

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 30.05.2018г. протокол № 7

О присуждении Усманову Равилю Анатольевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Испарение и ионизация веществ, моделирующих отработавшее ядерное топливо, в вакуумном дуговом разряде с подогреваемым катодом» в виде рукописи по специальности 01.04.08 – Физика плазмы, принята к защите 26.03.2018г., (протокол заседания № 6) диссертационным советом Д 002.110.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр.2, jiht.ru, (495) 485-8345), утвержденным Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012г. № 105/нк.

Соискатель Усманов Равиль Анатольевич 1992 года рождения, в 2015 году окончил Московский физико-технический институт (государственный университет).

С 2015 года по настоящее время, проходит обучение в очной аспирантуре «Проблем физики и энергетики» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего

образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

Диссертация выполнена в лаборатории № 2.1.4.2 – диагностики и измерительных систем НИЦ – 2 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Гавриков Андрей Владимирович, заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

- д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой общей и космической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждение высшего образования «Иркутского государственного университета»(664003 г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, тел.: (3952) 521-931, isu.ru, e-mail: rgiem@isu.ru) Паперный Виктор Львович;

- к.ф.-м.н., начальник лаборатории Курчатовского комплекса физико-технических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения Национального исследовательского центра «Курчатовского института» (123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, тел.: (499) 196-9639, nrcki.ru, e-mail - nrcki@nrcki.ru) Хрипунов Борис Иванович

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» г. Москва, г. Троицк, в своем положительном заключении составленном старшим научным сотрудником Отделения Физики Токонесущей плазмы, к.ф.-м.н. Волковым Г.С. (утвержденном генеральным директором АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», д.ф.-м.н., профессором Черковцом В.Е.), указала что:

1. В работе приведены результаты подробного исследования режимов работы диффузной вакуумной дуги на катоде из термоэмиссионного гадолиния и получены новые экспериментальные данные о параметрах образующейся в разряде плазмы, в том числе зарядовом составе, степени ионизации и энергетическом спектре ионов в зависимости от температуры катода и тока дуги.

2. Была впервые реализована диффузная вакуумная дуга на нетермоэмиссионном катоде из свинца, определены ее основные характеристики и параметры образующейся плазмы. Получены новые данные о режимах испарения свинца и условиях разряда и продемонстрировано двукратное сокращение его скорости испарения в сравнении с термическим режимом, что свидетельствует в пользу гипотезы об ионном механизме переноса тока на нетермоэмиссионных катодах.

3. Впервые получен и исследован диффузный вакуумный дуговой разряд на непроводящем при комнатной температуре керамическом катоде из диоксида церия. Обнаружено, что при нагревании свыше 1000 К из-за изменения стехиометрического состава проводимость диоксида церия растет до уровня проводимости металла. Исследована управляемость напряжением разряда путем изменения температуры катода и тока дуги, получены данные о тепловом потоке, поступающем из плазмы в катод, электронной температуре плазмы, среднем заряде частиц, а также компонентном составе плазмы.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования 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 университетах.

Соискатель имеет 32 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 10 работ в научных изданиях:

Основные работы:

1. Амиров Р.Х., Ворона Н.А., Гавриков А.В., Лизякин Г.Д., Полищук В.П., Самойлов И.С., Смирнов В.П., Усманов Р.А., Ярцев И.М. Исследование вакуумной дуги с диффузной катодной привязкой как источника плазмы для плазменной сепарации ОЯТ и РАО // **Физика плазмы**. – 2015. – Том 41, № 10, С. 877-883.
2. R Kh Amirov, A V Gavrikov, G D Liziakin, V P Polistchook, I S Samoylov, V P Smirnov, R A Usmanov, N A Vorona, I M Yartsev Diffuse Vacuum Arc on the Nonthermionic Lead Cathode // **IEEE Trans. Plasma. Sci.** Vol. 45. No. 1. January 2017. P:140-147.
3. R. Amirov, N. Vorona, A. Gavrikov, G. Lizyakin, V. Polistchook, I. Samoylov, V. Smirnov, R. Usmanov, I. Yartzev Investigation of plasma flow in vacuum arc with hot cathode, **J. Phys.: Conf. Ser.** 550 (2014). P. 012014.
4. Амиров Р. Х., Ворона Н. А., Гавриков А. В., Жабин С. Н., Лизякин Г. Д., Полищук В. П., Самойлов И. С., Смирнов В. П., Усманов Р. А., Ярцев И. М. Экспериментальное исследование процессов вакуумно-дугового испарения и ионизации вещества (гадолиния), моделирующего уран, для разработки технологии плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива // **Труды МФТИ**. - 2014. – Том 6, № 1, С.136-145.
5. Амиров Р.Х., Ворона Н.А., Гавриков А.В., Лизякин Г.Д., Полищук В.П., Самойлов И.С., Смирнов В.П., Усманов Р.А., Ярцев И.М. Исследование возможности применения диффузной вакуумной дуги как источника плазмы

