

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.193.01
(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 27.12.2023г. № 20

О присуждении Мельникову Антону Дмитриевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом на оксид-содержащих материалах и многокомпонентных смесях для задачи плазменной сепарации ОЯТ» по специальности 1.3.9 – физика плазмы принята к защите 26.10.2023г., (протокол заседания № 14) диссертационным советом 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012г.

Соискатель Мельников Антон Дмитриевич 1996 года рождения, в 2020 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

Работает в должности научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

С 2020 года по настоящее время проходит обучение в очной аспирантуре Федерального государственного автономного образовательного

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

Диссертация выполнена в лаборатории № 2.1. – электрофизических и плазменных устройств Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук Усманов Равиль Анатольевич.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и космической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет» (664003 г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, 8(3952)521-264, paperny@math.isu.runnet.ru), Паперный Виктор Львович;

- кандидат физико-математических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой физики плазмы Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ», (115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, 31, тел.: (495) 788-56-99, mephi.ru, e-mail - info@mephi.ru), Гаспарян Юрий Микаэлович.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск) в своем положительном заключении, составленном главным научным сотрудником лаборатории плазменной эмиссионной электроники д.ф.-м.н., профессором кафедры физики плазмы Ковалем Николаем Николаевичем (утвержденном 17.11.2023г. директором

Романченко И.В.) указала, что в работе приведен ряд новых физических результатов, касающихся вакуумного дугового разряда:

- 1) Была 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.
- 2) Получены новые данные об условиях на температуру катода для реализации стационарных режимов горения вакуумного дугового разряда на керамическом катоде из диоксида церия.
- 3) Установлены зависимости ионного состава плазмы вакуумного дугового разряда на керамическом 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 плазмы.

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 государственных университетах.

Соискатель имеет 28 печатных работ. По теме диссертационной работы (кроме трудов конференций) автор имеет 7 статей в журналах из перечня ВАК, причем они опубликованы в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science.

1. *Melnikov A. D., Usmanov R. A., Gavrikov A. V., Polistchook V. P., Antonov N. N., Samoylov I. S., Smirnov V. P. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2023. – Vol. 43. – P. 347–360.*
2. *Usmanov R. A., Melnikov A. D., Gavrikov A. V., Antonov N. N., Polistchook V. P. // Review of Scientific Instruments. – 2022. – Vol. 93. – P. 073505.*
3. *Polishchuk V. P., Usmanov R. A., Melnikov A. D., Yartsev I. M. // High Temperature Material Processes. – 2022. – Vol. 27, No. 3. – P. 43–49.*
4. *Usmanov R. A., Amirov R. Kh., Gavrikov A. V., Liziakin G. D., Melnikov A. D., Polistchook V. P., Samoylov I. S., Smirnov V. P., Vorona N. A., Yartsev I. M. //, Plasma Sources Science and Technology. – 2020. – Vol. 29, No. 1. – P. 015004.*
5. *Мельников А. Д., Усманов Р. А., Амиров Р. Х., Антонов Н. Н., Гавриков А. В., Лизякин Г. Д., Полищук В. П., Смирнов В. П. // Физика плазмы. – 2020. – т. 46, №. 6. – стр. 510–515.*
6. *Vetrova, S. B., Usmanov, R. A., Antonov N. N., Melnikov, A. D., Polishchuk V. P. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2023. – Vol. 51, No. 4. – P. 1101–1106.*
7. *Полищук В. П., Усманов Р. А., Мельников А. Д., Ворона Н. А., Ярцев И. М., Амиров Р. Х., Гавриков А. В., Лизякин Г. Д., Самойлов И. С., Смирнов В. П., Антонов Н. Н. // Теплофизика высоких температур. – 2020. – т. 58, №. 4. – стр. 515–535.*

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева» (зав. кафедрой общей физики д.ф.-м.н., профессор Тимеркаев Б.А., доцент кафедры общей физики Сайфутдинов А.И.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Однозначность связи падения напряжения со временем и расходования материала катода при описании результатов исследования эволюции параметров диффузной дуги на катоде из диоксида церия кажется неочевидной и требует более подробного обсуждения.

- Недостаточно подробно описано взаимодействие материала тигля с оксидными катодами.

2. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (ведущий научный сотрудник отдела микроэлектроники НИИЯФ МГУ, д.ф.-м.н. Паль Александр Фридрихович) – отзыв положительный, с вопросом:

- В автореферате указывается, что в экспериментах с катодом из диоксида церия в масс-спектре были обнаружены отрицательные ионы с концентрацией на несколько порядков меньше, концентрации основных компонентов ионного состава плазмы. Возникает вопрос о доли кислорода в нейтральном газе. Проводились ли измерения содержания кислорода в паре?

