

На правах рукописи



Усманов Равиль Анатольевич

**Испарение и ионизация веществ,
моделирующих отработавшее ядерное топливо,
в вакуумном дуговом разряде с подогреваемым
катодом**

01.04.08 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018

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

Научный руководитель: **Гавриков Андрей Владимирович**
кандидат физико-математических наук,
доцент

Официальные оппоненты: **Паперный Виктор Львович**
доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»

Хрипунов Борис Иванович
кандидат физико-математических наук,
ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

Защита состоится 30 мая 2018 г. в 11:00 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 ОИВТ РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2018 г.

Отзывы и замечания по автореферату просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя и.о. ученого секретаря диссертационного совета.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



Василяк Л. М.

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию процессов испарения и ионизации веществ, моделирующих отработавшее ядерное топливо (ОЯТ), в вакуумном дуговом разряде с подогреваемым катодом.

Актуальность темы исследования

Газовый разряд знаком исследователям уже более двух веков, и с тех пор было предложено значительное количество всевозможных источников плазмы на его основе, однако физика протекающих в нем разрядных процессов описана далеко не полностью, и существуют разделы, изученные явно недостаточно. К таким направлениям относится вакуумный дуговой разряд с подогреваемым катодом, изучению которого посвящена данная работа. Следует отметить, что интерес к такого рода дугам связан не только с чисто физическими вопросами о свойствах возникающей плазмы и процессами эрозии материала катода, но и с вопросами о механизмах замыкания тока на катодах с высокой и низкой термоэмиссионной способностью, с горением разряда на керамическом рабочем веществе и т.д.. Другим фактором, делающим представленные исследования крайне актуальными, является разработка плазменных технологий нового поколения для переработки ОЯТ, что в свою очередь необходимо для развития атомной энергетики и, прежде всего, для замыкания ядерного топливного цикла и сокращения захораниваемых отходов. Среди задач, которые должны быть решены в ходе создания метода плазменной переработки, существует проблема перевода конденсированного вещества отработавшего топлива в плазменное состояние. Источник плазмы для этой цели должен отвечать целому ряду достаточно противоречивых требований: плазма ОЯТ должна быть представлена преимущественно ионами одинаковой кратности, ее степень ионизации должна быть близка к 100%, а производительность плазменного источника — находиться на уровне 100 г/ч. Одним из перспективных методов испарения и ионизации для поставленной задачи является диффузная вакуумная дуга с подогреваемым катодом. Основными преимуществами данного типа вакуумного разряда как источника являются высокая степень ионизации образующейся плазмы и отсутствие в ее потоке микрокапельной фракции эродирующего катода, что вызвано сочетанием стационарности разряда и достаточно низкой плотности тока на катоде ($j = 10 - 100 \text{ А/см}^2$). Наличие внешнего подогревателя катода позволяет управлять свойствами образующегося плазменного потока. Для апробации данного источника в целях плазменной технологии переработки необходимо

на начальном этапе произвести исследование процессов испарения и ионизации неактивных модельных веществ. В качестве таких катодных материалов, с перспективой дальнейшей работы разряда на ОЯТ, были выбраны гадолиний, свинец и диоксид церия. Ожидаемые в работе результаты могут оказаться полезными как с точки зрения разработки физических основ перевода конденсированного вещества в плазменное состояние, так и для задач создания производительных источников плазмы, в том числе для технологий напыления и производства композитных материалов.

Цели и задачи диссертационной работы

Основными целями работы являлись: получение новых экспериментальных данных о диффузном вакуумном дуговом разряде (режимы работы катода и параметры плазмы) на термоэмиссионном (Gd), нетермоэмиссионном (Pb) и керамическом (CeO_2) катодах, а также определение возможности использования данного разряда в качестве источника плазмы для технологии плазменной сепарации ОЯТ, то есть получения в нем высокоионизованной плазмы, представленной однозарядными ионами задействованных компонентов.

Для достижения сформулированных целей были поставлены следующие задачи:

- Создать комплекс зондовой и спектральной диагностики плазмы диффузной вакуумной дуги, включающий одиночный зонд Ленгмюра, конденсационный зонд и многосеточный зонд — энергоанализатор ионов, а также схему оптических измерений излучения плазмы разряда.
- В диффузной вакуумной дуге на катоде из гадолиния, с использованием созданного диагностического комплекса, исследовать параметры образующейся плазмы (температуру и концентрацию электронов, зарядовый состав, средний заряд и энергию ионов) в зависимости от напряжения горения разряда.
- Экспериментально реализовать диффузный вакуумный дуговой разряд на жидком катоде из нетермоэмиссионного Pb, исследовать параметры разряда и образующейся в нем плазмы, а также оценить степень управляемости этими параметрами путем варьирования тока дуги и температуры катода.
- Экспериментально реализовать диффузный вакуумный дуговой разряд на керамическом катоде из CeO_2 , исследовать параметры разряда и

образующейся в нем плазмы. Выяснить особенности работы дуги на оксидном рабочем веществе.

