

На правах рукописи

Подпись

Усманов Равиль Анатольевич

**Испарение и ионизация веществ,
моделирующих отработавшее ядерное топливо,
в стационарных вакуумных дугах с горячими
расходуемыми катодами**

1.3.9 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2026

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

- Научный консультант:** **Гавриков Андрей Владимирович**
доктор физико-математических наук, доцент
- Официальные оппоненты:** **Паперный Виктор Львович**
доктор физико-математических наук, профессор
Окс Ефим Михайлович
доктор технических наук, профессор
Сайфутдинов Алмаз Ильгизович
доктор физико-математических наук
- Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится «_____» _____ 2026 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета *шифр совета* при *название организации*, при которой создан совет, расположенном по адресу: *адрес*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *название организации*.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. физ.-мат. наук

Подпись

Тимофеев А. В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Известно, что при достаточно высокой температуре катода вакуумной дуги, разряд может перейти в диффузную форму. Она характеризуется относительно низкой плотностью тока на катоде и отсутствием капельной фракции в продуктах эрозии электродов. В последнее время исследования данного разряда стали вновь актуальны в связи с возможностью его применения к задаче плазменной масс-сепарации веществ, а также накопившимся множеством нерешенных вопросов физики дуговых разрядов.

Сегодня в РФ в рамках стратегии развития ядерной энергетики до 2100 г инициирован переход к концепции двухкомпонентной реакторной базы. Он в первую очередь подразумевает наращивание количества реакторов на быстрых нейтронах и замыкание ядерного топливного цикла. Именно поэтому актуальной задачей является разработка новых, экономически оправданных и экологически безопасных технологии переработки ОЯТ. Преимуществами плазменного подхода к переработке является «грубость» разделения и соответствующее отсутствие возможности выделения изотопов плутония, что позволяет создать коммерциализируемую технологию гражданского назначения. Другой привлекательной стороной являются минимальные объемы вспомогательных рециклируемых сред, что значительно сокращает количество образующихся дополнительных радиоактивных отходов, снижает издержки на их захоронение и нагрузку на окружающую среду. Создание и исследование источников плазмы для данной технологии позволят развить научно-технический фундамент подхода к плазменному разделению веществ, провести его апробацию, сформулировать границы применимости, наработав новые знания для применения в других подобных задачах.

Несмотря на долгую историю развития, исследования физики вакуумных дуг на сегодняшний день так и не дали однозначных ответов на ряд вопросов происходящих в разряде. Наиболее актуальные из них касаются процессов происходящих на катоде. Так, во многих экспериментах с диффузными разрядами на катодах как с интенсивной термоэлектронной эмиссией, так и с ее недостатком, реализуются температуры катодов, необъяснимые с точки зрения баланса энергии. Кроме того, до настоящего времени в научной литературе нет единого мнения о величинах долей электронного и ионного тока на катоде, что не позволяет, в рамках принятых представлений, построить замкнутую теорию катодного слоя. На фоне обозначенных вопросов цен-

ность новых полученных экспериментальных данных о дуговых разрядах на катодах с различными физическими свойствами и их интерпретация остается достаточно высокой.

Степень разработанности темы исследования отражена в проведенном обзоре существующих научных работ, касающихся исследований диффузных вакуумных дуговых разрядов и метода плазменной масс-сепарации веществ. В начале каждой Главы диссертации приведен анализ литературных источников по теме. Кроме проработанности научной литературы разработанность темы исследования подтверждается шириной спектра катодных материалов вакуумных дуг (термоэмиссионные, нетермоэмиссионные, диэлектрические, смесевые), изученных и описанных в работе, а также широким набором использованных диагностических методов (зондовые, конденсационные, оптические, масс-спектрометрические и калориметрические).

Цели и задачи диссертационной работы. Целью диссертационной работы являлось исследование характеристик источников плазмы на основе вакуумных дуговых разрядов на горячих катодах из материалов с широким диапазоном физических свойств для их использования при реализации процесса плазменной масс-сепарации. При выборе катодных материалов ставилась задача промоделировать свойства компонентов ОЯТ (с использованием неактивных материалов) по ряду направлений: термоэмиссионная способность, температура плавления, давления насыщенных паров, электрическая проводимость и компонентный состав. При исследовании применимости разряда для плазменной масс-сепарации ставилась задача определить возможность получения потоков плазмы катодных материалов с высокой степенью ионизации при контролируемом зарядовом составе, определить влияние свойств катодных материалов на основные свойства разряда.

Для достижения обозначенных целей решались следующие задачи:

- Определить параметры плазменного потока вакуумной дуги на термоэмиссионном катоде из гадолиния, моделирующем процессы испарения и ионизации урана, включая зарядовый состав, энергию ионов, температуру и концентрацию электронов, степень ионизации.
- Исследовать влияние температуры термоэмиссионного катода на состав и степень ионизации образующегося плазменного потока.
- Исследовать вакуумный дуговой разряд на нетермоэмиссионном катоде из свинца, моделирующем легколетучие компоненты ОЯТ. Измерить

вольтамперные характеристики разряда, исследовать тепловой режим работы катода и скорость эрозии катода.

- Определить влияние тока разряда и температуры нетермоэмиссионного катода на параметры образующегося плазменного потока. Сравнить свойства разрядов на катодах с высокой и низкой способностью к термоэлектронной эмиссии.
- Инициировать вакуумный дуговой разряд на катоде из диоксида церия, моделирующем испарение и ионизацию оксидов урана и плутония. Определить диапазон параметров разрядного промежутка (ток, напряжение, температура катода), при которых существует стационарный диффузный разряд.
- Исследовать параметры плазменного потока вакуумной дуги на керамическом катоде, определить долю молекулярных ионов и ионов материала катодного тигля в составе потока в зависимости от температуры катода и тока разряда.
- Инициировать вакуумный дуговой разряд на смешанном катоде. Измерить вольтамперные характеристики разряда, исследовать тепловой режим работы катода.
- Определить параметры генерируемых плазменных потоков продуктов эрозии смешанных катодов, моделирующих ОЯТ, в вакуумной дуговом разряде.
- На основе полученных данных о вакуумном дуговом разряде на катодных материалах, моделирующих компоненты ОЯТ, сделать вывод о применимости данного типа разряда, как источника плазмы для метода плазменной масс-сепарации веществ.
- Определить степень влияния возможного присутствия неионизованного вещества в потоке источника плазмы на результаты процесса плазменной масс-сепарации в схеме с потенциальной ямой.
- Проанализировать возможность применения особенностей термоэмиссионных катодов в процессе плазменной масс-сепарации веществ.
- Разработать методы диагностики процесса плазменной масс-сепарации веществ.

Научная новизна. В рамках диссертационного исследования *впервые* экспериментально измерены параметры плазменного потока диффузной вакуумной дуги на термоэмиссионном катоде из гадолиния, моделирующем испарение и ионизацию урана, получены данные о влиянии температуры термоэмиссионного катода и напряжения разряда на зарядовый состав, степень ионизации, энергию ионов образующегося потока плазмы.

Впервые в условиях диффузного вакуумного дугового разряда экспериментально продемонстрирована достижимость параметров плазменного потока, удовлетворяющая требованиям метода плазменной масс-сепарации веществ — степень ионизации потока плазмы близка к 100 % при преимущественно однократном заряде ионов.

Впервые инициирован и исследован диффузный вакуумный дуговой разряд на катоде из свинца, моделирующем легколетучие продукты деления ОЯТ, и характеризующиеся недостатком термоэлектронной эмиссии. Измерены энергии ионов, температуры и концентрации электронов, а также степень ионизации образующегося потока плазмы в зависимости от тока разряда.

Получены *новые* экспериментальные данные о скорости эрозии и тепловом режиме работы нетермоэмиссионного катода из свинца, согласующиеся с гипотезой о преимущественно ионном механизме переноса тока дуги на данном типе катода. В предположении об ионном механизме переноса тока дуги рассчитаны параметры плазмы и характерные длины столкновительных и ионизационных процессов вблизи катода разряда.

Впервые инициирован и исследован вакуумный дуговой разряд на катоде из диэлектрического материала — диоксида церия, моделирующего испарение и ионизацию оксидов урана и плутония. Получены *новые* экспериментальные данные о тепловом режиме работы диэлектрического катода, определены параметры образующегося потока плазмы оксидного материала в дуге в зависимости от тока разряда. Определена величина тока дуги, при которой степень ионизации плазменного потока превышает 90 %. Оценен вклад омического нагрева электрического контакта «катод-тигель» в баланс энергии катода.

Впервые обнаружены и описаны медленные катодные пятна на диэлектрическом катоде вакуумной дуги с высокой средней температурой. Определены скорости пятен, температуры и токи разряда, при которых они существуют. Показано, что медленная скорость пятен преимущественно определяется слабой теплопроводностью оксидного катодного материала.

Получены и исследованы *новые* не описанные ранее, вакуумные дуго-

вые разряды с горячими смесевыми катодами оксид+металл ($\text{CeO}_2 + \text{Cr}$, $\text{TiO}_2 + \text{Cr}$), моделирующие компоненты ОЯТ. **Впервые** экспериментально продемонстрировано, что при интенсивной термоэлектронной эмиссии с катода оксид+металл, поток плазмы содержит преимущественно ионы более летучего компонента смеси за счет формирования диффузной привязки тока. При недостатке электронной эмиссии, поток плазмы содержит ионы обоих компонентов смеси за счет реализации контрагированной привязки тока.

На основе результатов изучения свойств вакуумных дуговых разрядов с термоэмиссионными и нетермоэмиссионными катодами предложены **новые** подходы к созданию ионизованных потоков веществ в демонстрационном источнике плазмы для плазменной масс-сепарации и генерации устойчивого поперечного электрического поля в отражательном разряде.

Разработаны **новые** методы диагностики процесса плазменной масс-сепарации в конфигурации с потенциальной ямой для контроля координат осаждения неионизованного вещества, покинувшего источник плазмы, и распределения ионных токов сепарируемых пучков на принимающем коллекторе.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные в диссертационной работе результаты дополняют знания о физике газовых разрядов низкого давления с эродирующими электродами и о свойствах генерируемых такими разрядами плазменных потоках. Теоретическая и практическая значимость результатов обусловлена следующим. Полученные в работе экспериментальные данные могут быть использованы для создания, развития и верификации физических моделей катодных процессов и плазмы газовых разрядов низкого давления. Выявленные зависимости позволят углубить понимание фундаментальных физических процессов, ответственных за эмиссию термоэлектронов и перенос тока на катоде сильноточных разрядов, в том числе на диэлектрических катодах. Результаты исследования разрядов на смесевых катодах позволяют выявить и обосновать роль физических свойств компонент в формировании и поддержании тока разряда, а также генерации плазмообразующей среды. Полученные результаты позволяют сформулировать новые подходы к созданию высокопроизводительных источников плазмы конденсированных сред и выработать конкретные инженерно-физические решения. Новые данные о параметрах формирующихся плазменных потоков позволяют определить степень применимости данного типа разряда для конкретных практических задач, включая задачи плазменной масс-сепарации веществ, ионной имплантации, создания композитных покрытий и других. Результаты исследований функционирования термоэмиссионных катодов ваку-

умных дуг применимы не только непосредственно в задачах генерации плазменных потоков, но и в смежных областях физики и плазменных технологий, в том числе в задачах создания электрических полей в плазме. Разработанные методы диагностики плазменных потоков, использованные для наблюдения результатов плазменной масс-сепарации веществ, могут быть перенесены на другие подобные экспериментальные конфигурации с целью расширения возможностей контроля плазменных процессов в них.

Методология и методы исследования. Экспериментальные исследования выполнены с использованием современных широко применяемых методов диагностики низкотемпературной плазмы.

Положения, выносимые на защиту:

- Результаты экспериментального исследования параметров ионного потока модельного источника плазмы на основе вакуумной дуги с термоэмиссионным катодом, моделирующим испарение и ионизацию урана. Достижение параметров ионизации продуктов эрозии катода, удовлетворяющих требованиям метода плазменной сепарации веществ, — плазма представлена преимущественно однозарядными ионами, степень ионизации продуктов эрозии до 100 %.
- Новые экспериментальные данные о характеристиках впервые инициированной вакуумной дуги на горячем свинцовом катоде, отличающимся недостатком тока термоэлектронной эмиссии. Параметры генерируемого плазменного потока: значения величин среднего заряда, энергии ионов и температуры электронов.
- Результаты экспериментального исследования характеристик впервые инициированной вакуумной дуги с диффузной привязкой тока на катоде из диэлектрического оксидного материала (CeO_2), моделирующего процессы испарения и ионизации компонентов ОЯТ. Параметры ионной компоненты потока плазмы в стационарных и переходных режимах работы источника плазмы. Достижение степени ионизации продуктов эрозии оксидного катода более 90 %.
- Тепловые режимы работы горячих оксидных катодов вакуумной дуги, в том числе в присутствии металлической порошковой добавки (CeO_2 , CeO_2+Cr , TiO_2+Cr). Величины потоков тепловой мощности, поступающей из плазмы на катоды, тепловой эффект контактного сопротивления катод-тигель.