3. Акционерное общество "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований", (научный руководитель отделения теоретической физики, вычислительной математики и перспективных разработок, д.ф.-м.н. Филиппов Анатолий Васильевич) – отзыв положительный, с замечаниями:

- В разделе 4.4 отмечается, что на поверхности многокомпонентного катода из смеси нетермоэмиссионных оксида и металла (TiO_2/Cr) наблюдаются катодные пятна, но не разъясняется присутствует ли при этом в потоке плазмы капельная фракция, нежелательная для метода плазменной переработки ОЯТ.

- При обосновании актуальности работы автор указывает, что требуемая производительность источника плазмы 100 г/час, но в самом тексте автореферата не приводятся достигнутые величины производительности для разных материалов катода.

- Чтение автореферата, который является в некотором смысле самостоятельной работой, затруднено из-за того, что в нем не приводится информации о электропроводных и термоэмиссионных свойствах используемых материалов катода.

4. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН)» (старший научный сотрудник ИЯФ СО РАН Солдаткина Елена Ивановна) - отзыв положительный, с замечаниями:

- В автореферате не приводится описание отличий созданного источника плазмы, упоминаемого в разделе 5.2, от использовавшегося ранее, а также не описаны причины, приведшие к необходимости в разработке нового источника. Во-вторых, в автореферате не обосновывается выбор материалов катода для моделирования ОЯТ. Также в автореферате содержится заметное количество грамматических и пунктуационных ошибок.

5. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (с.н.с. группы низкотемпературной плазмы Института электрофизики УрО РАН к.ф.-м.н. Кузнецов Д.Л.) - отзыв положительный, с двумя замечаниями:

- На стр. 9 автореферата при описании требований к источнику плазмы приведена фраза «Степень ионизации в выходящем потоке близкая к 100%», а на стр. 13 – фраза «со степенью ионизации близкой к 1». Хотелось бы уточнить, что автор вкладывает в понятие «степень ионизации» и относится ли оно только к компонентам плазмы, образованным из материала катода и тигля, или ко всей плазме. Поскольку обычно под степенью ионизации понимают отношение концентраций заряженных частиц одного знака к концентрации нейтральных частиц, степень ионизации, равная 1, соответствует равенству концентраций заряженных и нейтральных частиц, а полностью ионизованная плазма имеет степень ионизации, стремящуюся к

бесконечности (такая плазма является высокотемпературной и не может быть получена в условиях обычного вакуумного дугового разряда).

- Ссылки на рисунки 8 и 9 в тексте автореферата (стр. 20), по моему мнению, не вполне соответствуют подписям к этим рисункам. Возможно, ссылки даны на другие рисунки из диссертации?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н., профессор Паперный Виктор Львович 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. В.Л. Паперный, Н.В. Лебедев «Сепарация “тяжелой” и “легкой” ионных компонент при движении плазменного потока в криволинейном магнитном поле» // Физика плазмы. 2014. Т. 40. стр. 90

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., Гаспарян Юрий Микаэлович является специалистом в области физики плазмы, соавтором более 100 публикаций, и экспертом в области взаимодействия ионных потоков с металлическими поверхностями.

1. V. Kulagin, Y. Gasparyan «Effect of material properties on the laser-induced desorption of hydrogen from tungsten» // Journal of Nuclear Materials 587 (2023) 154747

2. V. Kulagin, Y. Gasparyan, N. Degtyarenko.«Numerical estimation of the atomic fraction during laser-induced desorption of hydrogen from tungsten and beryllium» // Fusion Engineering and Design. 184 (2022) 113287

3. Z. Harutyunyan, Y. Gasparyan, V. Efimov, A. Litnovsky, F. Klein, A. Pisarev, J.W. Coenen, Ch. Linsmeier. «Analysis of trapping sites for deuterium in W–Cr–

Выбор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук в качестве ведущей организации обусловлен тем, что она является профильной организацией, специализирующейся на исследованиях в области физики плазмы, включая изучение вакуумного дугового разряда и его применениях в технологических процессах.