- По результатам исследования диффузных дуговых разрядов на катодах из различных материалов сделать вывод о применимости данного источника для целей плазменной переработки ОЯТ.

Научная новизна

В рамках диссертационной работы проведено подробное исследование режимов работы диффузной вакуумной дуги на горячем расходуемом гадолиниевом катоде и получены **новые** экспериментальные данные о параметрах возникающей плазмы, в том числе зарядовый состав, степень ионизации и энергетический спектр ионов в зависимости от температуры катода и тока дуги.

Был **впервые** реализован диффузный вакуумный дуговой разряд на жидком катоде из нетермоэмиссионного свинца, который характеризуется дефицитом термоэмиссионного тока. Определены основные характеристики разряда (вольт-амперная характеристика, степень управляемости напряжением путем варьирования температуры катода, величина поступающего из плазмы на катод теплового потока). Измерены температура электронов и средний заряд тяжелых частиц плазмы.

Получены **новые** экспериментальные данные о режимах испарения нетермоэмиссионного катода (Pb) диффузного вакуумного дугового разряда. Установлено двукратное сокращение его скорости испарения в условиях дуги в сравнении с термическим, что свидетельствует об ионом переносе заряда на данном типе рабочего вещества.

Впервые получен и исследован диффузный вакуумный дуговой разряд на непроводящем при комнатной температуре керамическом катоде из диоксида церия. Определены температура катода и геометрия разрядного промежутка, в которых реализуется разряд. Оценена управляемость напряжением разряда посредством изменения тока дуги и температуры катода. Получены данные о величине теплового потока, поступающего из плазмы на катод, о температуре электронов плазмы, энергии и среднем заряде ионной компоненты.

Теоретическая и практическая значимость

Экспериментальные результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для развития физических моделей, описывающих процессы в катодном промежутке диффузных вакуумных дуг на рабочих материалах

с высоким атом-электронным отношением. Кроме этого они позволят расширить существующие представления о переводе конденсированного, в том числе оксидного, вещества в плазменное состояние и могут быть применимы для создания источника плазмы на основе вакуумной дуги с диффузной катодной привязкой в целях развития технологии плазменной сепарации ОЯТ, а также технологий напыления.

Положения, выносимые на защиту:

- Новые экспериментальные данные о параметрах плазмы диффузной вакуумной дуги на катоде из гадолиния, режимы, в которых плазма вакуумного дугового разряда состоит преимущественно (до 100%) из однократных ионов материала катода.
- Результаты экспериментального исследования параметров впервые реализованного диффузного вакуумного дугового разряда на нетермоэмиссионном свинцовом катоде.
- Результаты изучения режимов испарения свинцового катода диффузного дугового разряда и демонстрация сокращения скорости его эрозии в сравнении с термическим испарением.
- Результаты экспериментального исследования свойств впервые реализованной диффузной вакуумной дуги на керамическом катоде из диоксида церия.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: 56 – 60 научные конференции МФТИ (Долгопрудный, 2013 – 2017), XXIX–XXXII Международные конференции «Equations of State for Matter» и «Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter» (Эльбрус, 2014 – 2017), отраслевая научная конференция «АТОМТЕХ-2014. Электрофизика», (Москва, 2014), XLII Международная конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2015), IEEE International Conference of Plasma Science (Belek, Turkey, 2015), 13th International Conference Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (Томск, 2016), Всероссийская конференция «Физика низкотемпературной плазмы» (Казань, 2017).

Результаты по отдельным главам были представлены на конкурсах научных работ ОИВТ РАН, посвященных 100-летию чл.-корр. РАН Бибермана Л.М. и памяти академика Шейндлина А.Е., где удостоены третьей и второй

премии соответственно в номинации «Работы аспирантов и молодых ученых без степени в возрасте до 28 лет».

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 32 печатных работах, из них 10 [1–10] статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, и 22 работы в сборниках трудов конференций и тезисов докладов.

Личный вклад автора

Основные положения, выносимые на защиту, 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 диссертации результаты получены автором лично.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 102 страницы, из них 92 страницы текста, включая 37 рисунков и 2 таблицы. Библиография включает 87 наименований.

Благодарности

Автор искренне признателен научному руководителю Гаврикову А.В. за постановку задачи, внимание к работе и мотивацию личным примером. Кроме этого автор выражает особую благодарность Полищуку В.П. за научные консультации, помощь в проведении экспериментов и интерпретации данных, а также Ярцеву И.М., Лизякину Г.Д., Антонову Н.Н., Вороне Н.А. и Самойлову И.С. за активное участие в исследовании дугового разряда и полезные обсуждения, и Киселеву В.И. за помощь в подготовке экспериментов.