- Зависимость типа привязки тока (диффузная/контрагированная) на мультикомпонентных катодах от термоэмиссионной способности его составляющих и ее влияние на ионный состав потока образующейся плазмы.
- Эффекты применения термоэмиссионных катодов при экспериментальной демонстрации плазменной масс-сепарации веществ с потенциальной ямой. Ионизация паров модельных веществ в демонстрационном источнике плазмы и управление его параметрами. Генерация устойчивого к возмущениям плазменными потоками профиля электрического потенциала в буферной плазме отражательного разряда.
- Метод диагностики результатов процесса плазменной масс-сепарации, позволяющий проводить измерения пространственного распределения ионных потоков разделяемой смеси, массового и элементного распределения отсепарированного вещества на принимающем коллекторе, а также координат осаждения неионизованного вещества, не принимавшего участия в процессе разделения.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена повторяемостью измеряемых величин и согласием результатов, полученных разными методами измерений.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих всероссийских и международных конференциях: 56 – 61 научные конференции МФТИ (Долгопрудный, 2013 – 2018), XXIX–XXXII Международные конференции «Equations of State for Matter» и «Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter» (Эльбрус, 2014 – 2017), отраслевая научная конференция «АТОМ-ТЕХ-2014.Электрофизика», (Москва, 2014), XLII Международная конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2015), IEEE International Conference of Plasma Science (Belek, Turkey, 2015), 13th, 16th and 17th International Conference Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (Томск, 2016, 2022, 2024 гг.), Всероссийская конференция «Физика низкотемпературной плазмы» (Казань, 2017, 2020, 2023 гг.), 10th International conference on Plasma Physics and Plasma Technology (Минск, Беларусь, 2022), Отраслевая конференция "Новая атомная энергетика" (Сочи, 2023).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в виде 16 научных статей в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК: [1–16].

Общее количество публикаций автора в рецензируемых изданиях, подготовленных в соавторстве с коллегами, составляет 52 наименования [1–52].

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 5 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 229 страниц, включая 114 рисунков. Библиография включает 210 наименований на 27 страницах.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава посвящена результатам исследований свойств потоков плазмы, формирующихся в вакуумной дуге (ВД) с диффузной привязкой (ДКП) тока на металлическом термоэмиссионном катоде. В качестве катодного материала рассматривается гадолиний, моделирующий процессы ионизации урана в плазме разряда.

В **разделе 1.1** представлен краткий обзор литературных данных, посвященных условиям инициации ВД с ДКП [37]. Описаны свойства катодных материалов вакуумных дуг, и проведена их классификация по параметру отношения потока испаряющихся атомов к потоку электронов термоэмиссии (ТЭЭ).

Условия, при которых существует катод дугового разряда, определяют характер его эрозии а также интенсивность эмиссионных процессов, к которым относится испарение материала катода и эмиссия электронов. Наиболее известным типом ВД, является дуга с контрагированными катодными пятнами (ККП) [53]. Поверхность катода в ней испещрена подвижными или квазистационарными светящимися областями контракции тока, плотность ток в них может достигать величины 10^8 А/см². Вследствие реализации экстремальных условий на катоде, высоких температурных градиентов, кипения и микровзрывов в генерируемую плазму попадают микрокапли катодного материала. Доля капель может достигать 80 % от общего уноса массы с катода.

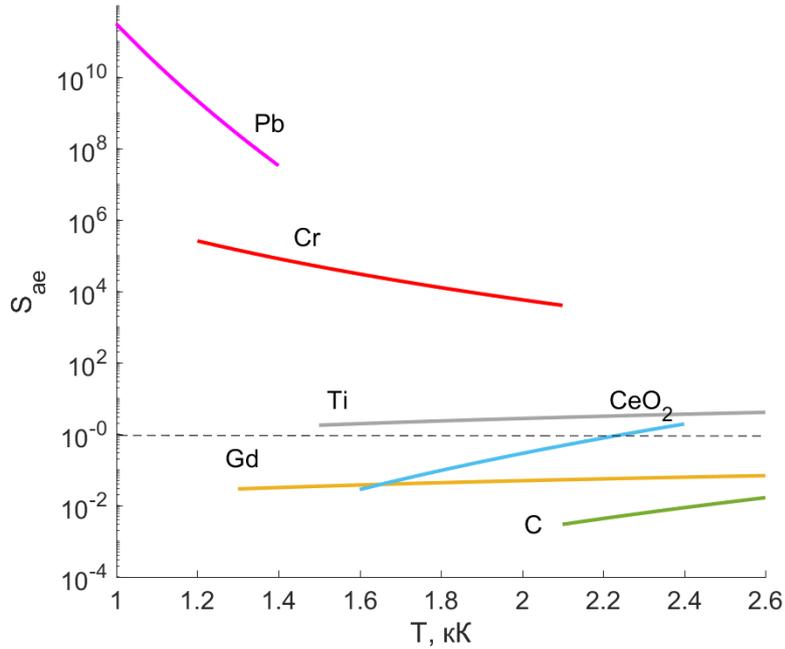


Рис. 1: Атом-электронное отношение для различных катодных материалов [37]

При достаточно высокой средней температуре катода (от 1 до 2.5 кК в зависимости от катодного материала) реализуется дуга с ДКП. Это достигается путем теплоизоляции катода и/или использованием дополнительного косвенного нагрева. Плотность тока в ДКП относительно низка и составляет 10–100 А/см², эмиссия паров и термоэлектронов происходит со всей поверхности катода, а свечение распределено равномерно, что сходно с дуговыми разрядами на термоэмиссионных катодах в инертных газах [54].

Используя величину атом-электронного отношения S_{ae} , равную отношению потоков испаряющихся с поверхности вещества атомов к потоку электронов термоэмиссии, катодные материалы можно разделить на две группы [55]. Для условно легкоплавких металлов (Pb, Hg, Zn, Cu, Cr, Fe и др.) атом-электронное отношение много больше единицы ($S_{ae} \gg 1$). Для тугоплавких металлов (W, Mo, Ta, Nb) атом-электронное отношение много меньше единицы ($S_{ae} \ll 1$). Малые значения S_{ae} также характерны для лантаноидов и актиноидов (La, Gd, U, Th и др.). На рисунке 1 в зависимости от температуры приведены значения S_{ae} для ряда веществ, на которых были реализованы вакуумные дуги с ДКП [37].

Величина S_{ae} может служить оценкой относительной доли ионного тока на поверхности катода вакуумного дугового разряда. Катоды с $S_{ae} \ll 1$ будут далее называться «термоэмиссионными», а вещества с $S_{ae} \gg 1$ — «нетермоэмиссионными». В составе ОЯТ присутствуют элементы как с $S_{ae} \gg 1$, так и

с $S_{ae} \ll 1$, поэтому важно исследовать особенности работы дуги с ДКП для обоих типов катодов.

В разделе 1.2 приведен обзор описанных в литературе исследований вакуумных дуг на горячих термоэмиссионных катодах. Наиболее изученным разрядом в этом классе материалов является ВД на катоде из гадолиния ($S_{ae} \approx 0.05$), исследования которого были начаты в ОИВТ РАН в 1980-ых годах [55–58] для моделирования режимов работы электродов в канале МГД-генератора. Катод разряда располагался в теплоизолированном тигле, который имел электронно-лучевой подогреватель (ЭЛП) для изменения температуры катода при фиксированном токе. В экспериментах [55–58] измерялись ток дуги, напряжение, мощность ЭЛП, температура катода и тепловой поток, поступающий из плазмы на катод, скорость испарения катода.

В исследованиях было показано, что при относительно низкой температуре катода поток тепла на него из плазмы превышает потери тепла на эмиссию электронов, а с ростом температуры реализуется режим эмиссионного охлаждения катода, когда при той же мощности ЭЛП, его температура в присутствии разряда оказывается ниже, чем при нагреве в вакууме. Сделан вывод о том, что перенос заряда на катоде из Gd происходит, в основном, вследствие термоэлектронной эмиссии. Показано, что скорость испарения Gd в дуге во всех исследованных режимах была в полтора-два раза, меньше чем без нее. Это указывает на возврат части испаренных атомов обратно на катод в виде ионов. Проведены оценки максимальной энергии, передаваемой катоду ионами, возвращающимися на катод. Показано, что для поддержания температуры катода в самостоятельном (самоподогревном) режиме горения разряда этой энергии недостаточно для однозарядных ионов.

Вторым термоэмиссионным материалом, на котором ВД с ДКП была достаточно подробно исследована, является углерод [59]. Исследовался источник плазмы с самоподогревным теплоизолированным углеродным катодом. Проведено сравнение характеристик разрядов с ДКП и с ККП. Отмечен разный характер колебаний напряжения двух разрядов. Напряжения диффузного разряда составляло около 30 В и колебалось в диапазоне ± 1 В, в контрагированном же разряде среднее напряжение было ниже, на уровне 20 В, однако его колебания составляли ± 5 В. Концентрация электронов плазмы столба дуги была порядка 10^{12} см⁻³, а температура составляла 5–7 эВ. Энергетическое распределение ионов разряде с ДКП значительно отличалось от разряда с ККП. Как наиболее вероятная энергия ионов, так и ширина распределения в дуге с ДКП были ниже, чем в разряде с ККП. Для последней наблюдался

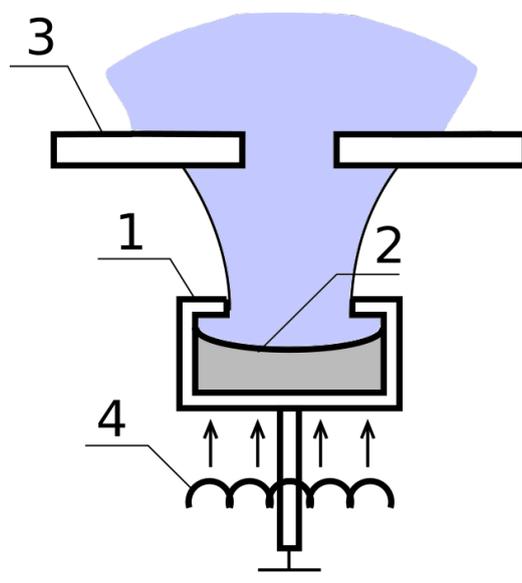


Рис. 2: Эскиз разрядного промежутка. 1 – катодный тигель, 2 – расплав гадолиния, 3 – анод, 4 – электронно-лучевой подогреватель [37]

высокоэнергичный хвост в спектре. Отмечается, что средний заряд ионов, в обоих дуговых режимах был близок к единице.

Проанализированные данные литературы позволили считать, что дуговой разряд с ДКП перспективен в качестве источника плазмы для технологии плазменной сепарации ОЯТ.

В разделе 1.3 представлены результаты исследований параметров и свойств потока плазмы гадолиния, образующейся в дуге с ДКП. Гадолиний в силу схожести первых трех потенциалов ионизации с ураном (основным компонентом ОЯТ) может моделировать его в разряде. Схема разряда повторяет использовавшуюся в работах [56; 58] и подробно описана в [12]. Ее эскиз представлен на рисунке 2.

Разряд зажигался в вакуумной камере при давлении остаточных газов менее 10 мПа. Гадолиний помещался в теплоизолированный молибденовый тигель, внешний и внутренний диаметр тигля — 25 и 19 мм. Под тиглем располагался ЭЛП мощностью до 1 кВт. В качестве анода использовался стальной диск с водяным охлаждением, имевший центральное отверстие диаметром 32 мм. Яркостным пирометром измерялась температура боковой поверхности катодного тигля. Исследования проводились при токах разряда от 30 до 90 А и температуре тигля в интервале 1.8–2.1 кК. Повышение температуры тигля приводило к снижению напряжения разряда. Исследовались напряжения в диапазоне от 3 до 40 В. Основными определяемым параметрами плазменного потока были температура электронов, концентрация и энергия ионов, средний заряд ионов в потоке заанодной плазмы и зарядовый состав.

Зондовые измерения, проведенные в разрядном промежутке и заанодном пространстве, показали, что при увеличении напряжения разряда от 3 до 30 В также возрастает и температура электронов от 0.5 до 10 эВ. Последнее говорит о возможности управления параметрами формирующегося потока плазмы, включая зарядовый состав, путем варьирования рабочей температуры катода. Исследования спектров излучения плазменного столба, произведенные путем наблюдения за интенсивностями спектральных линий Gd I, Gd II и Gd III при различных напряжениях разряда, показали, что зарядовый состав плазмы значительно изменится. Результаты измерений приведены на рисунке 3.

