

официального оппонента на диссертацию Усманова Равиля Анатольевича «Испарение и ионизация веществ, моделирующих отработавшее ядерное топливо, в вакуумном дуговом разряде с подогреваемым катодом» на соискание ученой степени кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Диссертация Р.А.Усманова посвящена экспериментальному исследованию процессов испарения и ионизации в вакуумном дуговом разряде с подогреваемым катодом с применением веществ, моделирующих отработавшее топливо ядерных реакторов.

Актуальность темы исследования

Задача замыкания ядерного топливного цикла сводится к необходимости создания эффективных методов переработки отработавшего ядерного топлива, что само по себе является задачей в высшей степени актуальной. Возможность применения плазменных систем для целей сепарации может быть связана с повышением эффективности процесса переработки отработавшего топлива, для чего потребуются создание новых методов ионизации вещества в таких системах, обеспечивающих необходимый высокий расход рабочего вещества. Тема данной работы посвящена исследованию вакуумного дугового разряда как возможной основы источника плазмы для плазменного сепаратора и изучению работы такого источника на веществах, моделирующих отработавшее ядерное топливо. Однако, с другой стороны, тема представляется актуальной также потому, что, несмотря на имеющиеся обширные исследования вакуумного дугового разряда, данная работа показывает, что в них имеются существенные «белые пятна» в понимании механизмов, которые связаны с переводом конденсированного вещества в плазменное состояние и которые определяют физические процессы, происходящие в вакуумном дуговом разряде, такие как испарение, эмиссию, протекание тока через катод. На трех

модельных веществах существенно различных по отношению к таким процессам в диссертации показаны особенности разряда, связанные со свойствами плазменной струи, плотностью плазмы, скоростью движения и температурой частиц, стабильностью процесса. Включение в работу исследования диффузной вакуумной дуги на оксидном катоде делает ее особо актуальной, поскольку в ней исследуется получение плазмы из твердого окисного вещества, что непосредственно важно для переработки окисного ядерного топлива.

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертация изложена на 102 страницах, состоит из четырех глав, введения, заключения и списка литературы из 87 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, показаны её научная новизна, практическая ценность, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведена информация о степени достоверности, апробации результатов работы и публикациях по теме исследования, о личном вкладе автора.

В первой главе рассмотрена суть метода плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива, требования к источнику плазмы для системы сепарации. Рассмотрены существующие источники плазмы, основанные на различных методах ионизации вещества, проведен анализ плазменных дуговых источников с точки зрения обеспечения значительной производительности (до 100 г/ч) и высокой степени ионизации, а также возможности работы с конденсированным веществом. Сделан вывод о возможности выбора в качестве источника для плазменного сепаратора диффузной вакуумной дуги на горячем катоде. Проведен анализ физических свойств веществ, которые могут быть взяты для моделирования генерации плазмы ОЯТ. Гадолиний и свинец выбраны для моделирования испарения и ионизации урана, диоксид церия выбран для моделирования генерации плазмы диоксида урана.

Во второй главе описаны результаты экспериментального исследования диффузной вакуумной дуги на катоде из гадолиния, как вещества моделирующего испарение и ионизацию урана. Приведено описание экспериментального стенда и диагностических методов, использованных автором: спектральной диагностики в оптическом диапазоне, зондовой методики адаптированной для работы в конденсирующихся веществах, многосеточного зонда для измерения энергий ионов, конденсационной методики, их применения для определения параметров плазмы, степени ионизации вещества. Приведены результаты измерений основных параметров плазмы гадолиния – электронной температуры, плотности плазмы, энергии ионов, проведен тепловый анализ режима работы катода вакуумной дуги. На основе измерений и расчетной модели проведен анализ параметров потока плазмы в выходном пространстве за анодом.

Третья глава посвящена исследованию диффузной вакуумной дуги на нетермоэмиссионном катоде из свинца. Получен устойчивый во времени разряд со свинцовым катодом. Приведены результаты измерений параметров свинцовой плазмы, изложены методы и результаты выполненного автором анализа энергобаланса на катоде в условиях низкого отношения электронной эмиссии к потоку атомов с катода. Приведена вольт-амперная характеристика разряда в свинце, показаны ее принципиальные отличия от разряда в гадолинии, определяемые характером протекания тока.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования диффузной вакуумной дуги на оксидном катоде из диоксида церия. Показан способ изготовления катода из CeO_2 , получен устойчивый разряд на веществе, которое в нормальных условиях является диэлектриком, показана его управляемость. Изложены результаты исследования основных параметров разряда при температурах катода выше 2000 К, получена его вольт-амперная характеристика, проведен анализ равновесного компонентного состава образующегося пара и параметров плазмы по спектру

излучения и зондовым методом. Показана высокая степень ионизации CeO_2 . Рассмотрена реализуемость диффузного разряда на оксидном катоде с использованием оксидов титана TiO_2 и Nb_2O_5 .