для разработки технологии плазменной сепарации ОЯТ и РАО // **Ядерная физика и инжиниринг.** – 2014. – Том 5, № 11-12, С. 952-955.

6. R. Kh. Amirov, N.N. Antonov, N.A. Vorona, A.V. Gavrikov, G.D. Liziakin, V.P. Polistchok, I.S. Samoylov, V.P. Smirnov, R.A. Usmanov, I.M. Yartsev The stationary vacuum arc on non-thermionic hot cathode // **J. Phys.: Conf. Ser.** 653 (2015). P. 012164.

7. R.Kh. Amirov, N.N. Antonov, G.D. Liziakin, V.P. Polistchok, I.S. Samoylov, R.A. Usmanov, I.M. Yartsev High-voltage discharge in supersonic jet of plumbum vapor // **J. Phys.: Conf. Ser.** 653 (2015). P. 012165.

8. Amirov R.Kh., Vorona N.A., Gavrikov A.V., Liziakin G.D., Polistchok V.P., Samoylov I.S., Smirnov V.P., Usmanov R.A., Yartsev I.M. and Ivanov A.S. Diffuse vacuum arc with cerium oxide hot cathode // **J. Phys.: Conf. Ser.** 774 (2016). P. 012190.

9. R Kh Amirov, N A Vorona, A V Gavrikov, G D Liziakin, V P Polistchok, I S Samoylov, V P Smirnov, R A Usmanov and I M Yartsev Plasma jet characteristics in vacuum arc with diffused cathode spot // **J. Phys.: Conf. Ser.** 830 (2017). P. 012059.

10. R Kh Amirov, A V Gavrikov, G D Liziakin, V P Polistchok, D A Pershin, I S Samoylov, V P Smirnov, R A Usmanov, N A Vorona and I M Yartsev On the parameters of the diffused vacuum arc with cerium oxide hot cathode // **J. Phys.: Conf. Ser.** 946 (2018). P. 012170.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Профессор кафедры физики, д.т.н., А.С. Климов, заведующий кафедры физики, профессор, д.т.н., Е.М. Окс) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Положения, выносимые на защиту, построены не по классической схеме, что затрудняет их анализ. Следовало более конкретно сформулировать

положения, отразив в них – в чем заключаются научные и практические результаты, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования.

- Не представлены критерии выбора модельных материалов (Gd, Pb, CeO₂).

2. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (доцент института ЛаПлаз, к.ф.-м.н., И. В. Визгалов) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Автор при рассмотрении различных материалов имитирующих ОЯТ, не уточнил, что основной состав ОЯТ – это оксиды и нитриды, для которых температура плавления и испарения должна быть выше 2000 К, что вызывает вопрос о крайне критичной проблеме выбора материала используемого тигля/катода и значительной роли химической эрозии материала при таких температурах. Этот момент требует пояснения.

3. Институт космических исследований (Заведующий лабораторией плазменно-пылевых процессов в космических объектах, д.ф.-м.н., С.И. Попель) – отзыв положительный, без замечаний.

4. Национальный исследовательский институт «МЭИ» (Профессор кафедры Инженерной теплофизики, д.ф.-м.н., О.А. Синкевич) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Из автореферата трудно понять, как рассчитывалась скорость эрозии свинца и скорость испарения в вакуум в дуге Ga (рис. 3).