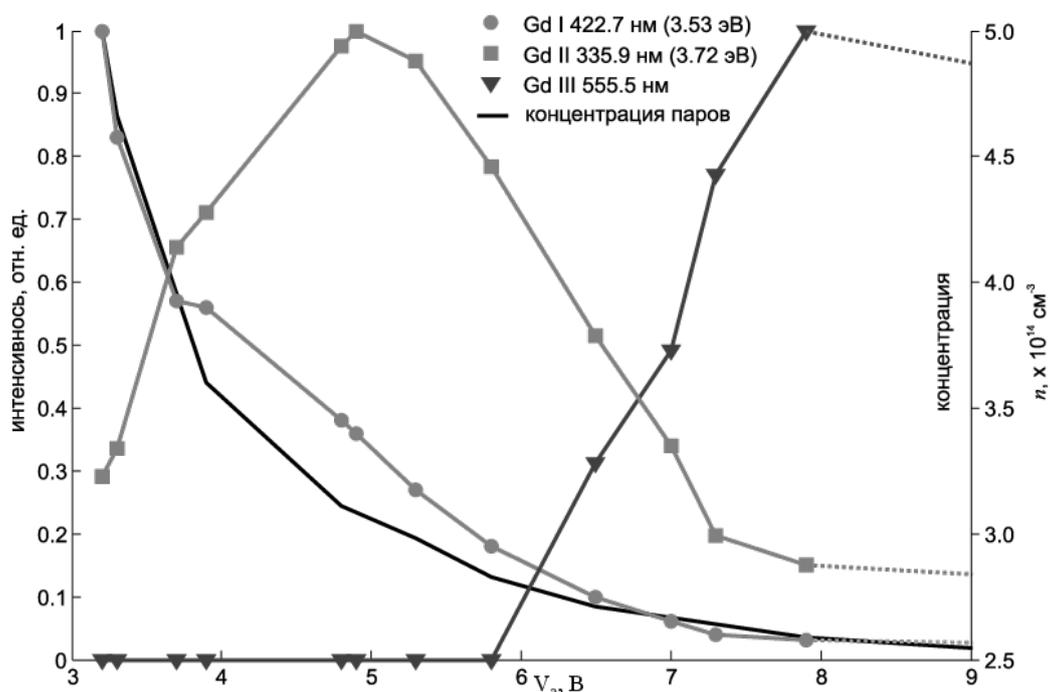


Рис. 3: Поведение интенсивности излучения линий гадолиния и концентрация его насыщенных паров в зависимости от напряжения разряда (Gd I — атомарный гадолиний, Gd II — однократный ион, Gd III — двукратный ион). Ток разряда $I = 44$ А [12]

При фиксированном токе 44 А интенсивность излучения атомов Gd (линий Gd I) монотонно снижается с ростом напряжения, находясь в соответствии со снижением концентрации насыщенных паров гадолиния, интенсивность излучения линий однозарядных ионов Gd^+ (линии Gd II) имеет максимум при напряжении около 5 В, а излучение двузарядных ионов Gd^{++} (линии Gd III) обнаруживаются в спектре только при напряжениях более 6 В. Данные спектральных измерений плазменного излучения были подтверждены данными измерений зарядового состава плазмы, проникающей в пространство за анодом, выполненные при помощи времяпролетного масс-спектрометра [31].

Были произведены измерения среднего заряда тяжелых частиц плазмы в зависимости от напряжения дуги. Показано, что при увеличении напряжения от 3 до 9 В, средний заряд монотонно возрастал от 0.5 до 1.5 элементарных зарядов. В диапазоне от 5 до 6 В средний заряд с учетом погрешности измерений равен 1. С учетом данных о зарядовом составе, можно сказать что в указанном диапазоне напряжений формируется плазменный поток, удовлетворяющий требованиям плазменной сепарации к источнику плазмы на степень ионизации и кратность заряда ионов.

Измерения энергии ионов в потоке плазмы в заанодном пространстве показали, что с ростом напряжения разряда энергия также возрастает. Величина наиболее вероятной энергии в разряде с ДКП близко к величине напряжения разряда, умноженной на заряд электрона. При напряжении 5 В, энергия ионов не превосходит 10 эВ. Необходимо отметить, что характерные значения энергий ионов дуге с ККП на гадолиниевом катоде оказываются значительно больше (~ 50 эВ [60]), что является индикатором существенного отличия происходящих процессов на катодах разрядов.

В разделе 1.4 приведены экспериментальные результаты исследования процесса инициации разряда на горячем катоде из гадолиния. Измерялись временные характеристики изменения напряжения на разрядном промежутке и интенсивности излучения ионов Gd^{++} в процессе инициации разряда, а также зависимость напряжения пробоя разрядного промежутка при различных начальных температурах катода.

Показано, что характерное время установления напряжения разряда после пробоя составляет порядка 10 мс. Непосредственно пробоем предшествует вспышка излучения плазмы длительностью 1.5 мс. Измеренные напряжения пробоя промежутка снижаются от 400 до 70 В при повышении температуры катода от 1.9 до 2 кК. Концентрация насыщенного пара гадолиния при данных температурах изменяется в диапазоне от 0.7×10^{14} см $^{-3}$ до 4×10^{14} см $^{-3}$, а плотность тока ТЭЭ — от 2 до 8 А/см 2 . Показано, что в рассматриваемых условиях термоэлектронная эмиссия с катода в развитии пробоя не является определяющим фактором.

В разделе 1.5 представлены выводы к Главе 1. Результаты первой главы опубликованы в работах [9; 12; 14–16].

Во второй главе описаны результаты исследований вакуумного дугового разряда на нетермоэмиссионном катоде из свинца. Атом-электронное отношение для него составляет порядка 10^8 . Таким образом, характеристики ВД на катоде из свинца должны быть близки к разрядам (которые еще пред-

стоит изучить) на нетермоэмиссионных катодных материалах, содержащихся в составе ОЯТ, например, Cs и Sr.

В разделе 2.1 представлен краткий обзор представленных в научной литературе результатов исследования разрядов с ДКП на нетермоэмиссионных катодах из хрома и титана [37].

Впервые вакуумная дуга с ДКП была описана в работе [61], в которой изучался разряд с катодом из Cr. Использовалась схема без дополнительного нагрева катода, его рабочая температура достигалась путем теплоизоляции катодного тигля. Произведено сравнение характеристик разрядов с ККП и с ДКП при токах в диапазоне 40 – 400 А. Показано, что в дуге с ДКП отсутствуют микрокапли продуктов эрозии хрома, а степень ионизации растет от 10 до 100% с ростом тока. Авторы [61] отнесли этот разряд к термоэмиссионным и предполагали, что доля электронного тока на катоде разряда должна быть от 0.5 до 0.95, которую обеспечивает неясный механизм аномальной электронной эмиссии.

В экспериментах [62] использовался косвенный нагрев катода из хрома, который применялся для инициации разряда и впоследствии отключался. Исследовались самостоятельные режимы горения дуги, ее вольтамперная характеристика (ВАХ) и тепловой режим работы катода. Измерена скорость эрозии Cr в дуге и коэффициент электропереноса, который составил ~ 0.1 атом/электрон. Проведено сравнение напряжений горения дуг на Cr и Gd, измеренных при одинаковой геометрии электродов. Напряжение дуги с ДКП на катоде из Cr в самостоятельном режиме было значительно ниже, чем на катоде из Gd. Эмиссионное охлаждение катода из хрома не наблюдалось. По данным [62] в работе [63] была построена качественная модель катодного слоя дуги, отличительной чертой которой было наличие максимума потенциала, находящегося на расстоянии порядка длины ионизации.

Дуги с ДКП на титане исследовались в схемах, где поверхность титана нагревалась электронным пучком. В работе [64] измерялось распределение электрического потенциала в слаботоочном разряде с ДКП. Показано, что оно немонотонно, и величина максимума зависит от мощности нагревателя. В качестве источника плазмы титана для нанесения покрытий дуга с ДКП изучалась в [65]. Отмечено, что ток эмиссии электронного пучка, нагревающего катод, является эффективным рычагом управления параметрами разряда такими как: скорость осаждения ионов на подложку и плотность ионного тока на коллекторах. В [66] исследовалось влияние магнитного поля на плазменные потоки разряда, показано, что с его ростом увеличивается степень

ионизации и температура электронов.

В разделе 2.2 представлены результаты измерений основных параметров впервые реализованной вакуумной дуги с ДКП на катоде из свинца и описаны использованные диагностические методы. Разряд инициировался в разрядном промежутке с близкой геометрией к используемой в исследованиях разряда на катоде из Gd. В большинстве проводимых экспериментах использовался тигель с крышкой, имевшей отверстие 6 мм, для снижения скорости испарения свинца и продления времени горения дуги. Приведены диапазоны основных параметров реализованного разряда с ДКП: ток от 10 до 75 А, напряжение от 11 до 25 В и температура тигля от 1.2 до 1.6 кК (давление насыщенных паров свинца $\sim 0.1\text{--}5$ кПа). Также удавалось реализовать самостоятельный разряд при выключенном ЭЛП. Ток ТЭЭ для катода из свинца по оценкам находился на уровне 10^{-6} А/см². В предположении замыкания тока дуги только на поверхность жидкого свинца оценена средняя плотность тока на катоде, составившая 5–20 А/см². Измерена ВАХ разряда для самостоятельного режима работы, демонстрирующая линейную возрастающую зависимость. ВАХ разряда на Pb значительно отличается от ВАХ разрядов на Gd и Sr, для которых она убывающая. Амплитуда колебаний напряжения горения разряда не превышала 5%. Показано, что повышение температуры катода при постоянном токе разряда вызывает лишь незначительный рост напряжения, не превышающий 3 В. Вылет капель катодного материала в стационарных режимах горения разряда не наблюдалось.

В разделе 2.3 приведены результаты исследования скорости испарения свинца из тигля в двух режимах: чисто термическом и в процессе горения дугового разряда. Был выполнен расчёт коэффициента испарения свинца из тигля переменного сечения (0.15). С его помощью определена скорость термического испарения в зависимости от температуры катода, получено совпадение с данными контрольного эксперимента в пределах погрешности 10%. Показано, что в присутствии дуги скорость испарения примерно в два раза ниже чем при термическом испарении. Этот результат указывает на то, что около половины атомов свинца, покинувших тигель, возвращаются на катод в виде ионов или атомов. На рисунке 4 представлено сравнение экспериментально измеренных скоростей испарения свинца в дуговом разряде и рассчитанных при термическом испарении.

Удельная эрозия свинцового катода составляла 1.0–2.8 мг/Кл, а соответствующий коэффициент электропереноса находился в диапазоне 0.5–1.3 атом/электрон. Энергетическая цена иона составляла приблизительно 30 эВ.

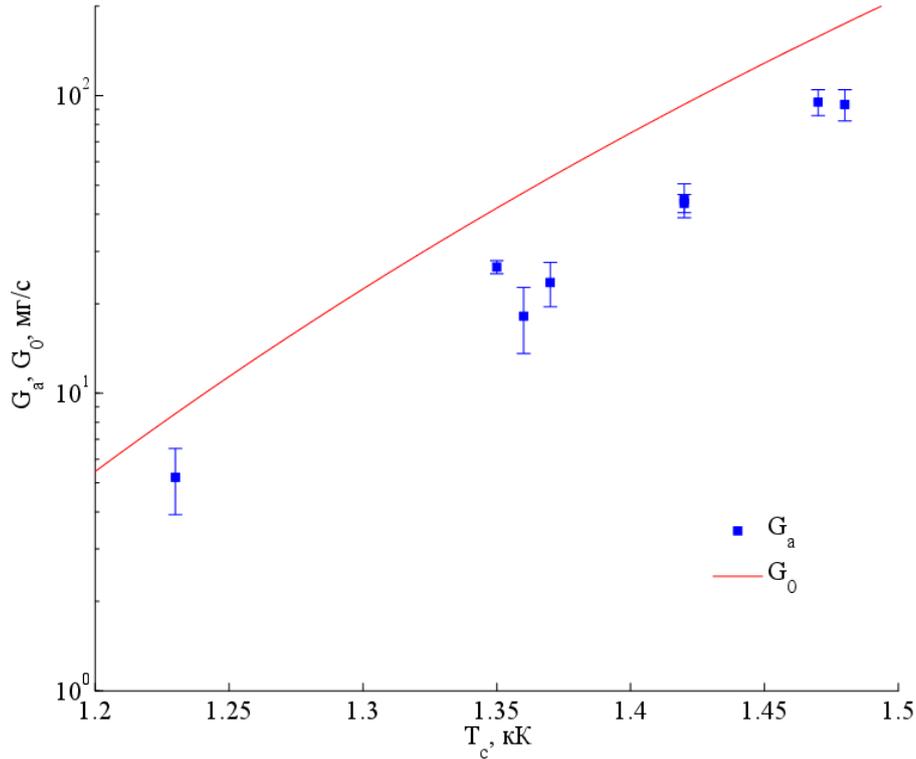


Рис. 4: Скорость эрозии свинца в дуге G_a и рассчитанная скорость термического испарения в вакуум G_0 [8]

В разделе 2.4 анализируется тепловой режим работы свинцового катода. Составлен баланс потоков энергии с тигля во время горения дуги, учитывающий мощности потерь на испарения атомов, мощность нагрева ЭЛП, мощность, поступающую из плазмы в катод. На основе баланса мощностей был рассчитан вольт-эквивалент (ВЭ) тепловой мощности, поступающей из плазмы. На рисунке 5 приведены измеренные зависимости температуры катодного тигля от мощности ЭЛП для случая дуги и термического нагрева.

