



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИСЭ СО РАН,
д.ф.-м.н.

И.В. Романченко

«17» ноября 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Мельникова Антона Дмитриевича «Исследование вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом на оксид-содержащих материалах и многокомпонентных смесях для задачи плазменной сепарации ОЯТ», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Соискатель Мельников А.Д. в своей диссертации представляет результаты исследования вакуумного дугового разряда постоянного тока с подогреваемым катодом. Данный тип разряда предполагается использовать для создания источника плазмы для метода плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Таким образом, работа связана с актуальной для атомной промышленности задачей повышения эффективности переработки объёмов ОЯТ.

В диссертационной работе рассматриваются физические процессы в вакуумном дуговом разряде, в частности, затрагиваются вопросы эволюции разряда с течением времени его существования и факторов, влияющих на стабильность горения и тип привязки тока на подогреваемом катоде, а также роль теплофизических характеристик материала катода на его эмиссионные свойства. Производится анализ параметров генерируемой плазмы с целью определения оптимальных, для метода плазменной сепарации, режимов. Полученные результаты могут быть полезны, как в практической деятельности для метода плазменной переработки ОЯТ, так и при теоретическом анализе процессов в прикатодном слое вакуумного дугового разряда.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, рисунков и таблиц. Полный текст диссертации изложен на 140 страницах, библиография включает 143 наименования.

Во введении представлена актуальность темы диссертационной работы, изложены цели и задачи, поставленные при выполнении диссертационной работы. Также сформулирована научная новизна полученных результатов, их практическая и теоретическая значимость, изложены положения, выносимые на защиту. В конце введения отражён личный вклад соискателя, приведены список докладов на конференциях, где были апробированы результаты работы, и перечень основных публикаций по материалам диссертации.

В начале *первой главы* путем краткого рассмотрения истории развития плазменных технологий раскрывается актуальность исследования новых методов генерации плазмы. Формулируется задача и востребованность метода плазменной переработки ОЯТ, а также требования к источнику плазмы разделяемых веществ. Далее приводится подробный обзор

литературных источников, посвященный диффузному вакуумному дуговому разряду, который дает ясное представление об актуальном состоянии исследований данного типа разряда. Описываются характерные особенности разрядов с термоэмиссионными и не термоэмиссионными катодами. В конце главы рассматриваются работы, в которых исследовалось влияние внешнего магнитного поля на вакуумный дуговой разряд, а также сформулированы проблемы, которые требуют дополнительных исследований для реализации идеи плазменной технологии переработки ОЯТ.

Во второй главе описывается метод времяпролетной масс-спектрометрии, который авторы применили для исследования непрерывного потока плазмы диффузной вакуумной дуги. Перечисляются факторы, послужившие побудительным мотивом для соискателя к разработке и созданию собственного масс-спектрометра. Приведены результаты апробации созданного прибора, из которых следует, что итоговые параметры прибора удовлетворяют исходным поставленным задачам и требованиям. Подробно описана методика обработки исходных данных масс-спектрометра и показано, что созданный масс-спектрометр является важнейшим инструментом при исследованиях ионного состава плазменного потока, генерируемого диффузной вакуумной дугой.

В третьей главе излагаются результаты исследования вакуумного дугового разряда с керамическим катодом из диоксида церия, моделирующего диоксид урана. Описаны схема экспериментальной установки и использовавшиеся экспериментальные методы диагностики вакуумного дугового разряда. Для исследования параметров генерируемой плазмы применялись зондовые методики (одиночный зонд Ленгмюра и конденсационный зонд, многосеточный зонд) и методы оптической и времяпролетной масс-спектроскопии. Использование непрерывной регистрации данных в течение эксперимента позволило изучить временную эволюцию разряда, выделить стационарные режимы и условия их реализации. Приведены результаты исследования ионного состава плазмы в зависимости от тока разряда и температуры катода. Кроме того, в главе обсуждается влияние особенностей фазовых переходов в системе церий-кислород на состав плазмообразующей среды и, как следствие, обнаружение в составе отрицательных ионов кислорода. Описаны переходы между диффузной и контрагированной вакуумными дугами, сопровождающиеся появлением стационарных катодных пятен.

