

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
от 27 декабря 2023 г. (протокол № 20)

**Защита диссертации Мельникова Антона Дмитриевича
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
«Исследование вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом
на оксид-содержащих материалах и многокомпонентных смесях для
задачи плазменной сепарации ОЯТ»**

Специальность 1.3.9 – физика плазмы

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2).

Протокол № 20 от 27 декабря 2023 г.

Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105/нк в составе 31 человека. На заседании присутствуют 27 человек, из них 12 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 12 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель – председатель диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)
д.ф.-м.н., профессор Петров Олег Федорович

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)
к.ф.-м.н. Тимофеев Алексей Владимирович

1.	Петров О.Ф.	д.ф.-м.н., проф., академик РАН	1.3.9, техн. науки	Присутствует
2.	Андреев Н.Е.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, физ.-мат. науки	Присутствует
3.	Храпак А.Г.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
4.	Тимофеев А.В.	к.ф.-м.н.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
5.	Агранат М.Б.	д.ф.-м.н.	1.3.14, техн. науки	Присутствует
6.	Амиров Р.Х.	д.ф.-м.н., ст.н.с.	1.3.9, физ.-мат.науки	Отсутствует
7.	Беляев И.А.	к.т.н.	1.3.14, техн. науки	Присутствует
8.	Вараксин А.Ю.	чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф.,	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
9.	Васильев М.М.	д.ф.-м.н.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
10.	Васильев М.Н.	д.ф.-м.н., доцент	1.3.14, техн. науки	Присутствует
11.	Василяк Л.М.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
12.	Гавриков А.В.	д.ф.-м.н., доцент	1.3.9, техн. науки	Присутствует
13.	Голуб В.В.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.14, техн. науки	Присутствует
14.	Грязнов В.К.	д.ф.-м.н., ст.н.с.	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
15.	Дьячков Л.Г.	д.ф.-м.н.,	1.3.9, техн. науки	Присутствует
16.	Еремин А.В.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.14,	Присутствует

17.	Зейгарник Ю.А.	д.т.н., старший научный сотрудник	физ.-мат.науки 1.3.14, техн. науки	Присутствует
18.	Зеленер Б.Б.	д.ф.-м.н.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
19.	Зобнин А.В.	д.ф.-м.н.,	1.3.9, техн. науки	Присутствует
20.	Иосилевский И.Л.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
21.	Киверин А.Д.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
22.	Лагарьков А.Н.	д.ф.-м.н., проф., академик РАН	1.3.9, физ.-мат.науки	Отсутствует
23.	Левашов П.Р.	к.ф.-м.н.	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
24.	Ломоносов И.В.	чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф.	1.3.14, техн. науки	Присутствует
25.	Медин С.А.	д.т.н., проф.	1.3.14, техн. науки	Отсутствует
26.	Норман Г.Э.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
27.	Пикуз С.А.	к.ф.-м.н.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
28.	Савватимский А.И.	д.т.н.	1.3.14, техн. науки	Присутствует
29.	Стегайлов В.В.	д.ф.-м.н., доцент	1.3.9, техн. науки	Отсутствует
30.	Филиппов А.В.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
31.	Яньков Г.Г.	д.т.н., старший научный сотрудник	1.3.14, физ.-мат.науки	Отсутствует

ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации научного сотрудника лаборатории № 2.1. – электрофизических и плазменных устройств Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Мельникова Антона Дмитриевича** на тему «Исследование вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом на оксид-содержащих материалах и многокомпонентных смесях для задачи плазменной сепарации ОЯТ». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы. Диссертация выполнена в лаборатории № 2.1. – электрофизических и плазменных устройств ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2).

Научный руководитель:

Усманов Равиль Анатольевич – к.ф.-м.н., заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

Официальные оппоненты:

Паперный Виктор Львович - гражданин РФ, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой общей и космической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутского государственного университета» (Россия, 664003 г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1).

Гаспарян Юрий Микаэлович – гражданин РФ, к.ф.-м.н., 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).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., профессор Паперный В.Л. и к.ф.-м.н. Гаспарян Ю.М., научный руководитель Мельникова А.Д. к.ф.-м.н. Усманов Р.А.

СТЕНОГРАММА

Председатель

Уважаемые коллеги, отведенные 5 минут прошли я прошу занимать всех места. Мы начинаем вторую защиту сегодня. Будет представлена работа Мельникова Антона Дмитриевича на тему: «Исследование вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом на оксид-содержащих материалах и многокомпонентных смесях для задачи плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива». Диссертация представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы. Слово ученому секретарю, пожалуйста.

Ученый секретарь

(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).

Председатель

Есть ли вопросы к Алексею Владимировичу? Если нет, тогда слово, для изложения основных положений, работы предоставляется Антону Дмитриевичу. Пожалуйста, Антон Дмитриевич.

Мельников А.Д.

Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Мельникова А.Д. прилагается).

Председатель

Спасибо. Теперь переходим к вопросам. Пожалуйста, кто хотел бы задать?

Зобнин А.В.