Полученные результаты демонстрируют, что во всех экспериментально реализованных режимах работы дуги величина ВЭ является положительной и находится в диапазоне от 4 до 10 В. Таким образом, эффект эмиссионного охлаждения свинцового катода не наблюдался.

В разделе 2.5 приведены результаты исследования параметров формирующегося плазменного потока в дуге на катоде из свинца. Измерялись температура электронов плазмы в заанодном пространстве от тока дуги, спектры излучения плазмы для определения температуры возбуждения энергетических уровней свинца, средний заряд тяжелых частиц плазмы, энергетические спектры ионов, а также пространственное распределение электрического потенциала вдоль столба дуги.

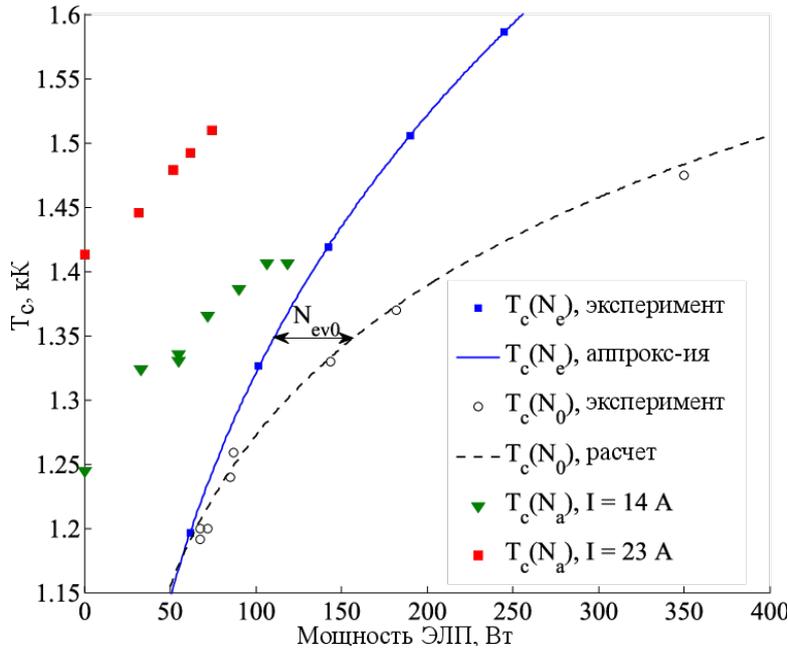


Рис. 5: Тепловые потоки из плазмы на катод дуги. $T_c(N_e)$ — калибровочная кривая для пустого тигля, $T_c(N_0)$ — калибровочная кривая для тигля со свинцом, $T_c(N_a)$ — зависимость температуры катода дуги от мощности ЭЛП, N_{ev0} — мощность потерь на испарение атомов [8]

Показано, что при увеличении тока разряда температура электронов убывала от 1 до 0.4 эВ, что, вероятно, связано с повышением концентрации нейтральных частиц свинца в разрядном промежутке из-за повышения средней температуры катодного тигля. Температура возбуждения находилась на уровне 0.4 эВ. Излучения двузарядных ионов свинца в плазме не наблюдалось. Наиболее вероятная энергии ионов свинца возрастала от 12 до 15 эВ при повышении тока от 10 до 27 А. Максимальная энергия не превышала 17 эВ, что в 2 раза ниже наблюдаемых энергий ионов в разряде с ККП [67]. Средний заряд возрастал от 0.1 до 0.3 при увеличении тока дуги с 17 до 30 А. Распределение электрического потенциала в разрядном промежутке показало, что потенциал анода примерно на 1 В ниже потенциала плазменной струи, электрическое поле у анода составляет не менее 2 В/см.

С использованием данных о среднем заряде тяжелых частиц плазмы и ВЭ теплового потока проведены оценки ионного тока на катод разряда, поступающего из плазмы, а также энергии ионов (1–7 эВ) и их концентрации ($4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$). Показано, что в данном разряде ионный ток из плазмы может полностью обеспечить замыкание тока на катод дуги. В [1] описана модель катодного слоя разряда и представлены оценки основных его параметров: длина ионизации $3.4 \times 10^{-3} \text{ см}$, концентрация ионов $3.6 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, кинетическая энергия ионов 3 эВ, длина свободного пробега ионов $1.3 \times 10^{-3} \text{ см}$.

В разделе 2.6 описана экспериментально обнаруженная форма слабotoчного (10 мА) высоковольтного (340 В) разряда в парах свинца, реализующегося в разрядном промежутке. Его ключевая особенность заключается в том, что ионы свинца не способны вызывать вторичную электронную эмиссию с поверхности катода, поскольку энергия ионизации свинца (7.4 эВ) меньше удвоенной работы выхода материала катода (≈ 8 эВ).

Раздел 2.7 посвящен выводам ко второй главе, в нем перечислены основные полученные результаты. Они опубликованы в работах [1; 8; 11; 13].

В третьей главе описан диффузный вакуумный дуговой разряд, впервые реализованный на катоде из диоксида церия, который является диэлектриком при нормальных условиях. CeO_2 моделирует испарение и ионизацию UO_2 .

В разделе 3.1 описаны особенности CeO_2 как катодного материала вакуумной дуги. Приведены литературные данные, обосновывающие возможность протекания тока дуги через нагретый в вакууме CeO_2 благодаря его восстановлению до оксида нестехиометрического состава, обладающего электрической проводимостью. Представлен анализ физических свойств CeO_2 , UO_2 и PuO_2 , позволяющий утверждать об ожидаемом подобии характеристик вакуумных дуг на катодах из данных материалов. Приведены результаты термодинамических расчетов равновесных концентраций продуктов испарения над твердым диоксидом церия. Показано, что основным компонентом пара является CeO .

В разделе 3.2 описана процедура инициации разряда на катоде из диоксида церия, а также результаты измерений основных его параметров: ВАХ и зависимости напряжения горения дуги от температуры катода. Катод из CeO_2 спекался из порошка оксида в катодном тигле при температуре 1.7 кК в течении часа в бескислородной атмосфере. Также использовались готовые катоды из CeO_2 производства НПО Люминофор. Была измерена работа выхода электронов с поверхности спеченного катода из CeO_2 , она составила 3.4–3.6 эВ. Разряд удалось реализовать в диапазоне токов 15–150 А и напряжений 9–14 В при температуре тигля 2.1–2.4 кК. Мощность ЭЛП варьировалась от 0.5 до 1.1 кВт. Реализовать самостоятельный (самоподогревный) режим работы катода в исследованном диапазоне токов не удалось.

На рисунке 6 представлены ВАХ диффузной вакуумной дуги на катоде из CeO_2 , измеренные при фиксированной мощности ЭЛП 700 В и при постоянной средней температуре катода 2300 К.

ВАХ разряда имела линейную возрастающую форму с коэффициентом

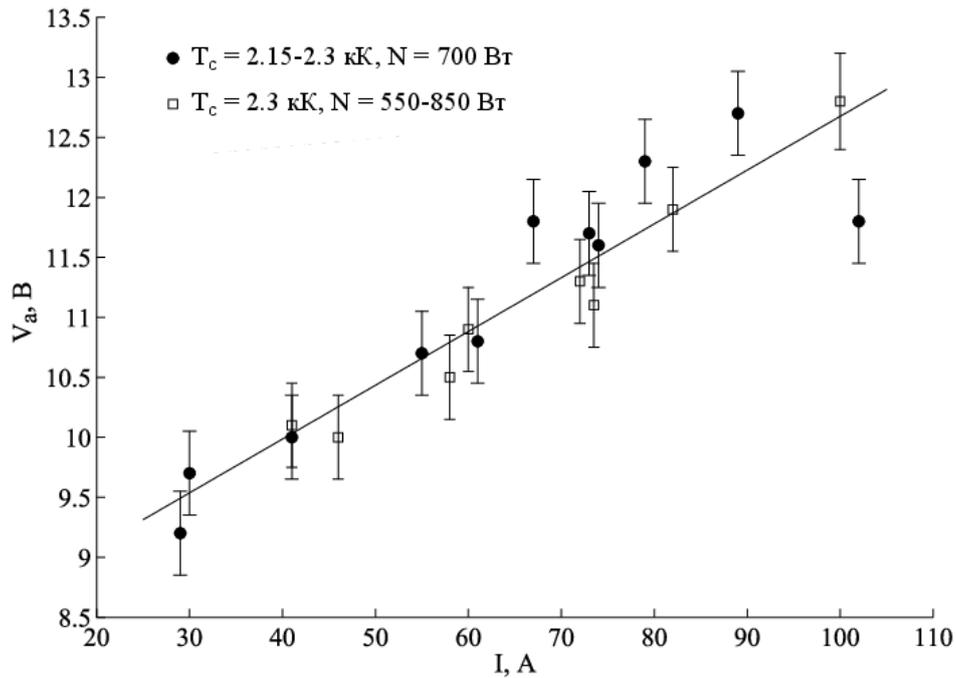


Рис. 6: ВАХ разряда на CeO_2 с горячим анодом при фиксированных температуре катода и фиксированной мощности ЭЛП [3]

наклона около 30 мОм. Напряжение горения разряда продемонстрировало слабую зависимость от температуры катода при постоянном токе, составляя приблизительно 5 В на каждый кК изменения температуры.

В разделе 3.3 описаны особенности горения разряда на оксидном катоде из CeO_2 . Проведены измерения удельной эрозии оксидного катода, которая составила порядка 0.04 атом/электрон. Полученная величина удельной эрозии является типичной для термоэмиссионных катодов. Показано, что измеренный ВЭ теплового потока из плазмы в катод разряда линейно возрастает с ростом тока, что во многом обеспечено выделением джоулева тепла при протекании тока через тело катода. Оценена величина электрического сопротивления системы «тело катода» + «контакт катод–тигель», составившая порядка 0.03 Ом. Обнаружены режимы горения разряда (при слишком низкой средней температуре катода), в которых наблюдается контракция тока на катоде из CeO_2 и появление медленно движущихся катодных пятен [41]. Осцилляции напряжения горения разряда при наличии катодных пятен не наблюдались, как и признаки эрозии катода в виде капель. Описан характер движения катодных пятен, оценена их скорость движения, которая составила порядка 5 см/с, что значительно меньше скорости движения катодных пятен, наблюдаемых на холодных металлических катодах.

В разделе 3.4 приведены результаты исследований параметров плаз-

менного потока стационарного диффузного разряда на катоде из CeO_2 (рисунок 7). Температура электронов в потоке плазмы за анодом разряда находилась в диапазоне 0.5–1 эВ при увеличении тока от 30 до 100 А. Концентрация электронов плазмы на расстоянии 15 см от анода достигала $4 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Максимальная энергия ионов в потоке плазмы за анодом возрастала от 17 до 24 эВ при повышении тока от 40 до 100 А. Измерен средний заряд тяжелых частиц плазмы. От возрастал от 0.4 до 0.9 при увеличении тока дуги от 40 до 70 А. При дальнейшем повышении тока величина среднего заряда в пределах погрешности не изменялась, оставаясь на уровне 0.8–0.9.

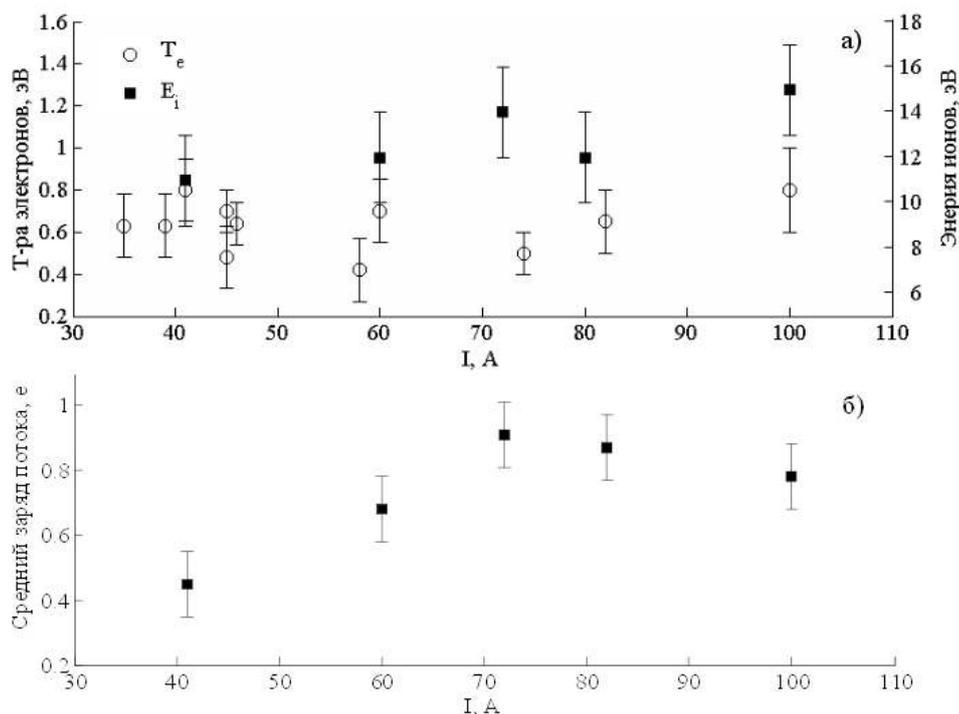


Рис. 7: Параметры плазменного потока: а) температура электронов — T_e и наиболее вероятная энергия ионов — E_i , б) средний заряд тяжелых частиц [3]

Измерения ионного состава потока плазмы, вытекающей в пространство за анодом, показали, что в ней присутствуют преимущественно однозарядные ионы Ce^+ и CeO^+ (более 90 % ионов от всех) при использовании молибденового катодного тигля [40]. При повышении тока разряда степень диссоциации молекулярных ионов растёт, что приводит к повышению доли ионов Ce^+ . Кроме церий содержащих ионов в составе потока наблюдаются ионы материала тигля на уровне 10 %, что связано с частичным окислением материала тигля при контакте с CeO_2 при высокой температуре, образованием оксидов молибдена, их испарением и последующей ионизацией в плазме дуги. Таким образом, показано, что тигель является расходуемым в описанных условиях существования разряда.