Содержание работы

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

Первая глава посвящена обзору литературы, касающейся технологии плазменной переработки ОЯТ и вариантов перевода конденсированных веществ в состояние плазмы, показана возможная перспективность использования диффузной вакуумной дуги на горячем катоде в качестве производительного источника для целей сепарации. Также в ней приведены результаты

выбора веществ, способных моделировать ОЯТ в вакуумном дуговом разряде.

В разделе 1.1 рассматривается актуальность разработки метода плазменной сепарации ОЯТ [11] и приведены основные требования к источнику плазмы для этой цели: генерация плазмы ОЯТ степенью ионизации близкой к 100%, плазма должна быть представлена преимущественно ионами одинаковой кратности заряда, а скорость испарения и ионизации вещества в источнике должна быть на уровне 100 г/ч.

В разделе 1.2 рассматриваются методы перевода конденсированного вещества в состояние плазмы, среди которых катодное распыление в магнетронном разряде, лазерный нагрев твердой мишени и последующий оптический пробой пара, а также ионизация паров пучком электронов. Показано, что эти методы не способны удовлетворить требованиям к источнику плазмы, перечисленным выше.

В разделе 1.3 представлен обзор производительных источников на основе вакуумных дуговых разрядов, плазма которых характеризуется сравнительно большой степенью ионизации. Рассмотрены вакуумные дуги с холодным катодом, генерирующие плазму, в которой присутствуют капли катодного материала. Напряжение разряда в них обычно испытывает хаотические колебания, что может вызывать появление в плазме двукратно заряженных ионов.

Вакуумные дуги на горячих испаряющихся анодах подразумевают, что положительный электрод выступает основным генератором плазмообразующей среды. Экспериментальные данные показывают, что параметры разряда слабо зависят от материала анода [12]. Концентрация образующейся плазмы — 10^{12} см⁻³, температура электронов находится на уровне 1 эВ, а степень ионизации плазмы обычно не превосходит 30%. В так называемой конфигурации разряда «Hot Refractory Anode Vacuum Arc» [13] степень ионизации приближается к 50%.

Вероятно, наибольшую эффективность перевода конденсированного вещества в состояние плазмы можно получить в диффузной вакуумной дуге на горячем испаряющемся катоде [14]. Плотность тока стационарной привязки разряда на катоде находится на уровне 10 – 100 А/см², за счет чего в плазме отсутствуют микрокапли катодного материала, а напряжение разряда достаточно стабильно. Авторы [14–16] отмечают хорошую управляемость параметрами образующейся в разряде плазмы и возможность достижения степени ионизации близкой к 100%.

В разделе 1.4 указывается, что катод вакуумной дуги возможно характеризовать параметром отношения потока испаряющихся с него атомов к потоку электронов термоэмиссии — ξ [17]. Основываясь на значениях величины ξ , катоды можно разделить на два типа — термоэмиссионные ($\xi \ll 1$) и нетермоэмиссионные ($\xi \gg 1$). Для каждой из групп материалов существуют свои трудности в описании катодных процессов. Для термоэмиссионных — не ясен механизм нагрева катода: доля электронного тока на термоэмиссионном катоде находится на уровне 0.8 – 0.9, а остальная часть обеспечивается ионами, энергия которых согласно тепловому балансу должна на порядок превышать падение напряжения в межэлектродном промежутке [18]. Для нетермоэмиссионных катодов не ясен механизм замыкания тока, так как при рабочих температурах плотность тока термоэмиссии с них оказывается на несколько порядков ниже плотности тока дуги [19].

Раздел 1.5 посвящен выбору веществ, способных моделировать процессы испарения и ионизации ОЯТ в диффузном вакуумном дуговом разряде. На основе анализа различных физических свойств (температур плавления, давления насыщенных паров, работы выхода, потенциалов ионизации, ширины запрещенной зоны и т.д.) в качестве модельных материалов выбраны гадолиний (Gd), свинец (Pb) и диоксид церия (CeO_2).

В разделе 1.6 представлены выводы к первой главе.

Вторая глава посвящена результатам исследования диффузной вакуумной дуги на термоэмиссионном катоде из гадолиния, моделирующего испарение и ионизацию урана.

