследования влияния температуры катода на ионный состав плазмы диффузной вакуумной дуги с катодом из  $\text{CeO}_2$ . В эксперименте с фиксированным током 65 А температура тигля менялась в диапазоне от 2200 до 2270 К, при этом напряжение на разрядном промежутке изменялось в диапазоне от 11.5 до 12.2 В.

Показано по результатам регистрации масс-спектров слабое влияние температуры тигля на состав плазмы. Более существенные изменения состава происходят при варьировании тока, либо при переходе разряда в нестабильный режим. Аналогичные результаты по влиянию температуры тигля на параметры разряда были получены и при других токах разряда. Приводится гипотеза, объясняющая подобное отличие разряда на оксидном катоде, от разряда на металлическом катоде.

**Раздел 3.5** содержит результаты исследования зависимости ионного состава плазмы диффузной вакуумной дуги с катодом из  $\text{CeO}_2$  от величины тока разряда. В данной серии экспериментов использовались тигли как из вольфрама, так и из молибдена. Ток дуги варьировался в диапазоне 40-90 А, температура тигля была фиксирована (для вольфрамового тигля 2270 К, дуги для молибденового тигля 2220 К). Обнаружено что, как при использовании вольфрамового тигля, так и при использовании молибденового тигля почти не изменяется доля двукратных ионов с ростом тока. В то время как заметно отличаются зависимости долей ионов материала тигля. Доля ионов молибдена слабо снижается с ростом тока, а доля ионов вольфрама наоборот значительно растет и при токе 90 А составляет почти 30 % плазменного потока. Также в данном разделе представлены данные о значениях концентрации плазмы при разных токах дуги. Кроме того, подробно рассматривается вопрос присутствия материала тигля в потоке плазмы, в частности рассмотрено как доля материала тигля меняется в течение эксперимента.

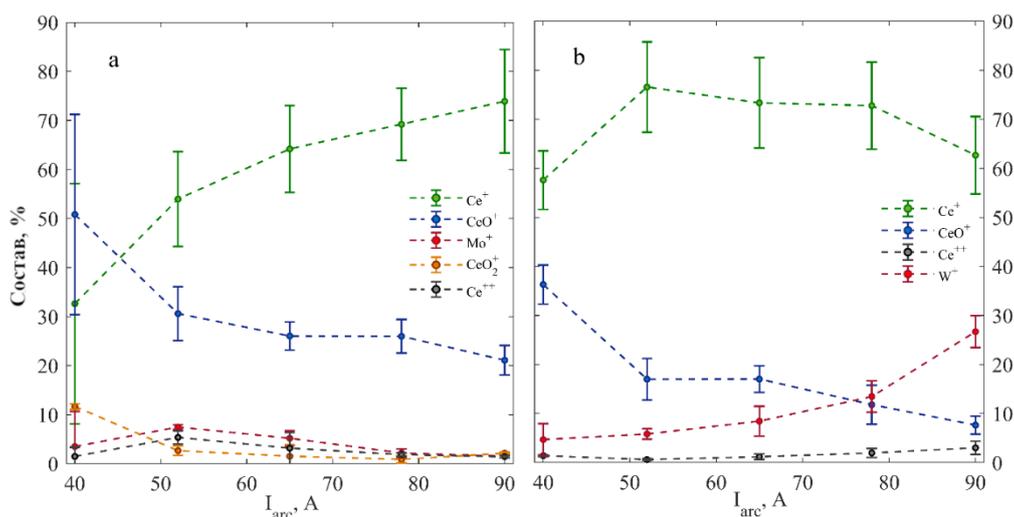


Рис. 5. Ионный состав плазмы при различных токах дуги для молибденового тигля с температурой 2220 К (а) и вольфрамового тигля при температуре 2270 К (б).

В разделе 3.6 описываются результаты анализа присутствия отрицательных ионов в плазме диффузной вакуумной дуги с катодом из  $\text{CeO}_2$ . Приводятся результаты масс-

спектрометрических измерений. Показано, что отрицательные ионы кислорода могут присутствовать, но их концентрация на несколько порядков ниже концентрации основных компонент. Кратко описывается причина появления кислорода к газовой фазе – неконгруэнтность фазового перехода в системе церий-кислород.