Раздел 3.5 посвящен изучению параметров плазменного потока разряда в первые минуты после пробоя промежутка, когда релаксационные процессы на катоде еще не завершились и разряд не перешел в стационарный режим горения [42]. Длительность релаксационных процессов в оксидном катоде из-за его низких значений коэффициентов тепло- и электропроводности в сравнении с металлами по оценкам составляет несколько минут (300–450 с). Исследовались напряжение горения разряда, энергия ионов и состав ионной компоненты плазменного потока. Показано, что в нестационарном режиме горения разряда энергетические спектры ионов (частота регистрации 1 кГц) имеют несколько локальных максимумов, со значениями энергий отличающихся в два раза, что связано с нестационарностью ионного состава плазмы.

На рисунке 8 приведен масс-спектр ионов потока плазмы в нестационарном режиме, возникающем после пробоя промежутка.

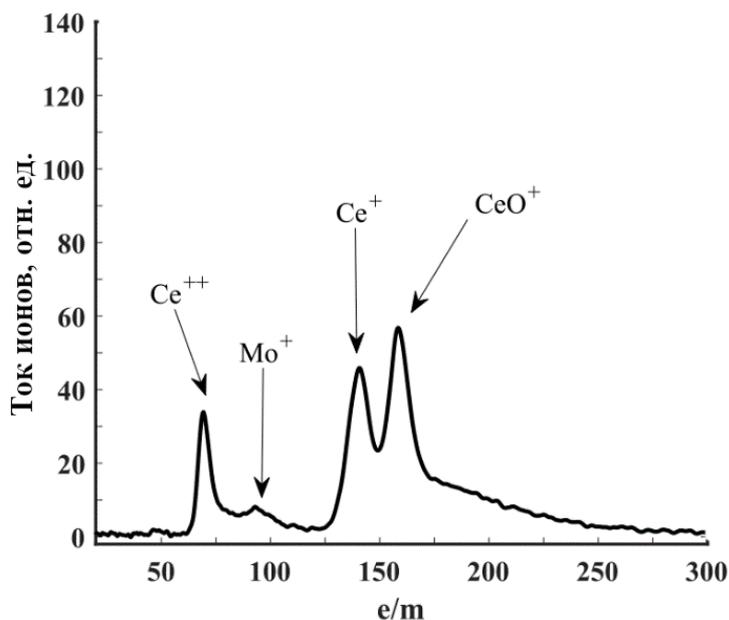


Рис. 8: Усредненные масс-спектры ионов плазмы в нестационарном режиме горения дуги, возникающем после пробоя промежутка [42]

В потоке могут появляться ионы Ce^{++} , существенно возрастает доля молекулярных ионов CeO^{+} . Существование длительного нестационарного периода горения разряда отрицательно сказывается на его свойствах как источника плазмы из-за непредсказуемости ионного состава. Выдвинуто предположение, что увеличение средней температуры работы катода сократит его длительность.

Раздел 3.6 посвящен выводам к третьей главе, в нем перечислены основные полученные результаты. Они опубликованы в работе [3; 7; 10].

В четвертой главе описаны результаты исследований вакуумной дуги с ДКП на катоде из бинарной смеси оксида и металла. Кроме изучения состава генерируемой плазмы ставилась задача определить какой из режимов испарения реализуется, селективный или конгруэнтный. Использовались катодные смеси из оксидов церия (CeO_2) и титана (TiO_2) с металлически хромом (Cr). Оксиды были представлены в виде порошка, а хром в виде порошка или чешуек. Хром моделировал испарение и ионизацию неэммитирующих легко испаряющихся продуктов деления, находящихся в составе ОЯТ, а оксиды — тугоплавкий диоксид урана.

В разделе 4.1 приведено сравнение физических свойств исследованных в главе катодных материалов. Согласно справочным данным [68; 69] давление насыщенных паров TiO_2 , CeO_2 и Cr в диапазоне температур от 1.7 до 2.2 кК относятся примерно как $1:10:10^3$. При этом плотности тока ТЭЭ, вычисленная по формуле Ричардсона с использованием табличных данных о работах выхода электронов [70], соотносятся как $1:10^3:10^{-2}$. Таким образом, ожидалось, что основным источником плазмаобразующей среды в составе бинарных смесей оксидов с металлом является Cr , а эмиттером электронов выступают оксиды. При наличии в составе катода металлической составляющей влияние относительно низкой электрической проводимости оксидов на характеристиках разряда сказываться не должно.

В разделе 4.2 представлены результаты исследования вакуумной дуги, реализованной на катоде из смеси порошка CeO_2 и чешуек Cr (размер чешуек порядка 3 мм) [35]. Массы оксида и металла были одинаковы. Был реализован диффузный разряд в диапазоне токов от 30 до 110 А, напряжений от 6 до 11 В и температуры катода от 1.95 до 2.25 кК. Исследован тепловой режим работы смесового катода. Экспериментально обнаружены режимы, при которых наблюдается эмиссионное охлаждение катода в присутствии дуги. Величина теплового потока, отдаваемого катодом плазме, достигала 150 Вт. Проведен анализ спектров излучения плазмы потока. Показано, что при токах разряда менее 60 А в спектре излучения присутствуют только спектральные линии Cr , только при увеличении тока в составе излучения появляются линии Ce . Излучение молекулярных линий не обнаружено. Была измерена температура электронов плазмы при помощи одиночного зонда и методом относительных интенсивностей спектральных линий. При изменении тока дуги от 30 до 100 А, температура электронов не изменялась и находилась на уровне 0.5 эВ. По самопоглощению спектральных линий атомов хрома оценена его концентрация вблизи отверстия катодного тигля, которая составила порядка 10^{13} см^{-3}

при температуре катода 2.2 кК. Проведено сравнение характеристик разрядов на катоде из CeO_2 с добавкой металла и на катоде из чистого CeO_2 . Показано, что на смешанном катоде наблюдаются значительно меньшие напряжения горения дуги. ВАХ разряда на смеси перестала быть линейно возрастающей. Последнее, одновременно с наблюдавшимся эффектом эмиссионного охлаждения, позволяет предположить, что металлическая добавка Cr в составе катода улучшила электрическое сопротивление контакта катод–тигель, в котором уменьшилось выделение Джоулева тепла. За счет этого изменился вид ВАХ и изменился тепловой режим работы катода. Благодаря этому, в разряде удалось пронаблюдать эффект эмиссионного охлаждения катода.

В разделе 4.3 представлены результаты исследования вакуумной дуги, реализованной на катодах из смесей порошков $\text{CeO}_2 + \text{Cr}$ и $\text{TiO}_2 + \text{Cr}$. Соотношение масс оксида к металлу в смеси в большинстве экспериментов составляло 2:1. Пористость катодов составляла около 40 %. Разряды исследовались в диапазоне температур катода 1.8–2.1 кК и токов от 30 до 90 А. Показано, что напряжение разрядов по-разному реагирует на изменение температуры катода при фиксированном токе. Для катода с TiO_2 напряжение было практически постоянным, а для катода с CeO_2 оно убывало при росте температуры. Последнее проиллюстрировано на рисунке 9. Также отличались тепловые режимы работы катодов. В отличие от смеси с CeO_2 , на катоде с TiO_2 эмиссионного охлаждения не наблюдалось.

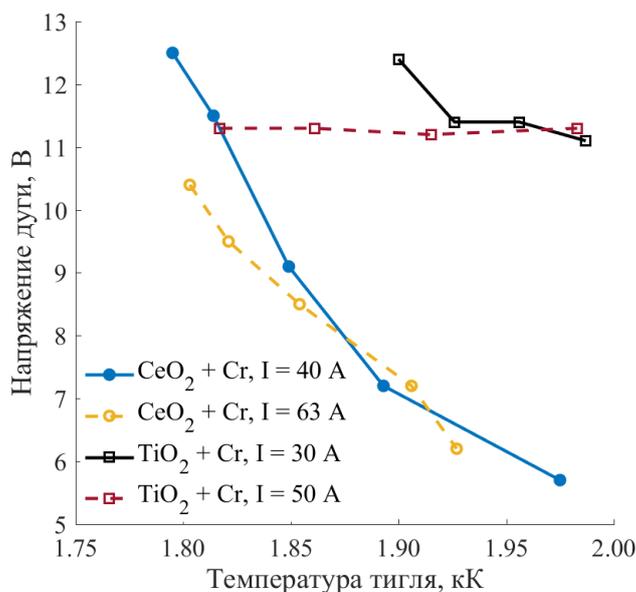


Рис. 9: Зависимости напряжений разрядов от температуры смешанных катодов [2]

Изучен внешний вид поверхности катодов во время горения разряда. Показано, что в исследованном диапазоне параметров дуга на катоде из смеси

$\text{CeO}_2 + \text{Cr}$ горит в с диффузной привязкой тока, а дуга на катоде из смеси $\text{TiO}_2 + \text{Cr}$ характеризуется контракцией тока на катоде. Капельная фракция в продуктах эрозии катодов не наблюдалась. Изображения плазменных струй вакуумных дуг и поверхностей катодов приведено на рисунке 10.

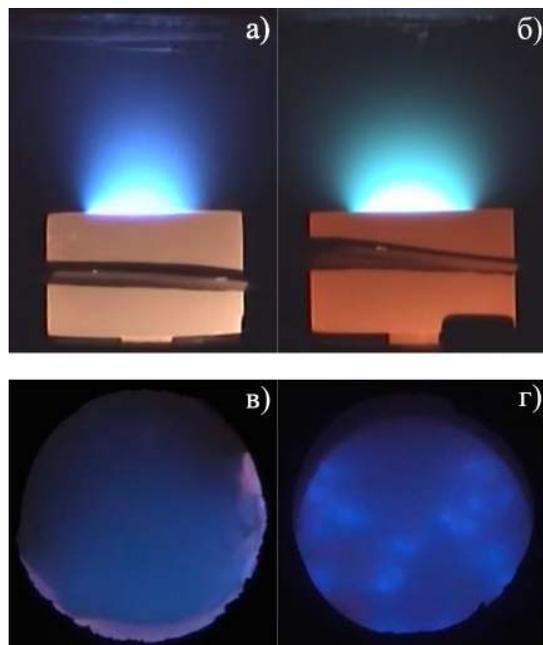


Рис. 10: Внешний вид столба дуги на катодах $\text{CeO}_2 + \text{Cr}$ (а) и $\text{TiO}_2 + \text{Cr}$ (б); поверхность катода $\text{CeO}_2 + \text{Cr}$ (в) и катода $\text{TiO}_2 + \text{Cr}$ (г) во время работы дуги [2]

Показано, что электронная температура генерируемой плазмы в дуге с катодом из $\text{TiO}_2 + \text{Cr}$ плазмы составляла около 0.5 эВ и оставалась неизменной в пределах погрешности измерения при изменении температуры катода. В дуге с катодом из $\text{CeO}_2 + \text{Cr}$ она реагировала на напряжение и монотонно возрастала при фиксированном токе, то есть была управляемой (температура электронов возрастала на 0.5 эВ при повышении напряжения от 6 до 10 В). Измерения среднего заряда тяжелых частиц потоков плазмы показали, что на катоде с TiO_2 увеличение тока дуги от 50 до 90 А не изменяет средний заряд, он находится на уровне 0.2. В дуге на катоде с CeO_2 средний заряд возрастал от 0.3 до 0.6 при увеличении тока от 40 до 90 А. Таким образом, можно сделать вывод, что степень ионизации генерируемой плазмы в дуге с катодом из $\text{CeO}_2 + \text{Cr}$ в целом выше, чем в дуге с катодом $\text{TiO}_2 + \text{Cr}$. Были получены данные об ионном составе плазменных потоков. Показано, что основным компонентом плазменного потока в дуге с катодом $\text{CeO}_2 + \text{Cr}$ являются ионы Cr^+ . Количество ионов Ce^+ становилось сопоставимым с количеством ионов Cr^+ только в длительном эксперименте, когда вещество расходуемого катода заканчивалось (заканчивался Cr в его составе) или при повышении тока до 90 А. В разряде с катодом из $\text{TiO}_2 + \text{Cr}$ плазменный поток состоял из

ионов Ti^+ и Cr^+ . Ионы Ti^+ составляли примерно 30% от общего количества ионов. Ионов O^+ обнаружено не было. На рисунке 11 представлены типичные масс-спектры ионов, образующихся в потоках плазмы дуговых разрядов.

