

ОТЗЫВ

Официального оппонента

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» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Актуальность диссертационной работы Мельникова А.Д. прежде всего связана с важностью задачи повышения эффективности и увеличения объемов переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) для современной атомной энергетики. Помимо этого, вакуумный дуговой разряд применяется во многих прикладных задачах, в связи с чем результаты представленных исследований могут быть востребованы научным сообществом. Схема вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом позволяет использовать в качестве источников плазмообразующей среды вещества, на которых при нормальных условиях невозможно инициировать разряд. Таким образом, обеспечиваются условия для перевода в плазменное состояние керамических или смесевых материалов катодов, в чем заключается одна из отличительных особенностей и перспективность данных исследований.

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 обоснована научная новизна полученных результатов, их практическая и теоретическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту. В конце заключения отражен личный вклад соискателя, приведены список докладов на конференциях, где были апробированы результаты работы, и перечень основных публикаций по материалам диссертации.

В начале *первой главы* приводится подробный обзор литературных источников, посвященных диффузному вакуумному дуговому разряду. В обзоре рассматриваются результаты, полученные ранее на разных типах материалов катодов, в том числе и те работы, продолжением которых является данная диссертационная работа. В конце главы обсуждаются работы, в которых исследовалось влияние внешнего магнитного поля на вакуумный дуговой разряд.

Во второй главе описывается схема разработанного времяпролетного масс-спектрометра. Описаны условия и схема эксперимента и требования к параметрам масс-спектрометра. Приведены результаты испытаний созданного прибора, в которых были определены разрешающая способность и чувствительность масс-спектрометра. Описана методика обработки исходных данных масс-спектрометра.

В третьей главе излагаются результаты исследования вакуумного дугового разряда с керамическим катодом из CeO_2 , моделирующего UO_2 . Описаны схема эксперимента и 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 масс-спектрологии. 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. 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). Диффузный тип вакуумного дугового разряда был реализован соискателем в случае смеси CeO_2 и Cr , при этом диоксид церия обеспечивал достаточную величину тока термоэмиссии, а хром достаточное давление пара. В ходе экспериментов изучены параметры генерируемой плазмы: ионный состав, концентрация и температура электронов, средний заряд ионов. Контрагированный тип вакуумного дугового разряда наблюдался в случае не термоэмиссионного оксида TiO_2 , 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, реализуемой в разряде и, как следствие, на возможность варьировать напряжение разряда изменяя мощность подогрева тигля.

Пятая глава посвящена исследованию вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом во внешнем магнитном поле. Проведено две серии экспериментов: с арочной и аксиальной структурами магнитного поля. В серии с арочным магнитным полем были получены зависимости, напряжения, среднего заряда и энергии ионов от величины поля. Для проведения исследований в аксиальном магнитном поле, был создан экспериментальный стенд, включающий новый источник плазмы на основе вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом. Показана возможность реализации диффузной формы вакуумного дугового разряда на металлическом катоде из гадолиния во внешнем аксиальном магнитном поле.

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 переработки ОЯТ.

Научная новизна. В ходе выполнения диссертационной работы был получен ряд новых результатов:

Получены новые экспериментальные данные об ионном составе плазмы вакуумного дугового разряда с подогреваемым мультикомпонентным катодом ($\text{CeO}_2\text{+Cr}$, $\text{TiO}_2\text{+Cr}$). Показано, как влияет на состав плазмы и принципиальную возможность

переводить в плазменное состояние оксидного материала соотношение между давлением насыщенных паров и работой выхода компонентов смесового катода.

Предложена *новая* схема системы ускоряющих электродов времяпролетного масс-спектрометра, позволяющая проводить измерение ионного состава непрерывного потока плазмы и обеспечивающая эффективную эксплуатацию в условиях сильного запыления электродов диэлектрическими материалами.

Получены *новые* данные о параметрах диффузного вакуумного дугового разряда во внешнем магнитном поле. Измерены зависимости параметров плазмы от величины магнитного поля в арочной конфигурации поля. Показана возможность реализации диффузного типа вакуумной дуги в аксиальном магнитном поле.