В четвертой главе описаны результаты исследования вакуумного дугового разряда на мультикомпонентных катодах из смесей оксида и металла ($\text{CeO}_2\text{:Cr}$, $\text{TiO}_2\text{:Cr}$) в различных массовых соотношениях компонентов и формах металла (чешуйки или порошок). В случае смеси диоксида церия с хромом, соискателю удалось реализовать диффузный тип привязки тока на катоде разряда, при этом диоксид церия выступал источником термоэлектронов, а хром – источником металлического пара. Изучены основные параметры генерируемой плазмы, в том числе ионный состав (Cr^+ , Ti^+), концентрация (от 10^{10} см^{-3} до 10^{12} см^{-3}) и температура ($\approx 0,5 \text{ эВ}$) электронов. Показано, что в случае не термоэмиссионного оксида TiO_2 на катоде разряда наблюдается контрагирование тока и при этом в ионном составе заметно увеличивается доля оксида, в сравнении с термоэмиссионным оксидом CeO_2 . В главе обсуждается влияние теплофизических свойств используемых материалов катодов на тип катодной привязки, реализующейся в разряде и, как следствие, на возможность варьировать напряжение разряда, изменяя мощность подогрева тигля.

Пятая глава является заключительной главой диссертационной работы и затрагивает вопрос возможности реализации диффузного типа разряда во внешнем

магнитном поле и его влияния на параметры разряда. В предварительной серии экспериментов с арочной конфигурацией магнитного поля были получены зависимости напряжения, среднего заряда и энергии ионов от величины магнитного поля. С целью проведения исследований в аксиальном магнитном поле, присутствующем в концепции плазменной сепарации ОЯТ, был создан экспериментальный стенд, моделирующий условия, приближенные к реальным. Стенд включает в себя новый источник плазмы на основе вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом. Показана возможность осуществить диффузную форму вакуумного дугового разряда на металлическом катоде из гадолиния во внешнем аксиальном магнитном поле, что чрезвычайно важно для дальнейшего развития работ в этом направлении исследований.

В заключении диссертации сформулированы наиболее важные полученные результаты, на основе которых сделан вывод о целесообразности дальнейшего исследования диффузной вакуумной дуги, как потенциального источника плазмы для метода плазменной сепарации ОЯТ.

Актуальность работы в первую очередь связана с необходимостью разработки источника плазмы сепарируемых веществ для метода плазменной переработки ОЯТ. Подобный источник должен обеспечивать перевод в плазменное состояние смесевых материалов, которыми является ОЯТ, и, кроме того, удовлетворять требованиям по производительности и составу генерируемой плазмы. Для решения данной задачи может быть использован диффузный вакуумный дуговой разряд. С другой стороны, для данного типа разряда могут быть найдены и другие практические применения, например, в задачах создания оксидных покрытий, которые могут найти применение в науке и технологиях.

Научная новизна. В работе приведен ряд новых физических результатов, касающихся вакуумного дугового разряда, а именно:

Впервые реализована диффузная вакуумная дуга на расходуемом смесевом мультикомпонентном катоде из смеси диоксида церия и хрома, определены основные характеристики разряда и параметры образующейся плазмы. Показано, что массовое соотношение компонентов влияет на характер зависимости напряжения разряда от мощности подогрева тигля. Эти данные важны при моделировании генерации плазмы в перспективных системах переработки ОЯТ.

Получены *новые* данные об оптимальных температурных условиях на катоде для реализации стационарных режимов горения вакуумного дугового разряда на подогреваемом керамическом катоде из диоксида церия.

Установлены зависимости ионного состава плазмы вакуумного дугового разряда на керамическом подогреваемом катоде от тока разряда и температуры катода. Показано снижение доли молекулярных ионов с ростом тока, слабое влияние температуры, а также существенное влияние химического взаимодействия материала тигля и катода на состав генерируемой плазмы.

Теоретическая значимость работы. Результаты, представленные в диссертации, затрагивают особенности физических процессов в вакуумном дуговом разряде на нескольких катодных материалах и могут быть использованы при построении теоретических моделей прикатодной области дугового разряда как с горячим, так и холодным катодами.

Практическая значимость работы. С практической точки зрения, полученные данные могут быть использованы, во-первых, при создании источников плазмы

конденсированных веществ для задач плазменной сепарации веществ или нанесения функциональных покрытий. Во-вторых, предложенная схема масс-спектрометра может быть использована для диагностики непрерывных потоков плазмы в широком классе плазменных систем.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в Объединенном институте высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Иркутском национальном государственном техническом университете (ИрНИТУ), Национальном исследовательском центре Курчатовский институт (НИЦ «Курчатовский институт»), в Институте сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН), Московском инженерно-физическом институте (НИЯУ МИФИ), Институте общей физики им. А.М. Прохорова (ИОФ РАН), Московском энергетическом институте (НИЦ «МЭИ»), Институте прикладной физики РАН (ИПФ РАН), Физическом институте им. П.Н. Лебедева (ФИАН), Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Казанском федеральном университете (КФУ), в Санкт-Петербургском (СПбГУ) и Московском (МГУ) государственных университетах.