В разделе 2.1 приведена схема используемого экспериментального стенда (рисунок 1) и перечислены его параметры. Катодом дуги было исследуемое вещество, которое помещалось в молибденовый тигель, с внешним диаметром 24 мм. Под тиглем находился электронно-лучевой подогреватель (ЭЛП), мощностью до 1.5 кВт. Он позволял изменять температуру катода при фиксированном токе разряда. Контроль температуры производился яркостным пирометром, настроенным на боковую поверхность тигля. Анодом дуги служил стальной водоохлаждаемый диск с центральным отверстием 15 мм. Плазма, вылетающая через него, подвергалась диагностике. Расстояние между катодом и анодом составляло порядка 3 см. Разряд реализовывался при температурах катода, когда его давление насыщенных паров составляло порядка 10 – 100 Па.

Для диагностики плазмы использовались следующие экспериментальные методы: одиночный зонд Ленгмюра (температура и концентрация элект-

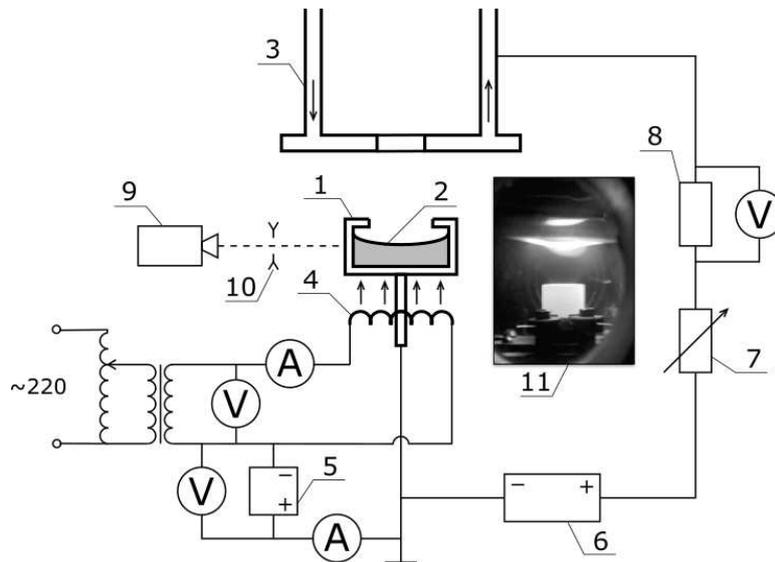


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: 1 — молибденовый тигель, 2 — катод дуги, 3 — анод с водяным охлаждением, 4 — ЭЛП, 5 — источник ускоряющего напряжения в схеме ЭЛП, 6 — источник питания дугового разряда, 7 — реостат, задающий ток разряда, 8 — токоизмерительный шунт, 9 — яркостный пирометр, 10 — диафрагма, 11 — фотография дугового разряда

тронов плазмы), конденсационный зонд (средний заряд ионов), многосеточный зонд (энергия ионов), также производился спектральный анализ плазменного излучения. Вольт-эквивалент (ВЭ) мощности, поступающей из плазмы на катод разряда определялся по методу [16], скорость испарения катода измерялась методом взвешивания.

Раздел 2.2 посвящен описанию полученных режимов работы дугового разряда в диапазоне токов 30 – 160 А, напряжений от 3 до 50 В и температуры катода 1.9 – 2.2 кК (мощность ЭЛП 0 – 800 Вт). Продемонстрирована возможность управления напряжением разряда, путем варьирования мощности ЭЛП.

В **разделе 2.3** приводится описание теплового режима работы термоэмиссионного катода из Gd и результатов измерения скорости эрозии Gd в дуге. Особенностью данного типа катодного материала является то, что ток термоэмиссии с него может полностью обеспечить ток дуги, и за счет больших эмиссионных потерь возможна реализация режима, где дуга охлаждает катод, то есть ВЭ мощности является отрицательным. Скорость испарения составила 1.7 – 2.8 мг/с с площади расплава 5 см² (коэффициент электропереноса $\chi = 0.02 - 0.06$ ат/эл), цена иона ~ 200 эВ.

Полученные в **разделах 2.2** и **2.3** данные согласуются с результатам более ранних работ, посвященных изучению диффузной вакуумной дуги на катоде из Gd [16; 18].

В разделе 2.4 представлены результаты измерения параметров плазмы гадолиния в зависимости от напряжения разряда. Температура электронов плазмы внутри разрядного промежутка и в заанодном пространстве возрастала от 0.5 до 10 эВ при увеличении напряжения от 3 до 30 В. Анализ состава излучения плазмы и измерения среднего заряда показали, что при напряжении разряда около 6 В образуется плазма, средний заряд ионов которой близок к единице, а линий двукратных ионов Gd в спектре не наблюдаются (рисунок 2). Этот режим согласуется с требованиями технологии плазменной сепарации ОЯТ. В найденном режиме дугового разряда максимальная энергия ионов не превосходит 10 эВ.