- Считалась ли поверхность катода однородной или нет? Учитывалось ли влияние электрического поля на эти процессы?

- На рис. 2 приведены данные об интенсивности излучения гадолиния, но никак не оценивалась достоверность данных.

- Из автореферата трудно понять, удалось ли установить границы перехода от однородного разряда к контрагированному и переносе полученных данных на проектируемые установки по переработке отработанного ядерного топлива.

- На последней странице автореферата приведены ссылки на достаточно старые и некоторые спорные работы, но нет ссылок на работы ведущего специалиста по вакуумным разрядам К.Н. Ульянова и его школы.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

- д.ф.-м.н., профессор Паперный В.Л. является ведущим ученым в области исследования источников плазмы на основе газовых разрядов, в том числе вакуумных дуг, и их практического приложения в задачах масс сепарации веществ;

1. V.L. Papernyi, N.V. Lebedev «Separation of the Heavy and Light Ion Components in a Plasma Flow Propagating in a Curvilinear Magnetic Field» // Plasma Physics Reports. 2014. V. 40. № 1. P. 84-88;

2.V.L. Paperny, V.I. Krasov, N.V. Lebedev, N.V. Astrakchantsev, A.A. Chernikgh «Vacuum arc plasma mass separator» // Plasma Sources Sci. Technol. 2015. I.1. V.24. № 1. P.015009;

3.V.I. Krasov, V.L. Paperny «Ion acceleration in multi-species cathodic plasma jet» // Physics of Plasmas. 2016. V.23. I.2. P.054507.

- к.ф.-м.н. Хрипунов Б.И. является признанным специалистом в области изучения вопросов взаимодействия плазменных потоков с поверхностью твердого тела.

1. Spitsyn A.V., Golubeva A.V., Bobyr N.P., Khripunov B.I., Cherkez D.I., Petrov V.B., Mayer M., Ogorodnikova O.V., Alimov V.K., Klimov N.S., Putrik A., Chernov V.M., Leontieva-Smirnova M.V., Gasparyan Y.M., Efimov V.S. «Retention of deuterium in damaged low-activation steel rusfer (EK-181) after gas and plasma exposure» // Journal of Nuclear Materials. 2014. V. 455. P. 561-567.;

2. Bobyr N.P., Khripunov B.I., Spitsyn A.V., Golubeva A.V., Petrov V.B., Alimov V.K., Mayer M., Hatano Y. «Influence of helium on hydrogen isotope exchange in tungsten at sequential exposures to deuterium and helium-protium plasmas» // Journal of Nuclear Materials. 2015. V. 463. P. 1112-1124.

3. Хрипунов Б.И., Койдан В.С., Рязанов А.И., Гуреев В.М., Корниенко С.Н., Латушкин С.Т., Муксунов А.М., Семенов Е.В., Столярова В.Г., Унежев В.Н. «Радиационно-повреждённый вольфрам: получение и исследование в потоке стационарной плазмы» // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2017. Т. 40. № 4. С. 40-49.

Выбор Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» в качестве ведущей организации обусловлен тем, что АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» является многопрофильной организацией, в которой в частности активно ведутся исследования в области физики плазмы и газового разряда, пробойных характеристик, плазменных ускорителей, взаимодействия плазменных потоков с веществом и диагностики быстропротекающих процессов.

1. Шишпанов А.И., Ионих Ю.З., Мещанов А.В., Дятко Н.А. «Эффект памяти при зажигании тлеющего разряда низкого давления в азоте в длинной разрядной трубке» // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 6. С. 548.

2. Akishev Y., Karalnik V., Kochetov I., Napartovich A., Trushkin N. «High-Current Cathode and Anode Spots in Gas Discharges at Moderate and Elevated Pressures» // Plasma Sources Science and Technology. 2014. V. 23. № 5. P. 054013.

3. Болдарев А.С., Болховитинов Е.А., Вичев И.Ю., Волков Г.С., Гасилов В.А., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Данько С.А., Зайцев В.И., Новиков В.Г., Олейник Г.М., Ольховская О.Г., Рупасов А.А., Федулов М.В., Шиканов А.С. «Методы и результаты исследований спектров излучения мегаамперных z-пинчей на установке АНГАРА-5-1» // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 2. С. 195-199.