**Раздел 3.7** содержит в себе обобщение выявленных особенностей горения диффузной вакуумной дуги с керамическим катодом, по сравнению с металлическим катодом, и описание физических причин, играющих главную роль в появлении качественных отличий разрядов. Выделяются два основных фактора: особенности теплофизических свойств диоксида церия и появление рельефа поверхности катода.

В **разделе 3.8** формулируются выводы к третьей главе диссертационной работы.

**Четвертая глава** посвящена результатам экспериментального исследования диффузной вакуумной дуги с катодом, состоявшем из смеси оксидного и металлического материалов. Подобный смесевой катод позволяет точнее моделировать процесс конвертации ОЯТ в плазменное состояние, т.к. диоксид церия моделирует одну из основных компонент ОЯТ – оксиды актинидов, а хром – конструкционные материалы и металлические продукты деления актинидов. В данной части диссертационной работы затрагиваются как вопросы, касающиеся общих параметров вакуумной дуги таких как ВАХ, тепловой баланс катода, тип катодной привязки, так и вопросы, касающиеся параметров генерируемой плазмы, т.е. температуры и концентрации электронов, зарядового состава плазмы, величины среднего заряда.

**Раздел 4.1** посвящен общему вопросу создания источников плазмы многокомпонентных смесей, актуальности данной задачи и роли теплофизических параметров компонентов смеси в процессе конвертации в плазменное состояние. В качестве катодных материалов в данном исследовании использовались порошки и чешуйки хрома, порошки диоксида церия и диоксида титана. Приведены справочные данные об основных свойствах использовавшихся в работе веществ, относящихся к способности генерировать плазмообразующую среду, эмитировать электроны, а также проводить электрический ток.

**Раздел 4.2** содержит результаты исследования параметров диффузной вакуумной дуги с горячим катодом, включающим в себя керамическую и металлическую компоненты. В качестве оксида используется  $\text{CeO}_2$ , а металлической добавкой является  $\text{Cr}$ . Исследование состояло из нескольких серий экспериментов. В первой серии рассматривался вопрос принципиальной возможности инициирования разряда, исследовалась ВАХ разряда, проводились оценки параметров плазмы методами оптической спектроскопии. Диффузный

вакуумный дуговой разряд на смешанном расходуемом катоде  $\text{CeO}_2+\text{Cr}$  был успешно реализован в диапазоне токов  $I$  от 30 до 110 А, которому соответствовало напряжение дуги  $U = 6-11$  В. Температура тигля,  $T_c$ , менялась от 1950 до 2250 К. Также показаны результаты сравнения температуры электронов  $T_e$ , полученной зондовым методом и методом относительных интенсивностей спектральных линий для режимов разряда с разными токами дуги и при постоянной температуре тигля  $T_c = 2000$  К. Во второй серии экспериментов использовался катод с другим массовым соотношением компонентов. В ходе экспериментов методами ВМС исследовался ионный состав плазмы, методом конденсационного зонда изменялся средний заряд плазмы.

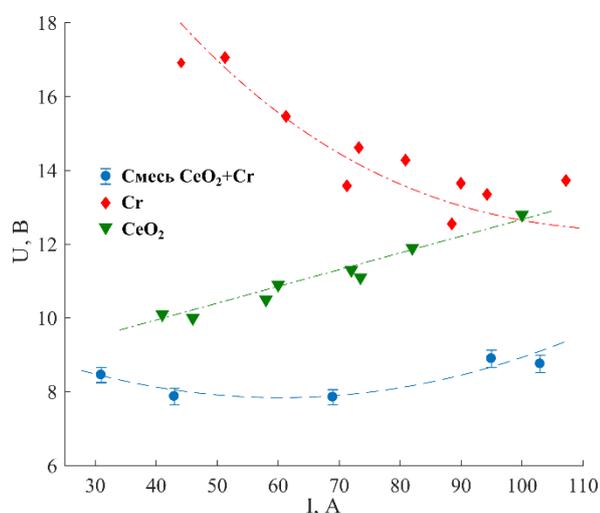


Рис. 6. ВАХи диффузных вакуумных дуг на катодах из  $\text{CeO}_2$  и Cr. Смесевой катод из  $\text{CeO}_2+\text{Cr}$  ( $T_c = 2050$  К), катод из Cr ( $T_c = 1800-1950$  К) [16], катод из  $\text{CeO}_2$  ( $T_c = 2300$  К) [17].