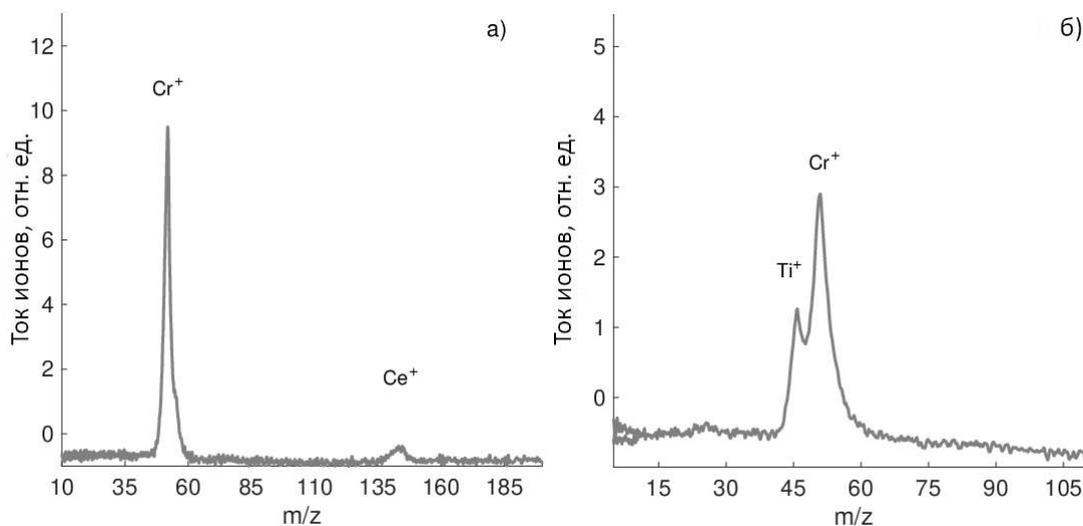


Рис. 11: Масс-спектры ионов в заанодной плазме вакуумной дуги с катодами из смесей CeO_2+Cr (а) и TiO_2+Cr (б) [2]

Также в разделе проводится обсуждение полученных отличий в параметрах плазменных потоков. Делается вывод, что оно обусловлено различными типами привязки тока разряда на поверхности катода.

Раздел 4.4 посвящен выводам к четвертой главе, в нем перечислены основные полученные результаты. Они опубликованы в работе [2].

Пятая глава посвящена применению свойств разрядов с горячими термоэмиссионными катодами в задаче плазменной масс-сепарации веществ, а также диагностике результатов разделения.

В **разделе 5.1** описана схема плазменной масс-сепарации в конфигурации с потенциальной ямой [71]. Представлено краткое обоснование актуальности проблемы замыкания ядерного топливного цикла и описаны преимущества плазменного подхода к переработке ОЯТ. Описана концепция разделения элементов в плазме, предложенная академиком РАН Смирновым В.П., которая предполагает разделение на массовые группы в схеме со скрещенными однородным магнитным и неоднородным радиальным электрическим полями [71]. Приведены данные численных расчетов, которые позволили определить конкретные величины напряженности магнитного поля и величины электрического потенциала, приводящие к разделению траекторий тяжелых и легких ионов [72]. Рассмотрены различные конфигурации радиального электрического поля, и их влияние на разделение траектории ионов. Представлен краткий обзор установки плазменного разделения веществ, разработанной в

ОИВТ РАН, для демонстрации эффекта разделения. Приведена ее принципиальная схема и проведен краткий обзор выполненных экспериментов по генерации буферной плазмы и воспроизведению в ней заданных распределений электрического потенциала.

В разделе 5.2 рассматриваются вопросы применения ТЭЭ для генерации электрического поля в объеме плазменного сепаратора и для ионизации модельных веществ в источнике сепарируемой плазмы. Описан демонстрационный источник плазмы, в котором производится независимое управление подачей пара плазмообразующего вещества и электронов ТЭЭ с катода. Испаряемое вещество находится в молибденовом тигле, который нагревается при помощи высокочастотного излучения от располагающейся вокруг него антенны. Пар поступает в разрядный промежуток представленный термокатодом из LaB_6 и охлаждаемым анодом с центральным отверстием для выхода плазмы. Разделение процессов испарения вещества и генерации термоэлектронов позволяет варьировать атом-электронное отношение в процессе работы источника и управлять напряжением разряда и параметрами генерируемого плазменного потока. На примере испарения и ионизации в источнике плазмы смеси свинца (Pb) и серебра (Ag), моделирующих динамику движения продуктов ОЯТ, показана возможность поддержания стационарной работы разряда при постоянном напряжении в присутствии веществ с существенной разницей в давлении насыщенных паров. Данная конструкция источника плазмы позволила осуществить экспериментальную демонстрацию эффекта плазменной сепарации.

Описаны проблемы создания контролируемого радиального электрического поля в отражательном разряде Пеннинга в объеме сепаратора в присутствии плазменной струи источника плазмы, которая заключается в существенном искажении картины потенциала инжектируемой струей металлической плазмы. Объяснены причины разрушения потенциальной ямы, которые заключаются в нарушении условий протеканий радиального тока буферного разряда из-за недостатка электронов компенсирующий объемный заряд ионов, поступающих из инжектируемой плазменной струи. Показано, что использование термо катода в составе электродов отражательного разряда Пеннинга позволяет стабилизировать и восстановить профиль электрического потенциала в присутствии инжектируемой плазменной струи.

Описаны результаты экспериментов, демонстрирующих эффект плазменной сепарации модельной смеси Pb и Ag с использованием источника плазмы с независимой подачей паров разделяемых веществ и электронов ТЭЭ и

отражательного разряда Пеннинга с термокатодом. Схема процесса разделения и результаты приведены на рисунке 12.

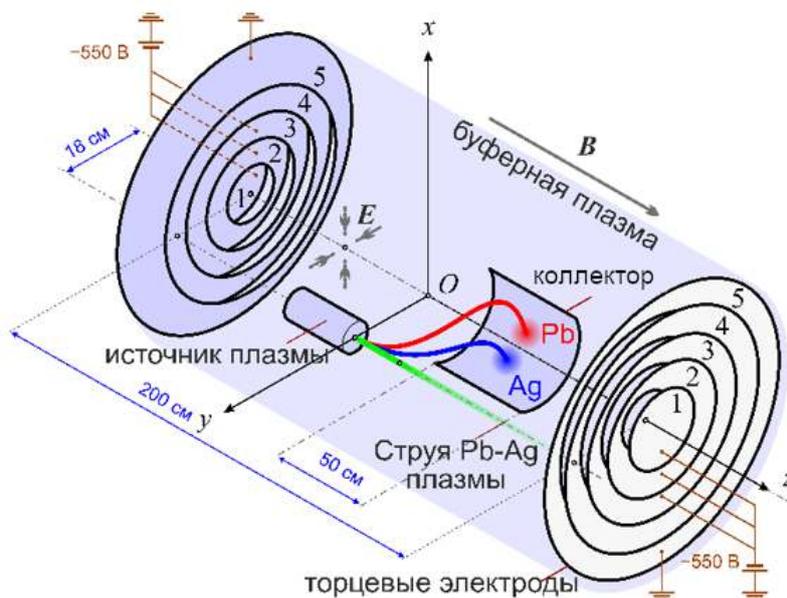


Рис. 12: Схема масс сепарации с потенциальной ямой [6]

В разделе 5.3 описаны разработанные метод диагностики результатов плазменной масс-сепарации. Их было реализовано три: измерение массового распределения осевшего вещества по поверхности принимающего коллектора, распределение по нему компонентов разделяемой смеси и распределение ионных токов сепарируемых пучков. Тестирование методов проводилось в экспериментах по плазменному разделению модельной смеси Pb и Ag, моделирующих динамику движения элементов ОЯТ.

Для улавливания сепарируемых веществ предложено использовать коллектор, разбитый на секции. Он имел форму боковой поверхности цилиндра и располагался на расстоянии около 20 см от оси камеры масс-сепаратора. Коллектор имел систему водяного охлаждения. Длина коллектора составляла около 50 см, а ширина — около 30 см. На коллекторе располагалось несколько наборов приемников, которые служили для определения массового распределения осевшего вещества, распределения ионных токов и распределения компонентов смеси. Размер приемников составлял $1.8 \times 1.8 \text{ см}^2$. Измерительные приемники устанавливались рядами.

Определение массового распределения собираемого вещества по коллектору проводилось при помощи алюминиевых приемников с развитой поверхностью, назначение которой — повышение коэффициента сбора вещества. Использовались приемники, имевшие продольные прорезы с отношением ширины к глубине равной трем. По данным предварительных экспериментов было

определено, что приемники с такой поверхностью позволяют собирать до 80% достигающего коллектор вещества, тогда как приемники с плоской — около 50%. Распределение собранной массы на коллекторе производилось путем установки приемников по всей или части его поверхности и их взвешиванием до и после эксперимента. Установка и взвешивание приемников на отдельных координатах коллектора позволяла путем интерполяции проводить оценку полного количества собираемого вещества.

Для измерения распределение сепарированных веществ на коллектор устанавливались плоские приемники из алюминия. Осевшая пленка на них анализировалась методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС). Используемая при анализе энергия электронов составляла 15 кэВ, что позволяло определять состав пленки толщиной не более нескольких микрометров. Пример измеренного распределения процентного содержания элементов, осевших на приемниках, располагавшихся вдоль коллектора, приведен на рисунке 13 (содержание кислорода не приведено). Также на нем представлено распределение осевшей массы на данных приемниках. Из рисунка видно, что на коллекторе локализованы области осаждения серебра и свинца. Расстояние между областями составляет около 10 см. Координата максимума распределения массы совпадает с координатой максимума осаждения свинца, что ожидаемо из-за большей атомной массы последнего. Содержание железа — конструкционного материала торцевых электродов достаточно мало. Также приведено распределение содержания алюминия, что демонстрирует корректность определения состава. То есть при анализе энергии электронов было достаточно для проникновения до материала приемника, располагающегося под пленкой из сепарированного вещества.

Токовый метод диагностики основан на измерении распределения ионных токов на поверхности принимающего коллектора при помощи набора из шестнадцати плоских зондов. Измерялись ионные ветви ВАХ зондов и определялись ионные токи насыщения. Ионный ток на отдельный зонд в процессе эксперимента по плазменной сепарации складывался из тока ионов модельного вещества и тока ионов буферного разряда Пеннинга. Для выделения ионной компоненты Рb или Ag производилась процедура калибровки. Перед началом процесса сепарации измерялись ионные токи только от буферного разряда. Далее из распределения токов, зарегистрированных в процессе сепарации, вычитался ток буферного разряда. Получающееся распределение в результате соответствовало распределению ионных потоков сепарируемых пучков вблизи коллектора.

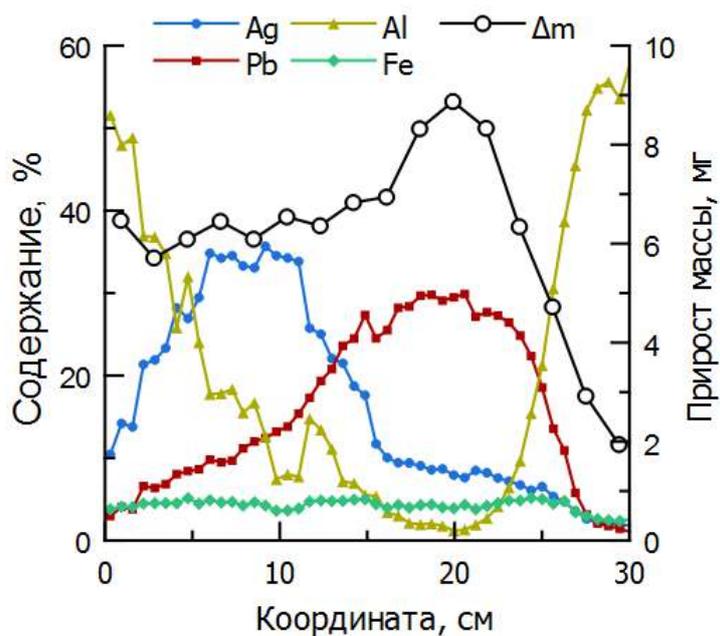


Рис. 13: Распределение содержания веществ на коллекторе, измеренное методом ЭДС, после эксперимента по плазменной сепарации смеси Ag и Pb

Результаты измерений распределения токов согласуются с данными о распределении химических элементов в составе оседающих на коллектор покрытий, полученных методом ЭДС. Таким образом, результат масс-сепарации был подтвержден тремя независимыми измерениями.