В заключении сформулированы основные результаты проведенных исследований диффузной вакуумной дуги с горячим катодом и сделан вывод о возможности применения разряда для задач плазменной переработки ОЯТ.

Научная новизна результатов

К наиболее значимым новым результатам, представленным в диссертационной работе можно отнести следующие:

1) новые экспериментальные данные исследования параметров плазмы диффузной вакуумной дуги на горячем гадолиниевом катоде в расходном режиме, включая степень ионизации, зарядовый состав, энергетический спектр ионов в зависимости от внешних параметров дуги,

2) экспериментальную реализацию диффузного вакуумного дугового разряда на катоде из нетермоэмиссионного материала – свинца – и результаты его исследования, полученные впервые, развитие положений о механизме протекании тока в таком разряде,

3) автором впервые экспериментально реализован устойчивый диффузный вакуумный дуговой разряд на керамическом катоде из диоксида церия при высокой температуре, показано возникновение проводимости на катодном слое, изучены энергобаланс на катоде, параметры плазмы, зарядовый состав ионной компоненты.

Степень обоснованности научных положений

Положения, развитые автором, о физических механизмах, определяющих основные процессы в диффузной вакуумной дуге – испарении, ионизации веществ с различными физическими свойствами, включая керамический материал, переносе тока – представляются обоснованными совокупностью экспериментальных данных, полученных автором с использованием различных методов диагностики, расчетного

анализа и изложенных в диссертации. Они же определяют обоснованность выводов и рекомендаций, сделанных в диссертации.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные в работе результаты могут быть использованы для построения физических моделей, описывающих процессы в вакуумных дугах, работающих на веществах с высоким атом-электронным соотношением на катоде, расширяют представления о переводе конденсированного, в том числе оксидного, вещества в ионизованное состояние. Практическая значимость работы определяется направленностью на развитие плазменной технологии переработки ОЯТ, а полученные результаты могут быть использованы на предприятиях и в организациях Росатома при разработке инжектора плазмы на основе вакуумной дуги с диффузной катодной привязкой для плазменного сепаратора.

Апробация работы, публикации

Результаты диссертации представлены на международных и отечественных научных конференциях в 2013-2018 гг., на конкурсах научных работ ОИВТ РАН, удостоены премий для аспирантов и молодых ученых. Материалы диссертации опубликованы в 32 научных работах, из них 10 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 22 работы в трудах конференций и в тезисах докладов. Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

Замечания к диссертационной работе

1) Следовало бы обсудить возможность применения вакуумного дугового разряда для инъекции в плазменный сепаратор при наличии магнитного поля, поскольку принцип плазменного сепаратора построен именно на наличии магнитного поля, в котором происходит разделение ионов по массам.

2) Следовало бы несколько подробнее рассмотреть интерпретацию результатов измерений среднего заряда в потоке плазмы с помощью конденсационного зонда для случаев, когда коэффициент конденсации

(аккомодации) не равен единице, что может привести к увеличению ошибки измерений зарядового состава.

3) Результаты исследования, представленные в разделе 4.5 диссертации относительно использования разряда на других оксидных и смесевых катодах (окислах титана и ниобия), отрывочны, не носят систематического характера и требуют, очевидно, большой дополнительной исследовательской работы.

Представленные выше замечания носят рекомендательный характер и никоим образом не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация Усманова Равиля Анатольевича «Испарение и ионизация веществ, моделирующих отработавшее ядерное топливо, в вакуумном дуговом разряде с подогреваемым катодом» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным в пунктах 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а также паспорту специальности 01.04.08 – физика плазмы – по физико-математическим наукам. Считаю, что Усманов Равиль Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Начальник лаборатории
пучково-плазменных технологий
Курчатовского комплекса физико-химических технологий
НИЦ «Курчатовский институт»
кандидат физико-математических наук


Б.И. Хрипунов


Хрипунов Борис Иванович, кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории Курчатовского комплекса физико-химических технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Тел. 8(499)196-79-00, e-mail: Khripunov_BI@nrcki.ru

Подпись Хрипунова Бориса Ивановича заверяю

Главный ученый секретарь

НИЦ «Курчатовский институт»


С.Ю. Стремоухов

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

123182, Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.,

Тел.: +7(499)196 17-04, e-mail: nrcki@nrcki.ru