В разделе 4.3 приводятся результаты исследования параметров вакуумной дуги с катодной смесью, состоящей из порошков диоксида титана и металлического хрома, которая исследовалась при двух массовых соотношениях компонентов — 1:1 и 3:7. Показано, что разряд существует при характерной температура катода  $\geq 1900$  К, привязка тока на катоде имеет контрагированный характер. Вследствие этого параметры дуги слабо реагируют на изменение мощности подогрева катодного тигля и, соответственно, на изменение средней температуры катода. Приведены результаты измерений мощности, поступающей из плазмы на катод, среднего заряда плазмы, концентрации ионов и температуры электронов. Исследован ионный состав плазмы при разных токах дугового разряда.

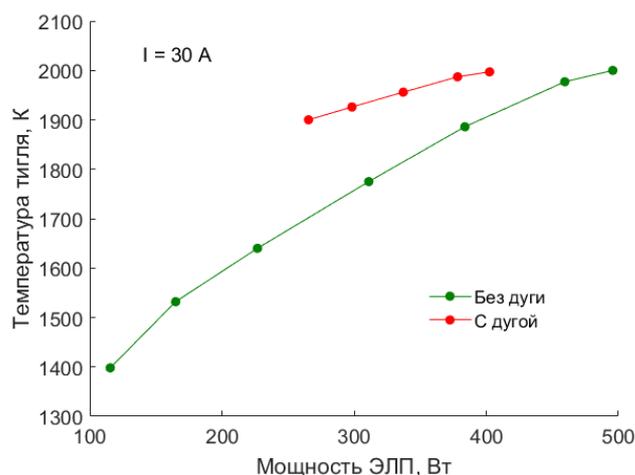


Рис. 7. Температура тигля в зависимости от мощности ЭЛП во время работы разряда и при нагреве в вакууме

**Раздел 4.4** посвящен обсуждению условий реализации диффузной формы вакуумной дуги на смешевом катоде. Согласно зафиксированным данным, разряд на смеси  $\text{CeO}_2+\text{Cr}$  стабильно существовал при средней температуре катода  $> 2100$  К. Катодные пятна при этом не наблюдались. Катод дуги из смеси  $\text{TiO}_2+\text{Cr}$  не имел в своем составе выраженного источника электронов термоэмиссии, способного поддержать ток разряда, который бы замыкался по всей его поверхности. Дуга на смеси  $\text{TiO}_2+\text{Cr}$  существовала при более низкой средней температуре катода  $< 2100$  К, и на поверхности катода наблюдались катодные пятна, которые ее локально разогревали, интенсифицируя потоки эмитируемых частиц.

Также в данном разделе представлены возможные рекомендации по генерации плазмы оксидного керамического материала в составе катода вакуумной дуги, в том числе смешевого, сформулированные на основе анализа полученных данных. Получение плазмы керамического материала с высокой термоэмиссионной способностью (например,  $\text{CeO}_2$ ) возможно при использовании его в качестве катода вакуумной дуги как единственного компонента. Получение плазмы керамического материала с низкой термоэмиссионной способностью (например,  $\text{TiO}_2$ ) возможно при использовании его в виде катода вакуумной дуги в виде смеси с относительно легко испаряемыми металлическими добавками (например, Cr), для уменьшения средней температуры катода и препятствию попаданию материала катодного тигля в плазму.

В разделе 4.5 представлены выводы к четвертой главе.