Здравствуйте еще раз. Я хотел бы уточнить: говорилось о тигле, как он конструктивно связан с катодом, почему разряд горел на катод, а не на тигель.

Мельников А.Д.

Схема установки, такая (показывает на слайде). Тигель размещался на держателе, который не позволял электронам из электронно-лучевого подогрева выйти в разрядный промежуток. Соответственно, подогревалось дно катода, по факту. Соответственно, плазма может как разогревать, так и охлаждать катод. В частности, в экспериментах с диоксидом церия, плазма приносила энергию в катод, т.е. увеличивала температуру, а в экспериментах с гадолинием, из-за высокой термоэмиссии, разряд, наоборот, охлаждает катод при этом после зажигания приходится повышать мощность подогрева, чтобы перейти в стабильные режимы. Фактически, у нас разогревается катод, и он является термоэммиттером, если материал термоэмиссионный.

Зобнин А.В.

Спасибо, т.е. получается, что тигель, фактически, он даже холоднее катода?

Мельников А.Д.

Он все-таки, скорее всегда горячее за счет теплопроводности. Например, в том же диоксиде церия у него теплопроводность не очень высокая. И как раз из-за этого происходит догрев поверхности катода, потому что поверхность недостаточно прогрета, не хватает эмиссии паров и термоэлектронов. Разряд догревает до нужного уровня. Металл при этом достаточно хорошо разогреет.

Зобнин А.В.

Спасибо.

Председатель

Еще вопросы, пожалуйста? (*немного ожидает*). Нет ни у кого вопросов? Тогда я задам вопрос. Знаете, есть такой небольшой экскурс в историю физики плазмы нашего института. Один из крупнейших отделов по физике плазмы возглавлял Олег Иванович Осинковский. Достаточно будет упомянуть, что из присутствующих есть те, кто работал в этом отделе и вышли из него. Притом это число не равно единице, побольше. Я хотел сказать, мне посчастливилось, что он был оппонентом по моей докторской диссертации, и у него было несколько любимых вопросов. Один из них звучал так: «какая была сверхзадача в вашей работе», а второй: «назовите до трех результатов, которые Вы считаете самыми яркими в Вашей работе». Я Вам адресую эти вопросы. Какая здесь сверхзадача, и какие результаты Вы считаете самыми яркими

Мельников А.Д.

Действительно, спасибо большое за вопрос. Сверхзадачей является создать источник плазмы, который на выходе давал бы поток низкотемпературной плазмы с максимально возможной степенью ионизации. При этом потом планируется повышать производительность. Соответственно, самые интересные результаты состоят в следующем. Самое интересное, это наблюдение катодных пятен на диоксиде церия, т.к. они являются не классическими и важность этого результата состоит в том, что еще нет общепринятой модели катодного пятна и эти результаты могут предоставить дополнительную информацию для их развития. Вторым важным и очень интересным результатом, на мой взгляд является, то, что мы можем в плазменное состояние переводить смесевые катоды и все определяется комбинацией параметров материалов и варьируя массовое соотношения, исходя из характеристик материалов мы можем реализовывать желаемые характеристики разряда, к примеру ВАХ разряда. Это тоже очень интересный результат. Другой важный результат, возможно, не в таком глобальном плане, но в плане трудозатрат – это конечно создание экспериментального стенда и источника плазмы, который позволит в дальнейшем провести физические исследования и продолжить развитие данного направления и для меня это является важным результатом.

Председатель

Спасибо. Вопросы возникли? Пожалуйста, Павел Ремирович.

Левашев П.Р.

Вы сказали, что в плазму попадает материал тигля до 15%. Это эффект вредный для вас или безразличный, надо с этим эффектом бороться.

Мельников А.Д.

С этим эффектом определенно надо бороться, но эти значения, даже до 40% наблюдалось. Это скорее максимальное, которое было зарегистрировано, при этом очень важные результаты при исследовании ионного состава мы видим, что при использовании молибденового тигля при больших тока доля материала, это красная линия, достаточно мала. В случае, использования вольфрамового тигля она возрастает. Но мы можем получить ответ, что при использовании молибденового тигля, мы можем реализовать режимы с низкой долей. Если же материал присутствует, то это, конечно, негативный фактор, т.к. он будет куда-то осаждаться и это в общем-то может нарушать процесс разделения, так как может приводить к дополнительному перекрытию.

Председатель

Михаил Михайлович, пожалуйста.

Васильев М.М.

Вот Вы, отвечая на вопрос Олега Федоровича, сказали, что одна из задач, которая стоит перед вами, это повышение доли ионизированного вещества в плазме. Какие вы видите пути решения данной задачи.

Мельников А.Д.

Важное обстоятельство, что речь идет про степень ионизации в выходящем потоке. Не в самом разрядном промежутке и, согласно измерениям зондовым методом, она уже большая особенно в случае использования керамических катодов. При переходе на высокие производительности эта задача становится более сложной, т.к. сложно реализовать высокий выходной ток из источника с высокой степенью ионизации и для этого в дальнейшем потребуется переход к многостадийным источникам, т.е. не так, как было у нас – один разряд, а некая комбинация которые используются и известны. К примеру, за счет внешнего электронного пучка или ВЧ разряд, можно увеличить степень ионизации.

