

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Усманова Равиля Анатольевича **«Испарение и ионизация веществ, моделирующих отработавшее ядерное топливо, в вакуумном дуговом разряде с подогреваемым катодом»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы

Актуальность темы

Вакуумные разряды с диффузным пятном, горящие в парах материала эродирующего катода, изучаются уже около полувека, тем не менее, эти работы не потеряли своей актуальности. Связано это, прежде всего, с весьма сложным, многофакторным характером фундаментальных процессов, протекающих на поверхности катода и в генерируемом потоке плазмы. Расширение класса материалов катода, в частности, переход к веществам с различными тепло- и электрофизическими свойствами, а также к диэлектрикам, требует серьезного объема дополнительных исследований. Другим фактором, определяющим актуальность подобных исследований, является разработка плазменных технологий нового поколения для переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ), что является необходимым условием развития атомной энергетики, обеспечивая остро стоящую проблему сокращения радиоактивных отходов ядерного цикла. Важнейшим аспектом этого направления является разработка эффективного способа перевода конденсированного вещества ОЯТ в плазменное состояние. Использование здесь диффузной вакуумной дуги с подогреваемым катодом представляется весьма перспективным как вследствие возможности управления параметрами плазменной фазы (степенью ионизации, направленной энергией плазменного потока и др.), так и благодаря широкому спектру материалов катода, которые могут быть использованы в данном типе разряда. Принципиальным моментом здесь является возможность использования в этом качестве диэлектриков, в частности, керамики, поскольку основная часть материала ОЯТ находится именно в таком состоянии.

Структура и содержание работы

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.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели работы и выносимые на защиту научные положения, отмечена научная новизна и практическая ценность работы.

Первая глава носит обзорный характер и содержит анализ литературных источников, посвященных вопросам плазменной переработки ОЯТ и вариантов перевода конденсированных веществ в плазменное состояние, показана перспективность использования диффузной вакуумной дуги с подогреваемым катодом в качестве производительного источника для целей сепарации. В ней также приведены результаты выбора веществ, способных моделировать ОЯТ в вакуумном дуговом разряде, и на основании анализа различных тепло- и электрофизических свойств в качестве модельных материалов выбраны гадолиний (Gd), свинец (Pb) и диоксид церия (CeO_2).

Описание экспериментальной установки и набора используемых методик (ленгмюровский и конденсационный зонды, многосеточный анализатор энергии ионов, спектроскопические методы) приведено в **Главе 2**. Здесь же изложены результаты исследования теплофизических характеристик, а также параметров плазменного потока диффузной вакуумной дуги на термоэмиссионном катоде из гадолиния, моделирующего испарение и ионизацию урана.

В **третьей главе** описаны результаты исследования диффузной вакуумной дуги на катоде из свинца, существенно отличающегося по своим электрофизическим свойствам от гадолиния. Это определило существенно отличные от исследованных выше характеристики разряда и эмитируемого плазменного потока.

Четвертая глава представляет результаты экспериментального исследования диффузной вакуумной дуги на катоде из керамики CeO_2 . Показано, что, хотя этот материал при комнатной температуре является хорошим диэлектриком, удастся при определенных условиях получить устойчивый разряд и измерить важнейшие параметры плазменного потока: скорость испарения катода, температуру электронов, степень ионизации, атомный и ионный состав и др.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы, обосновывается достоверность полученных результатов исследований, отмечается личный вклад автора.

Оценка новизны и достоверности

Наиболее важными и интересными научными результатами диссертации можно назвать следующие:

1. Измерены основные характеристики плазменного потока, эмитируемого диффузной вакуумной дуги на термоэмиссионном катоде из Gd, моделирующем компоненты отработавшего ядерного топлива, в широком диапазоне параметров дуги: температуры катода и напряжения горения. Реализован оптимальный для технологии плазменной сепарации ОЯТ режим работы дуги с максимальной степенью ионизации вещества катода при наличии лишь однозарядных ионов.

2. Исследован диффузный вакуумный дуговой разряд на катоде из Pb. Получены основные характеристики разряда, а также экспериментальные данные, позволившие установить механизм замыкания тока в дуге с данным материалом, обладающем «аномальными» электрофизическими характеристиками.

3. 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, а также измерены характеристики эмитируемого разрядом плазменного потока.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Наиболее существенным представляется, сделанный по совокупности полученных характеристик диффузных разрядов на различных катодных материалах, вывод о перспективности таких источников плазмы для задач плазменной переработки ОЯТ.

2. Автором исследованы характеристики вакуумных дуг с диффузным катодным пятном и с материалами катода, имеющими существенно отличающиеся тепло- и электрофизические характеристики в широком диапазоне параметров разряда. Полученные результаты позволяют разрабатывать эффективные методы преобразования различных материалов, находящихся в конденсированном состоянии, в плазменную фазу, и создавать на основе этих методов широкий спектр технологий, например, в плазмохимии, создании тонкопленочных покрытий и др.