**Пятая глава** диссертации посвящена результатам исследования вакуумного дугового разряда во внешнем магнитном поле в двух конфигурациях (арочной и аксиальной). Рассмотрены качественные особенности горения разряда, в сравнении со случаем без

магнитного поля. Проведено сравнение параметров разряда и плазмы, с магнитным полем и без.

В разделе 5.1 приводятся результаты экспериментов с арочной конфигурацией магнитного поля и катодом из  $\text{CeO}_2$ . Внешнее арочное магнитное поле создавалось при помощи постоянных неодимовых магнитов в форме колец. Магниты располагались в заанодном пространстве на водоохлаждаемом, подвижном держателе. Величина магнитного поля у катода регулировалась числом магнитов и расстоянием между держателем и анодом. В ходе экспериментов проводилось измерение ряда параметров плазмы, в первую очередь это были: средний заряд и энергия ионов в заанодном пространстве. Также проводился качественный анализ спектров излучения плазмы, из которого определялся компонентный состав плазмы. В ходе экспериментов в качестве материала катода использовался диоксид церия. Приводится описание динамики горения разряда, так как ее характер отличался от случая без магнитного поля. Показано, что во внешнем магнитном поле с арочной конфигурацией разряд горел куда менее стабильно, это выражалось в резких скачках напряжения разряда и сильном разогреве анода, за которым следовали пробои либо между анодом и держателем магнитов, либо между анодом и экраном ЭПП. Стабильность разряда снижалась. Это происходило, во-первых, при понижении температуры тигля, так как при этом снижалась плотность плазмообразующей среды и возрастало напряжение разряда, а, следовательно, и поток энергии из плазмы в анод, который при этом резко разогревался. Во-вторых, при повышении величины тока разряда, так как при этом также увеличивался поток приносимой на анод тепловой энергии, в результате чего он также сильнее разогревался.

Описаны измеренные зависимости напряжения разряда, среднего заряда и энергии ионов от величины магнитного поля. По результатам анализа оптических спектров показано, что в плазме преобладают однократные и двухкратные ионы церия и молибдена, что хорошо согласуется с результатами измерения среднего заряда.

Раздел 5.2 посвящен описанию созданного экспериментального стенда для исследования вакуумной дуги с подогреваемым катодом во внешнем магнитном поле с аксиальной конфигурацией. В состав стенда входят: вакуумная система с предельным давлением  $5 \cdot 10^{-6}$  Торр, система генерации магнитного поля величиной до 1.5 кГс, диагностический комплекс для исследования параметров плазмы (оптический спектрометр, конденсационный зонд, одиночный зонд Ленгмюра). Приводится общая схема экспериментальной установки. Подробно описывается новый источник плазмы на основе

вакуумной дуги, перечисляются отличия от использовавшегося ранее. Основные параметры источника плазмы: напряжение до 60 В, ток до 300 А, мощность подогрева тигля до 2 кВт.

В разделе 5.3 приведены результаты инициации диффузной вакуумной дуги с катодом из Gd в аксиальном магнитном поле. Описываются как качественные особенности горения разряда во внешнем поле, так и количественные зависимости параметров разряда от величины магнитного поля. Получены зависимости напряжения от мощности подогрева катода в диапазоне 700-1050 Вт при токе 41 А в магнитном поле величиной 0, 50, 100 Гс. Получены данные о ВАХ разряда в магнитном поле 0, 50, 100 Гс.

**Раздел 5.4** содержит выводы по пятой главе квалификационной работы.

В **заключении** к диссертационной работе сформулированы главные полученные результаты:

1. Получены новые экспериментальные данные о зависимости ионного состава плазмы диффузной вакуумной дуги с горячим керамическим катодом из  $\text{CeO}_2$  от температуры катода (от 2200 до 2270 К) и тока разряда (40-90 А). Показано заметное присутствие ионов тугоплавкого материала тигля в потоке генерируемой плазмы (до 40%), являющееся следствием его химического взаимодействия с оксид-содержащем катодом.
2. Проведено исследование стационарности горения вакуумного дугового разряда с керамическим катодом и определено время стационарной работы (800 с при начальной массе катода 5 г и средней температуре 2200 К). Проведен анализ временной эволюции параметров источника и плазмы (напряжения разряда, ионного состава, концентрации плазмы). При варьировании температуры катода обнаружены контролируемые переходы между контрагированной и диффузной формами дуги, сопровождающиеся появлением квазистационарных катодных пятен.
3. Получены новые экспериментальные данные о параметрах плазмы вакуумной дуги с многокомпонентным катодом состоящем из смеси оксида и металла (средний заряд плазмы, температура и концентрация электронов, энергия ионов, ионный состав плазмы) для нескольких массовых соотношений компонент катодного материала ( $\text{CeO}_2:\text{Cr} - 1:1$  и  $3:7$ ,  $\text{TiO}_2:\text{Cr} - 1:1$  и  $3:7$ ) в разных режимах работы источника плазмы по току (30-90 А) и температуре тигля. На смесевом катоде  $\text{CeO}_2:\text{Cr}$  реализован диффузный тип привязки тока на катоде разряда и показано, что массовое соотношение компонентов термоэмиссионного оксида и нетермоэмиссионного металла определяет характер зависимости напряжения разряда от температуры катода и, следовательно, параметры плазмы. Показано, что перевод нетермоэмиссионного оксида ( $\text{TiO}_2$ ) в плазменное состояние, возможен в составе

смесевом катода с нетермоэмиссионным металлом, т.к. именно наличие катодных пятен обеспечивает попадание оксида в плазмообразующую среду.

4. В результате анализа полученных данных выявлены условия реализации диффузной формы вакуумного дугового разряда с керамическим или смесевым катодом в зависимости от теплофизических параметров используемых материалов (давления насыщенных паров, работы выхода).
5. Разработан усовершенствованный метод времяпролетной масс-спектропии направленного, непрерывного потока плазмы диффузной вакуумной дуги, позволяющий проводить измерения относительного и абсолютного содержания генерируемых атомарных и молекулярных ионов продуктов эрозии катода. На основе метода создан масс-спектрометр с разрешением равным 20.
6. Разработан, создан и успешно испытан источник плазмы на основе вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом (напряжение до 60 В, ток до 300 А, мощность подогрева катода 2 кВт). Создан экспериментальный стенд (в состав которого входит источник плазмы) для проведения исследований вакуумного дугового разряда во внешнем аксиальном магнитном поле (давление остаточных газов до  $5 \cdot 10^{-6}$  Торр, индукция магнитного поля до 1,5 кГс).
7. Получены новые экспериментальные данные о параметрах вакуумного дугового разряда и генерируемой плазмы во внешнем арочном и аксиальном магнитном поле. Измерены зависимости напряжения разряда, среднего заряда и энергии ионов от величины арочного магнитного поля. Получены зависимости напряжения разряда от мощности подогрева катода в диапазоне 700-1050 Вт при токе 41 А в аксиальном магнитном поле величиной 0, 50, 100 Гс. Получены данные о ВАХ разряда в аксиальном магнитном поле 0, 50, 100 Гс.

В совокупности полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности использования вакуумного дугового разряда в задачах, подразумевающих перевод в плазменное состояние оксид-содержащих материалов сложного состава, в частности, для метода плазменной переработки ОЯТ.