Диссертационный совет отмечает, что **на основании выполненных соискателем исследований:**

- 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 гадолиния (Gd), моделирующем испарение и ионизацию урана, в зависимости от температуры катода (1.9 – 2.2 кК) и напряжения горения разряда.
- экспериментально реализован режим работы на катоде из Gd (напряжение на дуге \approx 6В), при котором образуется высокоионизованная (до 100%) плазма, представленная преимущественно однозарядными ионами, удовлетворяющая требованиям технологии плазменной сепарации ОЯТ.
- впервые экспериментально получен диффузный вакуумный дуговой разряд на нетермоэмиссионном катоде из свинца, определены его основные характеристики (ВАХ, зависимость напряжения от температуры катода, тепловой поток в катод) и параметры возникающей свинцовой плазмы. Получены данные о режимах расходования свинцового катода в условиях диффузного разряда и выявлено двукратное сокращение его скорости испарения в сравнении с термическим режимом, эти данные согласуются с гипотезой о преимущественно ионном механизме переноса электрического заряда на катодах с высоким атом-электронным отношением.
- впервые экспериментально реализована и изучена диффузная вакуумная дуга на диэлектрическом катоде из диоксида церия, моделирующем испарение и ионизацию диоксида урана. Определены параметры, при которых существует стационарный разряд. Исследована управляемость напряжением дуги, определены величины теплового потока, поступающего из плазмы в катод, получены данные о параметрах плазмы (электронная температура, средний заряд тяжелых частиц, компонентный и зарядовый состав, энергия ионов).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- получены новые экспериментальные данные, которые могут быть использованы для развития физических моделей, описывающих процессы в прикатодной области диффузных вакуумных дуг на рабочих материалах с высоким атом-электронным отношением;
- измеренные параметры плазменного потока (средний заряд и энергии ионов), вылетающего через анод разряда на термоэмиссионном катоде, позволят более полно описать энергетический баланс процессов, протекающих внутри электродного промежутка.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

- экспериментально реализован приемлемый для технологии плазменного разделения веществ режим работы диффузного вакуумного дугового разряда на гадолиниевом катоде;
- получены экспериментальные данные о результатах перевода веществ, моделирующих отработавшее ядерное топливо (Gd, Pb, CeO₂), в состояние плазмы для задач активно разрабатываемого сегодня метода плазменной сепарации.
- результаты исследования впервые полученных диффузных вакуумных дуговых разрядов на нетермоэмиссионном катоде из свинца, и на керамическом катоде из диоксида, могут быть использованы для создания производительных источников плазмы в целях нанесения новых функциональных покрытий и создания композитных материалов;

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования 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 университетах.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- идея диссертационной работы основана на анализе научно-технической литературы по предметной области исследования и обобщении опыта работы других научных групп.
- результаты работы получены с использованием широко известных экспериментальных методов диагностики плазмы и обработки экспериментальных данных, присутствует воспроизводимость результатов;
- исследование выполнено на экспериментальном стенде и с использованием оборудования, зарекомендовавшего себя при работе с ним других научных групп;
- установлено качественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в литературных источниках по данной тематике;
- результаты не раз обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях, а также были удостоены премий на конкурсах научных работ аспирантов;

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в проведении экспериментов, выборе направления исследований, и постановке целей. Автор принимал активное участие в выборе веществ, моделирующих в разряде отработавшее ядерное топливо. Подготовка оборудования, схем диагностики параметров плазмы вакуумной дуги и обработка экспериментальных данных производилась автором самостоятельно. Апробация результатов исследования проводилась на более чем 12 российских и международных конференциях, в которых соискатель

принимал личное участие. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены автором лично.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

На заседании от 30.05.2018г. диссертационный совет принял решение присудить Усманову Р.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 23 человек, из них 12 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 22, против 0, недействительных бюллетеней 1.

Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02

д.ф.-м.н., профессор



Андреев Н.Е.

ВРИО ученого секретаря диссертационного совета Д 002.110.02

д.ф.-м.н., профессор



Василяк Л.М.



30.05.2018г.