Рекомендации по внедрению результатов работы

Представленные в диссертации результаты, могут быть использованы в ряде ведущих отечественных научных и технологических центров, в частности, в РНЦ «Курчатовский институт», ОИВТ РАН, ТРИНИТИ, Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ.

Обоснованность научных положений и выводов,

выдвинутых соискателем, основывается на использовании широкого спектра современных методик (зондовых, оптических, корпускулярных), сопоставлении с известными литературными данными, а также сравнении с модельными расчетами. Последнее обстоятельство является важным достоинством работы.

Таким образом, являются несомненными и актуальность тематики, и научная значимость, и новизна работы, и достоверность полученных результатов.

Автореферат полностью соответствует структуре и отражает содержание диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту.

Апробация работы. Материалы диссертации опубликованы в 32 печатных работах, из них 10 статей в рецензируемых журналах, входящих в

перечень ВАК, и 22 работы в сборниках трудов конференций и тезисов докладов. Особенно следует отметить высокий научный уровень результатов работы, опубликованных в рейтинговых журналах: «IEEE Transactions on Plasma Science» и «Физика плазмы». Следует также указать на представление результатов на ведущих российских и международных конференциях по физике плазмы, а также премии, полученные автором на конкурсах научных работ ОИВТ РАН.

Как всякое серьезное исследование, диссертация не свободна от **недостатков**.

1. Автор использует для оценки степени ионизации плазменного потока метод конденсационного зонда (формула (2.2) на с.34). В формуле имеется опечатка (вместо α_i следует вставить Z_i). Кроме того, в данную формулу, фактически, входит не отношение концентраций, в соответствии с классическим определением: $n_i/(n_i + n_a)$, а отношение потоков ионов и нейтральных атомов, в которое входит также отношение скоростей заряженной и нейтральной компонент. Учитывая, что направленная энергия ионного потока согласно измерениям «лежит в диапазоне 3 – 20 эВ», а тепловая составляет около 0.2 эВ, т.е. скорости компонент могут отличаться в несколько раз, степень ионизации, определяемая указанным методом, может быть существенно завышенной. Требуется комментарий по данному вопросу.

2. На с.41 приведена оценка энергетической цены иона на основе найденного коэффициента электропереноса для атомов. Необходимо пояснить, каким образом получена приведенная оценка.

3. Подпись к рис. 2.12 не соответствует обозначению оси X. Следует признать неудачным также комментарий к этому рисунку на с. 42.

4. Из рис.2.14 следует, что отношение интенсивностей линий Gd I и Gd II при оптимальном напряжении горения разряда 5 В составляет около 0.4. Это противоречит утверждению автора о почти 100 процентной ионизации рабочего тела в этом режиме (см. рис. 2.15) и подтверждает сомнения в корректности определения степени ионизации, высказанные в замечании 1. Кроме того, из рис. 2.16 следует, что температура электронов в оптимальном режиме работы не превышает 0.5 эВ, что также позволяет усомниться в 100 процентной степени ионизации плазмы. Автору следовало сделать простейшие оценки этой величины по формуле Саха.

5. Для наглядного сопоставления результатов модельных расчетов с экспериментом, следовало на расчетных кривых рис. 2.18, 2.19 поместить данные измерений.

6. В тексте встречаются неудачные фразы, требующие комментариев, например на с.51 «Значения свободных параметров...», на с.52 « При помощи зондовых измерений ...»

7. В выводах к Главе 3 отсутствует обоснованное существенное заключение о пригодности исследуемого типа дуги на свинцовом катоде для моделирования источника плазмы в задачах масс-сепарации.

8. Заключение на с.83 о том, что «характеристики потока плазмы (исследованного разряда на CeO_2) близки к требуемым и позволяют положительно ответить на вопрос о применимости данного разряда для отработки метода плазменной сепарации» следовало обосновать.

Указанные замечания, в основном, имеют характер рекомендаций и не снижают высокой итоговой оценки диссертационной работы Усманова Р.А., которая подтверждает достаточную научную квалификацию ее автора.

В целом, диссертация выполнена на высоком научном уровне, поставленные цели соответствуют полученным результатам, ее содержание соответствует специальности 01.04.08 – физика плазмы. Отметим также, что работа написана грамотно, легко читается, хорошо оформлена.

Таким образом, диссертация Усманова Р.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решены важные вопросы, касающиеся физических основ плазменной технологии переработки ОЯТ. Работа соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г. а ее автор Усманов Р.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

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



В.Л. Паперный

Ученый секретарь ФГБОУ ВО ИГУ,

Н.Г. Кузьмина

664003, Иркутск, ул. 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