Ценность работы. Данная работа является существенным продвижением в создании нового класса источников плазмы из диэлектрического материала на основе вакуумно-дугового разряда с горячим катодом. Учитывая, что в ОЯТ присутствуют компоненты в виде диэлектриков (оксидов), полученные в работе результаты показывают возможность использования подобного источника для перевода в плазменное состояние смесей металлов и оксидов (моделирующих ОЯТ), т.е. подтверждают полученный ранее на однокомпонентных катодах вывод о целесообразности использования данного типа разряда для задачи плазменной сепарации. Кроме того, совокупность полученных результатов о параметрах разряда и генерируемой плазмы может быть полезной при разработке схожих источников плазмы, например, в задачах нанесения композитных пленочных покрытий.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в Объединенном институте высоких температур РАН, Иркутском государственном техническом университете, Научно-исследовательском центре «Курчатовский институт», в Институте сильноточной электроники СО РАН, Московском инженерно-физическом институте (НИЯУ МИФИ), Институте общей физики им. А.М. Прохорова, Московском энергетическом институте (МЭИ ТУ), Институте прикладной физики РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева, Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, Казанском федеральном университете, в Санкт-Петербургском и Московском государственном университете.

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

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

Личный вклад автора отражен в основных положениях, выносимых на защиту и содержании диссертации. Подготовка полученных результатов к публикации производилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные результаты получены автором лично.

По результатам представленной работы необходимо сделать несколько замечаний:

1. Замечание, касающееся методической части работы. Автор предлагает конструкцию времяпролетного масс-анализатора, являющуюся развитием известных подходов к

- диагностике стационарных плазменных источников. В разделе 2.2. анализируются подобные приборы, однако автору следовало пояснить, в чем преимущество предложенной схемы по сравнению с известными, причем более простыми конструкциями, например, реализованной в ИСЭ СО РАН. Кроме того, автор с помощью данного прибора провел абсолютные измерения элементного и зарядового состава плазменного потока, что требует весьма тщательного анализа возможных искажений полученных данных, например, вследствие эффекта вторичной эмиссии электронов с поверхности коллектора под действием ускоренных до кэВ-ных энергий ионов.
2. Представляется недостаточно обоснованным проведение весьма обширных физико-химических расчетов фазового состава системы церий-кислород, выполненные в разделе 3.7. Полученные в результате этих расчетов данные о содержании кислорода в парах CeO_2 , на мой взгляд, представляются избыточными, поскольку измерения показали весьма незначительное реальное содержание отрицательных ионов кислорода в плазме, которые могли бы оказать заметное влияние на ее параметры.
 3. Автор уделяет значительное внимание анализу характеристик ионов материала тигля (вольфрама, молибдена). Непонятно, почему он отказался от более высокотемпературных графитовых тиглей, которые широко используются в подобных источниках плазмы.
 4. На рис.4.5 приведены зависимости температуры электронов от тока дуги, полученные оптическим и зондовым методом. Автору следовало дать пояснения к используемым методикам, в частности пояснить, насколько отличаются значения температуры, полученные по разным парам спектральных линий, а также указать, какая излучательная модель использовалась, поскольку, например, модель ЛТР для данного диапазона параметров плазмы, вообще говоря, неприменима.
 5. Автору следовало пояснить выбор в качестве диэлектрического модельного компонента ОЯТ именно керамики CeO_2 и TiO_2 .
 6. Рис.3.10 требует комментариев, в частности, необходимо пояснить различие в характере зависимости от разрядного тока содержания ионов Ce^+ , а именно, существенный монотонный рост для тигля из молибдена и слабое немонотонное изменение для тигля из вольфрама. Также следует пояснить, как этот результат коррелирует с данными табл.2, согласно которым суммарная плотность плазмы падает в два раза в первом случае и остается почти неизменной - во втором.
 7. Следует также пояснить причину разного поведения зависимостей для Mo и W, изображенных на рис.3.11.
 8. Содержание табл.3 противоречит, как подписи к ней, так и комментариям в тексте.
 9. Непонятно, как из рис.5.9 автор получил «Коэффициент наклона линейной аппроксимации 1,62».

Отмеченные недостатки не являются критическими и не сказываются на общем высоком научном уровне диссертационной работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

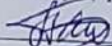
Таким образом, диссертация Мельникова А.Д. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решены важные вопросы, касающиеся физических основ плазменной технологии переработки ОЯТ.

Диссертация соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Мельников А.Д.

заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Диссертация обсуждена и одобрена на семинаре кафедры общей и космической физики Иркутского государственного университета № 4 от 10 ноября 2023 г.

Отзыв составил Паперный Виктор Львович, зав. кафедрой общей и космической физики; д.ф.-м.н., профессор.
664003, Иркутск, К.Маркса,1; тел.+7(914)9333884; e-mail: paperny@math.isu.runnet.ru; место работы ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»;

 В.Л. Паперный

Ученый секретарь ФГБОУ ВО ИГУ,  Н.Г. Кузьмина

664003, Иркутск, К.Маркса,1; (3952) 521-900, office@admin.isu.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет (ФГБОУ ВО ИГУ), 664003, Иркутск, К.Маркса,1; (3952) 521-900; e-mail: office@admin.isu.ru