1. N. V. Landl, Y. D. Korolev, A. V. Kozyrev, I. V. Lopatin «Methods for estimating plasma density in a large- volume hollow anode» // Russian Physics Journal, vol. 65, no. 7, pp. 1186– 1193, 2022
2. V. Frolova, A. Nikolaev, E. Oks, A. Sidorov, A. Vizir, A. Vodopyanov, A. Yushkov, G. Yushkov «Supersonic Flow of Vacuum Arc Plasma in a Magnetic Field» // IEEE Transactions on Plasma Science, T. 49 V. 9, C. 2478-2489, 2021
3. S.A. Popov, E.L. Dubrovskaya, A.V. Schneider, A.V. Batrakov «Influence of a Non- Stationary Magnetic Field on the Charge Composition and Energy Distribution of Ions of the Cathode Plasma of a Vacuum Arc» // Russian Physics Journal, 2021, 64(6), pp. 1025- 1032

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– впервые экспериментально реализована и изучена диффузная вакуумная дуга на многокомпонентным катодом из смеси оксида CeO_2 и металла Cr, моделирующей отработавшее ядерное топливо. Показано, что массовое соотношение компонентов термоэмиссионного оксида и не термоэмиссионного металла определяет характер зависимости напряжения разряда от температуры катода и, следовательно, параметры генерируемой плазмы. Показано, что перевод не термоэмиссионного оксида (TiO_2) в плазменное состояние, возможен в составе смесового катода с не термоэмиссионным металлом, т.к. именно наличие катодных пятен,

наблюдающихся на поверхности катода в случае такой смеси, обеспечивает попадание оксида в плазмообразующую среду. Выявлены условия реализации диффузной формы вакуумного дугового разряда со смесевым катодом в зависимости от атом-электронного отношения.

– предложен метод времяпролетной масс-спектропии для измерения ионного состава направленного, непрерывного потока плазмы, позволяющий проводить измерения как относительного, так и абсолютного содержания ионов продуктов эрозии катода в вакуумном дуговом разряде и на основе метода создан масс-спектрометр с разрешением равным 20.

– создан источник плазмы на основе вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом и продемонстрирована возможность реализовать диффузный тип привязки тока на катод из Gd во внешнем продольном магнитном поле, а также осуществимость режимов разряда с низким напряжением (ниже 7 В), в которых в составе выходящего потока плазмы преобладают однократные ионы.

– проведено исследование ионного состава плазмы диффузной вакуумной дуги с керамическим катодом из термоэмиссионного CeO_2 в зависимости от тока дуги, температуры катода и времени эксперимента. Обнаружено слабое, в сравнении с катодом из Gd, влияние температуры катода на ионный состав. Установлено, что при повышении тока дуги снижается содержание молекулярных ионов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– результаты исследования условий реализации диффузного и контрагированного типов дуги, параметры наблюдавшихся катодных пятен, полученные зависимости характеристик источника плазмы (V_{AX} , $U(P_{элп})$) от теплофизических характеристик материалов катода и измеренные параметры генерируемой плазмы (средний заряд, энергия ионов, температура электронов, состав плазмы) могут быть полезны при построении теоретических моделей физических процессов в вакуумном дуговом разряде.

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

– полученные в работе результаты показывают возможность использования источника плазмы на основе вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом для перевода в плазменное состояние смесей металлов и оксидов. Кроме того, совокупность полученных результатов о параметрах разряда и генерируемой плазмы может быть ценной при разработке источников плазмы, например, в задачах нанесения пленочных покрытий.

– предложенная схема времяпролетного масс-спектрометра может быть использована для диагностики непрерывных потоков плазмы.

– экспериментально показана возможность реализовать режимы диффузного вакуумного дугового разряда с керамическим и многокомпонентным катодами, удовлетворяющие требованиям метода плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- результаты получены с использованием классических экспериментальных методов диагностики плазмы с применением современного оборудования, измерения проводились многократно и наблюдалась воспроизводимость результатов;

- установлено качественное совпадение полученных результатов с результатами, опубликованными в литературных источниках по данной тематике и теоретическими ожиданиями;

- результаты работы обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях, а также были отмечены премией на конкурсе научных работ;

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в проведении экспериментов. Автор принимал активное участие в разработке времяпролетного масс-спектрометра. Соискатель внес ключевой вклад в создание экспериментального стенда для исследования вакуумного дугового

разряда во внешнем магнитном поле и нового источника плазмы. Обработка и анализ полученных экспериментальных данных производилась автором диссертационной работы самостоятельно.

Апробация результатов исследования проводилась на 16 российских и международных конференциях и симпозиумах. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии автора.

В ходе защиты диссертации замечаний высказано не было.

Соискатель Мельников Антон Дмитриевич ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, согласился с замечаниями и привел собственную аргументацию.

На заседании от 27.12.2023г. диссертационный совет принял решение присудить Мельникову Антону Дмитриевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) в количестве 27 человек, из них очно: 10 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 6 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 2 доктора наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 6 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 27, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н., профессор

Петров О.Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

к.ф.-м.н.

Тимофеев А.В.

27.12.2023г.