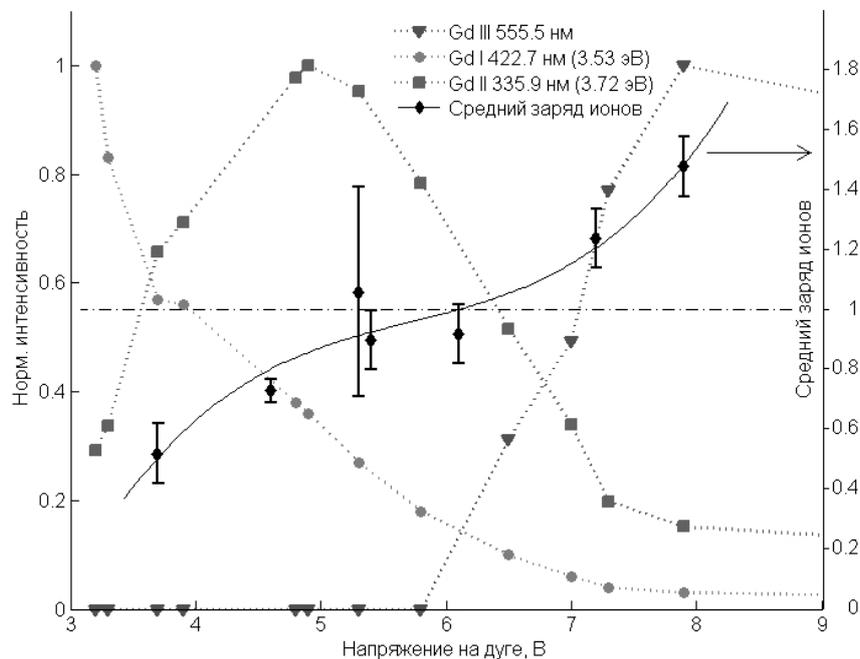


Рис. 2: Поведение интенсивности излучения линий гадолиния и средний заряд ионов плазмы в зависимости от напряжения разряда (Gd I — атомарный гадолиний, Gd II — однократный ион, Gd III — двукратный ион). Ток разряда $I = 44$ А

В разделе 2.5 приведены результаты оценки распределения параметров плазмы (потенциал плазмы, кинетическая энергия ионов, концентрация и температура электронов) в пространстве за анодом разряда, выполненные в предположении ее адиабатического расширения.

В разделе 2.6 подводятся заключение ко второй главе, и отмечается, что представленные результаты свидетельствуют о том, что диффузный вакуумный дуговой разряд с подогреваемым катодом является перспективным источником плазмы с точки зрения задач плазменной сепарации. Результаты второй главы опубликованы в работах [1; 3–5; 9].

В третьей главе описаны результаты исследования впервые реализованной диффузной вакуумной дуги на катоде из нетермоэмиссионного свинца, особенностью которого является то, что величина атом-электронного отношения ξ для него много больше единицы, и поэтому вклад тока термоэлектронной эмиссии в разряд должен быть малым, в сравнении с дугой на катоде из Gd.

В разделе 3.1 приведены диапазоны основных параметров реализованного разряда: ток 10 – 75 А, напряжение 11 – 25 В и температура тигля 1.2 – 1.6 кК. Также представлена измеренная ВАХ разряда для самостоятельного режима (мощность ЭЛП равна нулю), которая является линейно возрастающей. В разделе показано, что увеличение температуры катода при фиксированном токе разряда приводит к слабому росту напряжения в пределах 3 В.

Раздел 3.2 посвящен исследованию скорости испарения свинца из тигля в термическом случае и в случае присутствия дугового разряда. По схеме, изложенной в работе [20], был рассчитан коэффициент испарения свинца из тигля переменного сечения, который составил величину 0.15. Итоговая скорость термического испарения в зависимости от температуры катода, получена с использованием граничных условий [21]. Результаты расчета совпали с данными контрольного эксперимента по термическому испарению в пределах 10%.

Сравнение термической скорости испарения со скоростью испарения в условиях разряда (рисунок 3) при тех же температурах показало, что в дуге она меньше приблизительно вдвое. Этот факт говорит о том, что примерно половина вылетевших из тигля атомов, возвращаются обратно на катод в виде ионов. Удельная эрозия свинцового катода дуги в проведенных экспериментах лежала в диапазоне 1 – 2.8 мг/Кл, а соответствующий коэффициент электропереноса составил $\chi = 0.5 - 1.3$ ат/эл, цена иона ~ 30 эВ.

В разделе 3.3 рассматривается тепловой режим работы свинцового катода. Из баланса мощностей, выделяющихся на катоде, был вычислен ВЭ тепловой мощности, поступающей на него из плазмы. В результате было показано, что во всех реализованных экспериментально режимах работы дуги, ВЭ больше нуля и лежит в диапазоне 4 – 10 В.