Апробация работы. Материалы диссертации достаточно полно представлены на ведущих российских и международных конференциях.

Публикации. По теме работы (кроме трудов конференций) автор имеет 7 статей в журналах из перечня ВАК РФ, причём они опубликованы в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора. Персональный вклад автора отражен в выносимых на защиту положениях, а его вклад в полученные результаты, после проведения семинара и знакомства с диссертационной работой, кажется определяющим.

По результатам представленной работы необходимо сделать несколько замечаний:

- 1) Согласно сформулированным в диссертации условиям для метода плазменной сепарации ОЯТ важно отсутствие капельной фракции катодного материала, и именно по этой причине выбирается диффузный вакуумный дуговой разряд для генерации бескапельной плазмы. Тем не менее в работе показано, что существуют режимы с катодными пятнами в случае оксид-содержащих катодов, в которых возможно появление микрокапель, но в тексте диссертации не обсуждается проблема их возможного появления и меры избавления от микрокапель в данных режимах, а также о том, как это может сказаться на работе устройства сепарации ОЯТ.
- 2) В главе 3 приводятся параметры и вид наблюдавшихся катодных пятен. Они заметно отличаются от классических пятен на металлических катодах, но в тексте не уделяется достаточного внимания объяснению имевших место различий.
- 3) Одним из основных параметров диффузного дугового разряда в работе выступала температура катода. В эксперименте же проводятся измерения температуры на боковой поверхности тигля, а не на поверхности подогреваемого катода. В случае использования керамических материалов катода с низкой теплопроводностью эквивалентность температур в этих различных областях стоило бы специально обосновать.
- 4) В пятой главе работы представлены результаты по инициации и поддержанию разряда на разработанном и созданном источнике плазмы, но не приводятся экспериментально измеренные параметры генерируемой плазмы.

- 5) На рис. 5.9, 5.10, 5.11, 5.29 построены экспериментальные зависимости по трём точкам и без указания разброса значений, что является некорректным.
- 6) В положении 5, выносимом на защиту, указаны диапазоны параметров плазменного источника: «ток разряда 0-300 А, напряжение 0-60 В». Однако ток разряда, как и напряжение не могут быть равны «0», так как имеется минимальный пороговый ток дуги и минимально возможное напряжение горения дуги.
- 7) В тексте диссертации встречаются неточности и ошибки. Так, например, на стр. 45, утверждается, что "Научной группой из Томского Государственного Университета был разработан времяпролетный МС для диагностики плазменных систем." Данное утверждение в корне не верно. Указанный масс-спектрометр был создан в ведущей организации по данной диссертации - Институте сильноточной электроники СО РАН, о чём свидетельствуют аффилиации авторов работы [118] из списка литературы диссертации.

Отмеченные недостатки, однако, не являются критическими и не сказываются на общем высоком научном уровне диссертационной работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Мельников Антон Дмитриевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Диссертация обсуждена и одобрена на экспертном научном семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) (протокол № 13 от 14.11.2023 г.), на котором присутствовало 29 специалистов (в том числе 7 докторов и 9 кандидатов наук) в области физики плазмы и её приложений.

Полное название организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

Адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический 2/3, тел.:(3822)492410,

E-mail: contact@hcei.tsc.ru, адрес в интернете: <https://www.hcei.tsc.ru>

Отзыв составил:

Главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН, д.т.н., профессор по кафедре физики плазмы Коваль Николай Николаевич
634055, г. Томск, пр. Академический 2/3, ИСЭ СО РАН,
тел.:(3822)492792, E-mail: koval@hcei.tsc.ru


Н.Н. Коваль

Подпись Ковалья Н.Н. удостоверяю,
Учёный секретарь ИСЭ СО РАН, к.т.н.,
634055, г. Томск, пр. Академический 2/3,
ИСЭ СО РАН, тел.:(3822)491947,
E-mail: krysina@opee.hcei.tsc.ru


О.В. Крыгина