## Список литературы

### Публикации по теме диссертации в рецензируемых изданиях

1. *Melnikov A. D., Usmanov R. A., Gavrikov A. V., Polistchok V. P., Antonov N. N., Samoylov I. S., Smirnov V. P.* // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2023. – Vol. 43. – P. 347–360.
2. *Usmanov R. A., Melnikov A. D., Gavrikov A. V., Antonov N. N., Polistchok V. P.* // Review of Scientific Instruments. – 2022. – Vol. 93. – P. 073505.
3. *Polishchuk V. P., Usmanov R. A., Melnikov A. D., Yartsev I. M.* // High Temperature Material Processes. – 2022. – Vol. 27, No. 3. – P. 43–49.
4. *Usmanov R. A., Amirov R. Kh., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Melnikov A. D., Polistchok V. P., Samoylov I. S., Smirnov V. P., Vorona N. A., Yartsev I. M.* // Plasma Sources Science and Technology. – 2020. – Vol. 29, No. 1. – P. 015004.
5. *Melnikov A. D., Usmanov R. A., Amirov R. Kh., Antonov N. N., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Polistchok V. P., Smirnov V. P.* // Plasma Physics Reports. – 2020. – Vol. 46, No. 6. – P. 611–616.
6. *Vetrova, S. B., Usmanov, R. A., Antonov N. N., Melnikov, A. D., Polishchuk V. P.* // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2023. – Vol. 51, No. 4. – P. 1101–1106.
7. *Polishchuk V. P., Usmanov R. A., Melnikov A. D., Vorona N. A., Yartsev I. M., Amirov R. K., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Samoylov I. S., Smirnov V. P., Antonov N. N.* // High Temperature. – 2020. – Vol. 58, No. 4. – P. 476–494.

## Цитируемая литература

8. Ворона Н. А., Гавриков А. В., Самохин А. А., Смирнов В. П., Хомяков Ю. С. О возможности переработки ОЯТ и РАО плазменными методами // Ядерная физика и инжиниринг. — 2014. — Т. 5, № 11/12. — С. 944—951.
9. Жуков М.Ф., Козлов Н.П., Пустогаров А.В., Аныпаков А.С., Хвесюк В.И., Дюжнев Г.А., Дандарон Г.-Н.Б. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах. — Новосибирск: Наука, 1982.
10. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — Долгопрудный: Интеллект, 2009.
11. Anders S., Anders A. On modes of arc cathode operation // IEEE Transactions on Plasma Science. — 1991. — Vol. 19, no. 1. — P. 20–24.
12. Anders A. Cathodic arcs. From fractal spots to energetic condensation. — Springer Science+Business Media, 2008.
13. Полищук В. П., Сычев П. Е., Шабашов В. И., Ярцев И. М. Стационарная вакуумная дуга с диффузной катодной привязкой на горячем термоэмиссионном катоде // Журнал технической физики. — 1986. — Т. 56, № 11. — С. 2233—2235.
14. Амиров Р. Х., Ворона Н. А., Гавриков А. В., Лизякин Г. Д., Полищук В. П., Самойлов И. С., Смирнов В. П., Усманов Р. А., Ярцев И. М. Исследование вакуумной дуги с диффузной катодной привязкой как источника плазмы для плазменной сепарации ОЯТ и РАО // Физика плазмы. — 2015. — Т. 41, № 10. — С. 877—883.
15. Amirov R. K., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Polishchuk V. P. P., Samoylov I. S., Smirnov V. P., Usmanov R. A., Vorona N. A., Yartsev I. M. Diffuse Vacuum Arc on the Nonthermionic Lead Cathode // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2017. — Vol. 45, no. 1. — P. 140–147.
16. Батенин В., Климовский И., Полищук В., Синельщиков В. Стационарная вакуумная дуга с диффузной катодной привязкой на неэмитирующем хромовом катоде // Теплофизика высоких температур. — 2003. — Т. 41, № 5. — С. 670—678.
17. Usmanov R. A., Amirov R. Kh., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Polistchook V. P., Samoylov I. S., Smirnov V. P., Vorona N. A., Yartsev I. M. Diffuse vacuum arc on cerium dioxide hot cathode // Physics of Plasmas. — 2018. — Vol. 25. — P. 063524.
18. Jia Sh., Shi Z., Wang L. Vacuum arc under axial magnetic fields: experimental and simulation research // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2014. — Vol. 47. — P. 403001.

Мельников Антон Дмитриевич

**Исследование вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом на оксид-содержащих материалах и многокомпонентных смесях для задачи плазменной сепарации ОЯТ**

Автореферат

---

Подписано к печати		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд. л.	Усл.-печ. л.
Тираж 100 экз.	Заказ №	Бесплатно

---

ОИВТ РАН, 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2