В разделе 3.4 описаны результаты зондовых и спектральных измерений плазмы свинца. Экспериментально определено, что, отдельно с ростом температуры катода и тока разряда, энергия электронов плазмы монотонно убывала от 1.2 до 0.4 эВ, не смотря на то, что при этом общее напряжение раз-

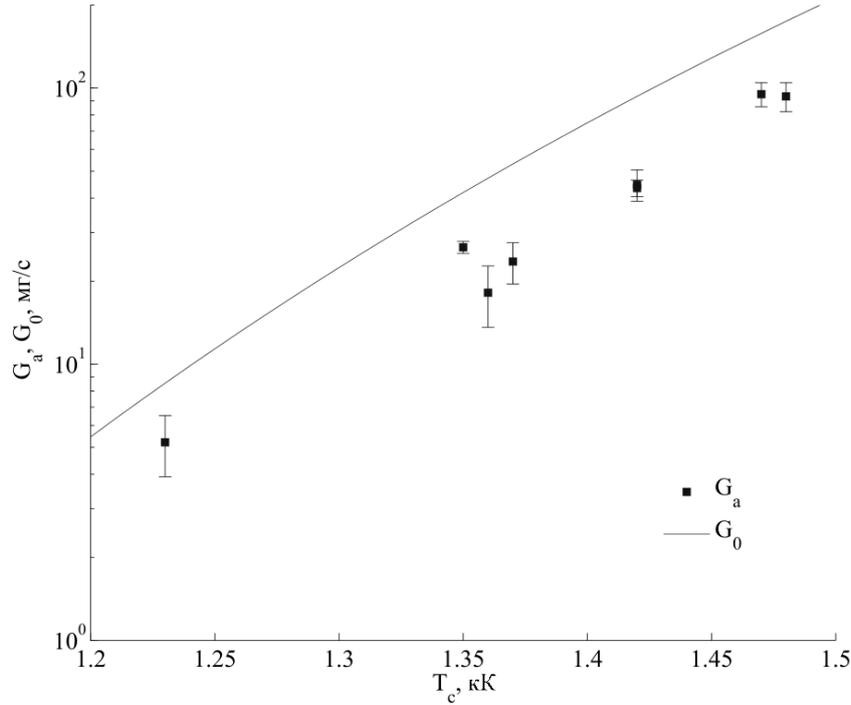


Рис. 3: Скорость эрозии свинца в дуге G_a и расчетная скорость испарения в вакуум G_0 .

ряда повышалось. Средний заряд потока ионов плазмы свинца в заанодном пространстве не превосходил 0.3. В спектре излучения наблюдались линии атомов и ионов свинца, а также атомов молибдена — материала тигля. В целом, полученная плазма свинца характеризовалась меньшими значениями энергии электронов и среднего заряда ионов чем плазма гадолиния. Это различие можно объяснить относительно малой ценой иона в свинцовом разряде.

Раздел 3.5 посвящен вопросу замыкания тока на нетермоэмиссионном катоде полученного разряда. Согласно оценке максимально возможной величины потока ионов, возвращающихся на катод, они могут полностью обеспечить ток дуги. То есть, полученные в экспериментах данные согласуются с гипотезой ионного переноса заряда на его поверхности. Также в разделе на основе данных измеренного ВЭ приводится оценка концентрации и энергии ионов на поверхности катода, которые составляет $\sim 10^{14}$ см $^{-3}$ и около 1 – 7 эВ соответственно.

В ходе экспериментов было установлено, что при одной и той же геометрии электродного промежутка и одинаковой температуре свинца возможно существование, помимо низковольтного дугового разряда, также и слаботочной формы с током порядка 10 мА и напряжением горения около 340 В. В **разделе 3.6** описывается этот высоковольтный разряд. Его особенностью является то, что ионы свинца не могут вызывать эмиссию электронов с поверхности катода, так как его энергия ионизации (7.4 эВ) меньше удвоенной

работы выхода (4 эВ), хотя этот механизм является типичным для поддержания тока в тлеющих разрядах [22].

Раздел 3.7 посвящен выводам к третьей главе, в нем перечисляются основные полученные в ней данные. Результаты третьей главы опубликованы в работах [2; 6; 7].

В **главе 4** представлены результаты экспериментального исследования диффузной вакуумной дуги на катоде из CeO_2 . Ключевой особенностью CeO_2 как катода дугового разряда является то, что он — диэлектрик, и существование сильноточного разряда на нем до сих пор не было очевидным.