В разделе 5.4 описана разработанная система количественной диагностики неионизованных потерь вещества в процессе плазменной масс-сепарации и результаты ее применения. Обоснована актуальность данной проблемы и причины возникновения потерь вещества в процессе сепарации. Описана созданная система диагностических коллекторов вещества, осаждающегося на боковую поверхность камеры плазменного сепаратора, состоящая из набора плоских взвешиваемых алюминиевых приемников. Фотография коллекторов, расположенных внутри камеры сепаратора изображена на рисунке 14. Представлен алгоритм обработки данных результатов осаждения. Приведено описание экспериментов с ее использованием, в ходе которых были получены данные о количестве потерь, по отношению к количеству сепарированного вещества и инжектированного источником плазмы.

В результате проведенных экспериментов определены геометрические характеристики вылета нейтрального неионизованного вещества из источника плазмы в процессе сепарации. Определены координаты преимущественно осаждения неионизованного вещества внутри вакуумной камеры плазменного сепаратора. Показано, что поток нейтральных частиц не может исказить



Рис. 14: Фотография, иллюстрирующая расположение диагностических коллекторов внутри камеры сепарации [4]

распределение сепарированных ионов на коллекторе. Зарегистрированная доля потерь в демонстрационном эксперименте оказалась равной 0.7.

Раздел 5.5 посвящен выводам к пятой главе, в нем перечислены основные полученные результаты. Они опубликованы в работах [4–6].

В Заключение сформулированы наиболее важные полученные результаты:

1. Впервые экспериментально измерены параметры плазменного потока диффузной вакуумной дуги на термоэмиссионном катоде гадолиния. Получены данные о влиянии температуры термоэмиссионного катода (1.8–2.1 кК) и напряжения разряда (3–30 В) на зарядовый состав, степень ионизации и энергию ионов образующегося потока плазмы.
2. Экспериментально достигнуты параметры плазменного потока в условиях диффузного вакуумного дугового разряда, на катоде из гадолиния, моделирующего ОЯТ, удовлетворяющие требованиям к источнику плазмы для метода плазменной масс-сепарации ОЯТ — степень ионизации потока 100 % при преимущественно однократном заряде ионов.
3. Впервые инициирован и исследован диффузный вакуумный дуговой разряд на характеризующемся недостатком термоэлектронной эмиссии катоде из свинца, моделирующем испарение и ионизацию легколетучих продуктов деления ОЯТ. Определены средняя энергия ионов (12–15 эВ),

температура электронов (0.5–1 эВ), а также степень ионизации образующегося потока плазмы (10–35 %) в зависимости от тока разряда (10–30 А).

4. Получены новые экспериментальные данные о скорости эрозии и тепловом режиме работы нетермоэмиссионного катода из свинца. С учетом измеренных параметров плазмы в разрядном промежутке рассчитаны характерные длины столкновительных и ионизационных процессов и параметры плазмы вблизи катода разряда. Полученные результаты согласуются с гипотезой о преимущественно ионном механизме переноса тока дуги на данном типе катода.
5. Впервые инициирован и исследован вакуумный дуговой разряд на катоде из диэлектрического материала — диоксида церия, моделирующего испарение и ионизацию оксидов основных компонентов ОЯТ. Получены новые экспериментальные данные о тепловом режиме работы диэлектрического катода, определены параметры образующегося потока плазмы оксидного материала в дуге в зависимости от тока разряда (концентрация и температура электронов, ионный состав, степень ионизации). Определена величина тока дуги (~ 90 А), при которой степень ионизации плазменного потока превышает 90 %. Оценен вклад омического нагрева электрического контакта катод–тигель в баланс энергии катода.
6. Впервые описаны медленно движущиеся катодные пятна на диэлектрическом катоде вакуумной дуги с высокой средней температурой. Определена скорость движения пятен (~ 5 см/с).
7. Исследованы вакуумные дуговые разряды с горячими смесевыми катодами оксид+металл ($\text{CeO}_2 + \text{Cr}$, $\text{TiO}_2 + \text{Cr}$), моделирующими испарение и ионизацию компонентов ОЯТ, определены параметры генерирующихся в них плазменных потоков (температура электронов, ионный состав, степень ионизации). Экспериментально продемонстрировано, что при интенсивной термоэлектронной эмиссии с катода оксид+металл (ток термоэмиссии сравним с током разряда), поток плазмы содержит преимущественно ионы более летучего компонента смеси (Cr^+) за счет формирования диффузной привязки тока. При недостатке электронной эмиссии, поток плазмы содержит ионы обоих компонент смеси (Ti^+ и Cr^+).

8. Предложен подход для создания ионизованных потоков веществ в источнике плазмы для реализации метода плазменной сепарации и генерации устойчивого поперечного электрического поля в отражательном разряде.
9. Разработан метод диагностики результатов процесса плазменной масс-сепарации, позволяющий проводить измерения пространственного распределения ионных потоков разделяемой смеси, массового и элементного распределения отсепарированного вещества на принимающем коллекторе, а также координат осаждения неионизованного вещества, не принимавшего участия в процессе разделения.

Основные публикации по теме диссертации

1. *Polistchok V., Usmanov R., Melnikov A., Gavrikov A.* Diffuse Vacuum Arc on Lead Cathode: Plasma Parameters and Mechanism of the Charge Transfer on the Non-thermionic Cathodes // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2026. — Vol. 2. — P. 1–5.
2. *Usmanov R., Melnikov A., Polistchok V., Gavrikov A., Antonov N., Smirnov V.* Influence of Mixed Cathode Emissivity on Generated Plasma Flow in Vacuum Arc with Heated Cathode // Plasma Chemistry and Plasma Processing. — 2024. — Oct. — Vol. 45, no. 1. — P. 21–32.
3. *Usmanov R. A., Amirov R. K., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Polistchok 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. — June. — Vol. 25, no. 6. — P. 063524.
4. *Usmanov R. A., Antonov N. N., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Melnikov A. D., Oiler A. P., Smirnov V. P., Timirkhanov R. A., Volkov L. S., Vorona N. A.* Analysis of non-ionized substance losses in experiments on plasma mass separation // Plasma Science and Technology. — 2022. — June. — Vol. 24, no. 8. — P. 085504.
5. *Лизьякин Г. Д., Гавриков А. В., Кузьмичёв С. Д., Смирнов В. П., Усманов Р. А.* Контроль радиального электрического поля в цилиндрическом плазменном столбе с аксиальным магнитным полем // Успехи физических наук. — 2024. — Т. 194, № 5. — С. 495–519.
6. *Лизьякин Г. Д., Антонов Н. Н., Ворона Н. А., Гавриков А. В., Кисленко С. А., Кузьмичев С. Д., Мельников А. Д., Ойлер А. П., Смирнов В. П., Тимирханов Р. А., Усманов Р. А.* О концепции плазменной масс-сепарации в скрещенных ЕхВ-полях с потенциальной ямой (обзор) // Физика плазмы. — 2023. — Т. 49, № 3. — С. 278–287.
7. *Amirov R. K., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Polistchok V. P., Pershin D. A., Samoylov I. S., Smirnov V. P., Usmanov R. A., Vorona N. A., Yartsev I. M.* On the parameters of the diffused vacuum arc with cerium oxide hot cathode // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 946. — P. 012170.

8. *Amirov R. K., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Polishchuk V. 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.
9. *Amirov R. K., Vorona N. A., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Polistchok V. P., Samoylov I. S., Smirnov V. P., Usmanov R. A., Yartsev I. M.* Plasma jet characteristics in vacuum arc with diffuse cathode spot // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Vol. 830. — P. 012059.
10. *Amirov R. K., Vorona N. A., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Polistchok V. P., Samoylov I. S., Smirnov V. P., Usmanov R. A., Yartsev I. M., Ivanov A. S.* Diffuse vacuum arc with cerium oxide hot cathode // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 774. — P. 012190.
11. *Amirov R. K., Antonov N. N., Liziakin G. D., Polistchok V. P., Samoylov I. S., Usmanov R. A., Yartsev I. M.* High-voltage discharge in supersonic jet of plumbum vapor // Journal of Physics: Conference Series. — 2015. — Vol. 653. — P. 012165.
12. *Амиров Р. Х., Ворона Н. А., Гавриков А. В., Лизьякин 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.
13. *Amirov R. K., Antonov N. N., Vorona N. A., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Polistchok V. P., Samoylov I. S., Smirnov V. P., Usmanov R. A., Yartsev I. M.* The stationary vacuum arc on non-thermionic hot cathode // Journal of Physics: Conference Series. — 2015. — Vol. 653. — P. 012164.
14. *Амиров Р. Х., Ворона Н. А., Гавриков А. В., Лизьякин Г. Д., Полищук В. П., Самойлов И. С., Смирнов В. П., Усманов Р. А., Ярцев И. М.* Исследование возможности применения диффузной вакуумной дуги как источника плазмы для разработки технологии плазменной сепарации ОЯТ и РАО // Ядерная физика и инжиниринг. — 2014. — Т. 5, № 11/12. — С. 952–955.
15. *Амиров Р. Х., Ворона Н. А., Гавриков А. В., Жабин С. Н., Лизьякин Г. Д., Полищук В. П., Самойлов И. С., Смирнов В. П., Усманов Р. А., Ярцев И. М.* Экспериментальное исследование процессов вакуумно-дуго-

вого испарения и ионизации вещества (гадолиния), моделирующего уран, для разработки технологии плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива // Труды МФТИ. — 2014. — Т. 6, № 1. — С. 136—145.

16. *Amirov R., Vorona N., Gavrikov A., Lizyakin G., Polistchok V., Samoylov I., Smirnov V., Usmanov R., Yartsev I.* Investigation of plasma flow in vacuum arc with hot cathode // Journal of Physics: Conference Series. — 2014. — Vol. 550. — P. 012014.

Список публикаций соискателя

17. *Liziakin G., Usmanov R.* Current-voltage Characteristics of the high Pressure Reflex Discharge in Helium // *Physics Procedia*. — 2015. — Vol. 71. — P. 138–141.
18. *Gavrikov A. V., Vorona N. A., Liziakin G. D., Usmanov R. A., Samoylov O. O., Smirnov V. P., Timirhanov R. A.* Generation of a controlled potential profile in the plasma to develop plasma separation method // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2015. — Vol. 653. — P. 012163.
19. *Samokhin A., Gavrikov A., Liziakin G., Usmanov R., Smirnov V.* Experiment and Numerical Simulation of Peculiarities in the Development of Helium DC Discharge in Reflex Geometry // *Plasma and Fusion Research*. — 2016. — Vol. 11, no. 0. — P. 1401116.
20. *Liziakin G. D., Gavrikov A. V., Murzaev Y. A., Usmanov R. A., Smirnov V. P.* Parameters influencing plasma column potential in a reflex discharge // *Physics of Plasmas*. — 2016. — Vol. 23, no. 12. — P. 123502.
21. *Gavrikov A., Kuzmichev S., Lizyakin G., Smirnov V., Timirkhanov R., Usmanov R., Vorona N.* RF plasma generation in the chamber with the conducting walls // *EPJ Web of Conferences*. — 2017. — Vol. 157. — P. 03062.
22. *Liziakin G., Gavrikov A., Usmanov R., Timirkhanov R., Smirnov V.* Electric potential profile created by end electrodes in a magnetized rf discharge plasma // *AIP Advances*. — 2017. — Vol. 7, no. 12. — P. 125108.
23. *Смирнов В. П., Гавриков А. В., Сидоров В. С., Тараканов В. П., Тимирханов Р. А., Кузьмичев С. Д., Усманов Р. А., Ворона Н. А.* Исследование влияния параметров инжекции на движение частиц в электрических и магнитных полях для развития метода плазменной сепарации ОЯТ // *Физика плазмы*. — 2018. — Т. 44, № 12. — С. 961–970.
24. *Liziakin G. D., Gavrikov A. V., Usmanov R. A., Smirnov V. P.* Propagation of the end-face electrodes potential in the plasma volume of rf discharge // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2018. — Vol. 946. — P. 012173.