В **разделе 4.1** описан процесс подготовки оксидного катода для работы в разряде. Перед экспериментом порошок CeO_2 спекался в вакууме при температуре 2 кК в течении 20 минут, находясь непосредственно в молибденовом катодном тигле. Измеренная работа выхода электронов с поверхности полученного катода находилась на уровне 3.4 – 3.6 эВ. По данным работы [23] диоксид церия при нагреве в бескислородной атмосфере становится электропроводным, что подтверждалось в контрольных экспериментах.

Раздел 4.2 посвящен описанию параметров впервые реализованного диффузного дугового разряда на оксидном катоде. Он был получен в диапазоне токов 15 – 150 А и напряжений 9 – 14 В при температуре катода 2.1 – 2.4 кК. Мощность ЭЛП составляла от 0.5 до 1.1 кВт. Реализовать дугу в самоподогревном режиме катода в исследованном диапазоне токов не удалось. ВАХ разряда — линейно возрастающая с коэффициентом наклона ~ 30 мОм. Напряжение горения разряда обладает малой чувствительностью по отношению к изменению температуры катода (~ 5 В/кК) при фиксированном токе.

В **разделе 4.3** приведены результаты измерения основных параметров образующейся в дуге плазмы. Согласно полученным данным спектрального анализа излучения в плазме присутствуют атомы и ионы церия и молибдена, а также атомы кислорода. Полосы CeO обнаружены не были, хотя согласно оценке равновесного состава пара над твердым оксидом церия, молекулы CeO являются основным компонентом плазмообразующей среды. Температура электронов плазмы в пространстве за анодом разряда не превосходила 1 эВ. Энергия ионов не превышала 16 эВ, а средний заряд ионного потока достигал 0.9 при токе разряда 70 А.

В **разделе 4.4** описаны особенности работы полученной диффузной вакуумной дуги на оксидном катоде. Отмечено, что наблюдаемая в опытах слабая нестационарность напряжения разряда может быть вызвана эволюцией характеристик катода во времени, в частности изменением его химического

состава и величины контактного электрического сопротивления между тиглем и катодом. Средняя скорость испарения оксида составляла 4 ± 1 мг/с, при этом средний коэффициент электропереноса — 0.04 ат/эл, а цена иона в разряде превышала 250 эВ.

В разделе 4.5 рассмотрены перспективы работы разряда на других катодных материалах, таких как оксид титана (TiO_2), ниобия (Nb_2O_5), а также смесь последнего с хромом.

В разделе 4.6 подводятся заключение к четвертой главе и перечисляются основные полученные результаты. Также в ней представлено сравнение характеристик описанных в работе разрядов и делается вывод о том, что катод из CeO_2 проявляет в разряде промежуточные свойства, характерные как для термоэмиссионных, так и нетермоэмиссионных материалов. Результаты, полученные в четвертой главе, опубликованы в работах [5; 8; 10].

В **Заключении** к диссертации сформулированы наиболее важные полученные результаты:

1. Получены новые экспериментальные данные о параметрах плазмы (температура и концентрация электронов, зарядовый состав, средний заряд и энергия ионов) диффузной вакуумной дуги на термоэмиссионном катоде из Gd, моделирующем компоненты отработавшего ядерного топлива, в зависимости от температуры катода (1.9 – 2.2 кК) и напряжения горения разряда.
2. Экспериментально реализован режим работы диффузной вакуумной дуги на гадолиниевом катоде (напряжение на дуге ≈ 6 В), при котором образуется высокоионизованная (до 100%) плазма, представленная преимущественно однозарядными ионами, удовлетворяющая требованиям технологии плазменной сепарации ОЯТ.
3. Впервые экспериментально реализован диффузный вакуумный дуговой разряд на нетермоэмиссионном катоде из Pb. Измерена ВАХ разряда и величина теплового потока, поступающего из плазмы в катод, а также температура электронов и степень ионизации плазменного потока. Продемонстрирована слабая управляемость параметрами разряда путем изменения тока (15 – 40 А) и температуры катода (1.2 – 1.6 кК).
4. Экспериментально показано двукратное сокращение скорости испарения свинца в условиях диффузного вакуумного дугового разряда, в сравнении с термическим испарением. Проведена оценка максимальной

величины тока ионов, возвращающихся из плазмы разряда на катод, подтверждающая гипотезу о преимущественно ионном механизме переноса заряда на его поверхности.

5. Была впервые экспериментально реализована диффузная вакуумная дуга на горячем керамическом катоде из CeO_2 , моделирующем испарение и ионизацию оксида урана, как основного компонента ОЯТ. Определены параметры, при которых существует стационарный разряд (ток 15 – 150 А, напряжение 9 – 14 В, температура катода 2.1 – 2.4 кК).
6. Получены данные о параметрах вакуумной дуги (ВАХ) на катоде из CeO_2 и образующейся в ней плазмы (температура электронов 0.4 – 1 эВ, степень ионизации потока до 90%, максимальная энергия ионов до 24 эВ). Описаны особенности работы разряда на оксидном катоде.

По совокупности полученных характеристик диффузных разрядов на различных катодных материалах, сделан вывод о перспективности таких источников плазмы для задач плазменной переработки ОЯТ.

Список литературы

Основные публикации по теме диссертации

1. *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.* // Физика плазмы. — 2015. — Т. 41, № 10. — С. 877–883.
2. *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.* // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2017. — Vol. 45, no. 1. — P. 140–147.
3. *Amirov R., Vorona N., Gavrikov A., Lizyakin G., Polistchook V., Samoylov I., Smirnov V., Usmanov R., Yartsev I.* // Journal of Physics: Conference Series. — 2014. — Т. 550. — С. 012014.
4. *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.* // Труды МФТИ. — 2014. — Т. 6, № 1. — С. 136–145.
5. *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.* // Ядерная физика и инжиниринг. — 2014. — Т. 5, № 11/12. — С. 952–955.
6. *Amirov R. K., Antonov N. N., Liziakin G. D., Polistchook V. P., Samoylov I. S., Usmanov R. A., Yartsev I. M.* // Journal of Physics: Conference Series. — 2015. — Vol. 653. — P. 012165.
7. *Amirov R. K., Antonov N. N., Vorona N. A., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Polistchook V. P., Samoylov I. S., Smirnov V. P., Usmanov R. A., Yartsev I. M.* // Journal of Physics: Conference Series. — 2015. — Vol. 653. — P. 012164.
8. *Amirov R. K., Vorona N. A., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Polistchook V. P., Samoylov I. S., Smirnov V. P., Usmanov R. A., Yartsev I. M., Ivanov A. S.* // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 774. — P. 012190.
9. *Amirov R. K., Vorona N. A., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Polistchook V. P., Samoylov I. S., Smirnov V. P., Usmanov R. A., Yartsev I. M.* // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Vol. 830. — P. 012059.
10. *Amirov R. K., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Polistchook V. P., Pershin D. A., Samoylov I. S., Smirnov V. P., Usmanov R. A., Vorona N. A., Yartsev I. M.* // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 946. — P. 012170.

Цитированная литература

11. Ворона Н. А., Гавриков А. В., Самохин А. А., Смирнов В. П., Хомяков Ю. С. // Ядерная физика и инжиниринг. — 2014. — Т. 5, № 11/12. — С. 944—951.
12. Полищук В. П., Ярцев И. М. // Теплофизика высоких температур. — 1996. — Т. 34, № 3. — С. 385—391.
13. Beilis I. I., Keidar M., Voxman R. L., Goldsmith S. // Physics of Plasmas. — 2000. — Vol. 7, no. 7. — P. 3068—3076.
14. Васин А. И., Дороднов А. М., Петросов В. А. // Письма в ЖТФ. — 1979. — Т. 5. — С. 1499—1504.
15. Кајиока Н. // Journal of Vacuum Science & Technology, A. — 1997. — Vol. 15. — P. 2728.
16. Паранин С. Н., Полищук В. П., Сычев П. Е., Шабашов В. И., Ярцев И. М. // Теплофизика высоких температур. — 1986. — Т. 24, № 3. — С. 422—429.
17. Полищук В. П., Сердюкова О. К., Ярцев И. М. // Журнал технической физики. — 1993. — Т. 63, № 6. — С. 66—74.
18. Полищук В. П., Сычев П. Е., Шабашов В. И., Ярцев И. М. // Журнал технической физики. — 1986. — Т. 56, № 11. — С. 2233—2235.
19. Батенин В., Климовский И., Полищук В., Синельщиков В. // Теплофизика высоких температур. — 2003. — Т. 41, № 5. — С. 670—678.
20. Бронин С., Полищук В. П., Сычев П. Е., Шабашов В. И., Ярцев И. М. // Теплофизика высоких температур. — 1989. — Т. 27, № 5. — С. 863—867.
21. Бронин С. Я., Полищук В. П. // Теплофизика высоких температур. — 1984. — Т. 22, № 3. — С. 550—556.
22. Райзер Ю. П. — Долгопрудный: Интеллект, 2009.
23. Акопов Ф. А., Боровкова Л. Б. // Теплофизика высоких температур. — 2011. — Т. 49, № 6. — С. 893—897.

Усманов Равиль Анатольевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук на тему:

Испарение и ионизация веществ, моделирующих отработавшее ядерное топливо, в вакуумном дуговом разряде с подогреваемым катодом

Подписано в печать: 22.03.2018

Тираж 100 экз. Заказ