25. *Antonov N., Liziakin G., Usmanov R., Gavrikov A., Vorona N., Smirnov V.* The influence of reflex discharge electric field on propagation of injected lead plasma jet // *Physics of Plasmas*. — 2018. — Vol. 25, no. 12. — P. 123506.
26. *Antonov N. N., Gavrikov A. V., Smirnov V. P., Liziakin G. D., Usmanov R. A., Vorona N. A., Timirkhanov R. A.* The study of the plasma jets of lead and silver simulating spent nuclear fuel components // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2018. — Vol. 946. — P. 012171.
27. *Мельников А. Д., Усманов Р. А., Ворона Н. А., Гавриков А. В., Лизьякин Г. Д., Смирнов В. П., Тимирханов Р. А.* Диагностика высокочастотной плазмы аргона методом относительных интенсивностей спектральных линий в плазменном сепараторе ОЯТ // *Ядерная физика и инжиниринг*. — 2018. — Т. 9, № 2. — С. 117–121.
28. *Melnikov A. D., Usmanov R. A., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Smirnov V. P., Timirkhanov R. A., Vorona N. A.* Application of line-intensity-ratio method for measurement of electron temperature of radio-frequency plasma of argon in magnetic field inside the plasma separator // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2019. — Vol. 1147. — P. 012131.
29. *Antonov N. N., Usmanov R. A., Gavrikov A. V., Smirnov V. P.* Diffuse arc discharge with a hot cathode in a magnetic field as a plasma source of lead and silver mixture for the problem of spent nuclear fuel reprocessing // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2019. — Vol. 1147. — P. 012133.
30. *Liziakin G. D., Gavrikov A. V., Usmanov R. A., Smirnov V. P.* The electric field of the electrodes immersed into the rotating plasmas // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2019. — Vol. 1147. — P. 012130.
31. *Usmanov R., Melnikov A., Gavrikov A., Antonov N., Polistchook V.* Time-of-flight mass spectrometer for diagnostics of continuous plasma flow // *Review of Scientific Instruments*. — 2022. — Vol. 93, no. 7. — P. 073505.
32. *Vorona N. A., Gavrikov A. V., Kuzmichev S. D., Liziakin G. D., Melnikov A. D., Murzaev Y. A., Smirnov V. P., Timirkhanov R. A., Usmanov R. A.* Large Helicon Plasma Source for the Method of Plasma Separation of Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2019. — Vol. 47, no. 2. — P. 1223–1230.

33. *Samokhin A., Gavrikov A., Kuzmichev S., Timirkhanov R., Vorona N., Smirnov V., Usmanov R.* Numerical Simulation of Characteristics of Uranium and Fission Products Ion Fluxes in the Process of Plasma Separation // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2019. — Vol. 47, no. 3. — P. 1546–1552.
34. *Смирнов В. П., Самохин А. А., Гавриков А. В., Кузьмичев С. Д., Усманов Р. А., Ворона Н. А.* О возможности осуществления плазменной сепарации компонентов отработавшего ядерного топлива в неоднородном магнитном поле // Физика плазмы. — 2019. — Т. 45, № 5. — С. 452–456.
35. *Usmanov R. A., Amirov R. K., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Melnikov A. D., Polistchok V. P., Samoylov I. S., Smirnov V. P., Vorona N. A., Yartsev I. M.* Diffuse vacuum arc with heated cathode made of ceramic (CeO₂) and metal (Cr) mixture // Plasma Sources Science and Technology. — 2020. — Vol. 29, no. 1. — P. 015004.
36. *Мельников А. Д., Усманов Р. А., Амиров Р. Х., Антонов Н. Н., Гавриков А. В., Лизьякин Г. Д., Полищук В. П., Смирнов В. П.* Исследование зарядового состава плазмы диффузной вакуумной дуги на горячем катоде времяпролетным методом // Физика плазмы. — 2020. — Т. 46, № 6. — С. 510–515.
37. *Полищук В. П., Усманов Р. А., Мельников А. Д., Ворона Н. А., Ярцев И. М., Амиров Р. Х., Гавриков А. В., Лизьякин Г. Д., Самойлов И. С., Смирнов В. П., Антонов Н. Н.* Вакуумные дуговые разряды с диффузной катодной привязкой (обзор) // Теплофизика высоких температур. — 2020. — Т. 58, № 4. — С. 515–535.
38. *Liziakin G., Antonov N., Smirnov V. S., Timirkhanov R., Oiler A., Usmanov R., Melnikov A., Vorona N., Kislenko S., Gavrikov A., Smirnov V. P.* Plasma mass separation in configuration with potential well // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2021. — Vol. 54, no. 41. — P. 414005.
39. *Liziakin G., Antonov N., Usmanov R., Melnikov A., Timirkhanov R., Vorona N., Smirnov V. S., Oiler A., Kislenko S., Gavrikov A., Smirnov V. P.* Experimental demonstration of plasma mass separation in a configuration with a potential well and crossed electric and magnetic fields // Plasma Physics and Controlled Fusion. — 2021. — Vol. 63, no. 3. — P. 032002.

40. *Melnikov A. D., Usmanov R. A., Gavrikov A. V., Polistchok V. P., Antonov N. N., Samoylov I. S., Smirnov V. P.* Temporal Evolution and Operation Peculiarities of Plasma Source Based on Vacuum Arc with CeO₂ Cathode // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. — 2022. — Vol. 43, no. 1. — P. 347–360.
41. *Polishchuk V. P., Usmanov R. A., Melnikov A. D., Yartsev I. M.* On the Stability Of a Vacuum Arc with a Diffuse Hot Cathode Attachment // *High Temperature Material Processes An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. — 2023. — Vol. 27, no. 3. — P. 43–49.
42. *Vetrova S. B., Usmanov R. A., Antonov N. N., Melnikov A. D., Polishchuk V. P.* Parameters of the Ion Flux Generated in a Vacuum Arc With a Dielectric Cathode in the First Minutes After Breakdown // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2023. — Vol. 51, no. 4. — P. 1101–1106.
43. *Усманов Р. А., Мельников А. Д.* О методе диагностики плазменной сепарации по спектрам излучения // *Вестник ОИВТ*. — 2020. — Т. 4. — С. 35–38.
44. *Усманов Р., Антонов Н., Тимирханов Р., Ойлер А., Валинуров М.* Диагностика распределения токов разделяемых пучков на приемниках вещества плазменного сепаратора // *Вестник ОИВТ*. — 2024. — Т. 16. — С. 49–53.
45. *Усманов Р. А., Полищук В. П., Самойлов И. С., Валинуров М. А., Амиров Р. Х.* Экспериментальное исследование процесса инициации вакуумного дугового разряда постоянного тока в парах гадолиния с электронно-лучевым подогревом катода // *Вестник ОИВТ*. — 2023. — Т. 10. — С. 15–19.
46. *Ярцев И. М., Полищук В. П., Усманов Р. А.* Влияние внешнего подогрева катода на характеристики стационарных вакуумных дуг с диффузной катодной привязкой // *Вестник ОИВТ*. — 2023. — Т. 10. — С. 4–10.
47. *Oiler A. P., Usmanov R. A., Antonov N. N., Gavrikov A. V., Smirnov V. P.* Increasing the Efficiency of Plasma Mass Separation by Optimizing the Electric Potential // *Plasma Physics Reports*. — 2024. — Vol. 50, no. 5. — P. 588–596.

48. *Antonov N. N., Gavrikov A. V., Kuzmichev S. D., Melnikov A. D., Smirnov V. P., Usmanov R. A., Volkov L. S.* Enhanced CeO₂ evaporation from refractory crucibles (Mo, Ta, W) // Heat and Mass Transfer. — 2024. — Vol. 60, no. 10. — P. 1677–1685.
49. *Valinurov M., Usmanov R., Gavrikov A., Oiler A., Smirnov V.* Study of rotating “spoke” structure in reflex discharge with thermionic cathode // Physics Letters A. — 2025. — Vol. 534. — P. 130242.
50. *Антонов Н., Валинуров М., Гавриков А., Кузьмичев С., Мельников А., Ойлер А., Самойлов И., Смирнов В., Тимирханов Р., Усманов Р., Шумова В., Мочалов Ю., Савчиц С., Суханов Л.* Разработка и демонстрация основ плазменной переработки отработавшего топлива // Атомная энергия. — 2025. — Т. 138, № 1/2. — С. 42–47.
51. *Belostotskii A., Melnikov A., Usmanov R., Gavrikov A., Smirnov V.* Experimental study of charge composition of diffuse vacuum arc in axial magnetic field by optical spectra // Plasma Science and Technology. — 2025. — Т. 27, № 5. — С. 054003.
52. *Paramonov M., Melnikov A., Belostotskii A., Usmanov R., Gavrikov A., Polishchuk V.* Transient Processes during the Initiation and Stabilization of a Diffuse Vacuum Arc Discharge on a Gadolinium Cathode // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2025. — Т. 89, Suppl 2. — S218–S224.

Цитированная литература

53. *Anders A.* Cathodic arcs. From fractal spots to energetic condensation. — Springer Science+Business Media, 2008.
54. *Белевцев А. А., Горячев С. В., Исакаев Э. Х., Чиннов В. Ф.* Экспериментальное исследование системы «приэлектродная плазма–вольфрамовый катод» в сильноточных азотных дугах атмосферного давления // Теплофизика высоких температур. — 2013. — Т. 51, № 5. — С. 652–662.
55. *Паранин С. Н., Полищук В. П., Сычев П. Е., Шабашов В. И., Ярцев И. М.* Экспериментальное исследование теплового режима работы горячего испаряющегося катода в стационарной вакуумной дуге с диффузной катодной привязкой // Теплофизика высоких температур. — 1986. — Т. 24, № 3. — С. 422–429.
56. *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.
57. *Бронин С. Я., Полищук В. П., Сычев П. Е., Шабашов В. И., Ярцев И. М.* Препринт No 2-199. М.: ИВТАН. — 1986.
58. *Бронин С. Я., Полищук В. П., Сычев П. Е., Шабашов В. И., Ярцев И. М.* Скорость испарения катода и параметры плазмы в стационарной вакуумной дуге // Теплофизика высоких температур. — 1993. — Т. 31, № 1. — С. 29–35.
59. *Veerasingam V., Amaratunga G., Weiler M., Park J., Milne W.* A distributed carbene cathodic vacuum arc // Surface and Coatings Technology. — 1994. — Vol. 68/69. — P. 301–308.
60. *Anders A., Yushkov G. Y.* Ion flux from vacuum arc cathode spots in the absence and presence of a magnetic field // Journal of Applied Physics. — 2002. — Vol. 91. — P. 4824.
61. *Васин А. И., Дороднов А. М., Петросов В. А.* О существовании вакуумной дуги с распределенным разрядом на расходуемом катоде // Письма в ЖТФ. — 1979. — Т. 5. — С. 1499–1504.

62. *Батенин В. М., Климовский И. И., Полищук В. П., Синельщиков В. А.* Стационарная вакуумная дуга с диффузной катодной привязкой на неэмитирующем хромовом катоде // Теплофизика высоких температур. — 2003. — Т. 41, № 5. — С. 670–678.
63. *Polistchook V.* Qualitative model of ion charge transfer on non-thermionic cathodes in vacuum arc // VIII International Conference Plasma Physics and Plasma Technology. Minsk. Belarus. September 14-18, 2015. Contributed papers. Vol. 1. — 2015. — P. 47–50.
64. *Puchkarev V. F., Chesnokov S. M.* Erosion rate and voltage distribution in contracted (with cathode spot) and diffuse (spotless) low-current vacuum arcs // Journal of Physics D: Applied Physics. — 1992. — Vol. 25, no. 12. — P. 1760–1766.
65. *Kajioka H.* Characterization of arclike Ti vapor Plasma on the high-voltage electron-beam evaporator // Journal of Vacuum Science & Technology, A. — 1997. — Vol. 15. — P. 2728.
66. *Safonov V.* Plasma activated EB-deposition: Different modes of arc discharge and plasma characteristics // Problems of Atomic Science and Technology. — 2017. — Vol. 111, no. 5. — P. 65–72.
67. *Yushkov G. Y., Anders A., Oks E. M., Brown I. G.* Ion velocities in vacuum arc plasmas // Journal of Applied Physics. — 2000. — Vol. 88, no. 10. — P. 5618–5622.
68. Физические величины: Справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
69. *Казенас Е. К., Цветков Ю. В.* Испарение оксидов. — М.: Наука, 1997.
70. *Фоменко В.* Эмиссионные свойства материалов. Справочник. — Киев: Наукова думка, 1981.
71. *Смирнов В. П., Самохин А. А., Ворона Н. А., Гавриков А. В.* Исследование движения заряженных частиц в различных конфигурациях полей для развития концепции плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива // Физика Плазмы. — 2013. — Т. 39, № 6. — С. 523–533.
72. *Smirnov V. S., Egorov R. O., Kislenko S. A., Antonov N. N., Smirnov V. P., Gavrikov A. V.* Simulation of ion flux of actinides and uranium fission products in the plasma separator with a potential well // Physics of Plasmas. — 2020. — Vol. 27, no. 11. — P. 113503.

Научное издание

Усманов Равиль Анатольевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук на тему:

Испарение и ионизация веществ, моделирующих отработавшее ядерное топливо, в стационарных вакуумных дугах с горячими расходуемыми катодами

Подписано в печать 25.03.2026.

Тираж 100 экз. Заказ 256.

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