Председатель

Спасибо. Есть еще вопросы? Если вопросов нет, мы переходим к следующему пункту. Слово предоставляется научному руководителю Равилю Анатольевичу Усманову кандидату физ.-мат. наук.

Усманов Р.А.

Спасибо. Уважаемые члены диссертационного совета, я бы еще раз хотел отметить оригинальности работы Антона и ее практическую направленность. Здесь, как мне кажется, получены интересные и интригующие результаты. Это как Антон отмечал и новый тип катодных пятен на диэлектрических катодах и измеренное большое количество параметров плазменных потоков, генерируемых плазматроном со смешанным катодом. Конечно, это и реализованный диффузный разряд в магнитном поле, такого еще никто не делал. Мне кажется, самое главное, что эти результаты продвигают задачу нашей лаборатории, где мы разрабатываем метод плазменной сепарации. Также Антон здесь показал технические результаты, без них невозможно было бы получить новые научные. Поэтому здесь большая заслуга Антона. Как молодого ученого, я бы его охарактеризовал только с хорошей стороны. Он большой молодец, очень упорно работал и был заряжен на результат. Его энтузиазм нас просто поражал иногда, он не опускал руки, если что-то не получалось, а на самом деле наладка нового стенда и экспериментальные диагностики параметров плазмы, это не такая простая вещь. Трудности бывают, но Антон успешно с ними справлялся и последние 3-3.5 года, когда он работал над диссертацией он на наших глазах получал весь этот теоретический и практический опыт самостоятельного ведения научного исследования и я надеюсь, что своим рассказом он и Вас убедил в том, что он достоин звания кандидата и еще убедит во время оппонирования. Спасибо.

Председатель

Спасибо, Равиль Анатольевич. Есть ли вопросы к научному руководителю? К Равилю Анатольевичу нет. Спасибо. Слово Алексею Владимировичу.

Ученый секретарь

Дорогие коллеги. В деле имеется заключение объединенного института высоких температур организации, где была выполнена работа. Если позволите, в этом и следующих отзывах я не буду зачитывать описание работы так как мы послушали непосредственно доклад и ответы на вопросы. Буду переходить к важной составляющей на текущем рассмотрении диссертации. Диссертация Мельникова А.Д. рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидат физ.-мат. Наук по специальности 1.3.9.- физики плазмы. Рекомендуются ведущая организация и оппоненты, которые и были

выбраны. Подписано академиком РАН Олегом Федоровичем Петровым председателем семинара. Также в деле имеется отзыв ведущей организации - институтом сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук. Отзыв составил главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники д.т.н. профессор по кафедре физики плазмы Николай Николаевич Коваль. Отзыв положительный. Пропущу подробное описание работы, научной новизны, актуальности, личного вклада, практической значимости и переходу к замечаниям.

Первое, согласно сформулированным в диссертации условиям для метода плазменной сепарации ОЯТ важно отсутствие капельной фракции катодного материала, и именно по этой причине выбирается диффузный вакуумный дуговой разряд для генерации бескапельной плазмы. Тем не менее в работе показано, что существуют режимы с катодными пятнами в случае оксид-содержащих катодов, в которых возможно появление микрокапель, но в тексте диссертации не обсуждается проблема их возможного появления и меры избавления от микрокапель в данных режимах, а также о том, как это может сказаться на работе устройства сепарации ОЯТ.

Второе замечание, в главе 3 приводятся параметры и вид наблюдавшихся катодных пятен. Они заметно отличаются от классических пятен на металлических катодах, но в тексте не уделяется достаточного внимания объяснению имевших место различий.

Третье замечание, одним из основных параметров диффузного дугового разряда в работе выступала температура катода. В эксперименте же проводятся измерения температуры на боковой поверхности тигля, а не на поверхности подогреваемого катода. В случае использования керамических материалов катода с низкой теплопроводностью эквивалентность температур в этих различных областях стоило бы специально обосновать.

Четвертое замечание, в пятой главе работы представлены результаты по инициации и поддержанию разряда на разработанном и созданном источнике плазмы, но не приводятся экспериментально измеренные параметры генерируемой плазмы.

Пятое замечание, на рис. 5.9, 5.10, 5.11, 5.29 построены экспериментальные зависимости по трём точкам и без указания разброса значений, что является некорректным.

Шестое замечание, в положении 5, выносимом на защиту, указаны диапазоны параметров плазменного источника: «ток разряда 0-300 А, напряжение 0-60 В». Однако ток разряда, как и напряжение не могут быть равны «0», так как имеется минимальный пороговый ток дуги и минимально возможное напряжение горения дуги.

Седьмое замечание, в тексте диссертации встречаются неточности и ошибки. Так, например, на стр. 45, утверждается, что "Научной группой из Томского Государственного Университета был разработан времяпролетный МС для диагностики плазменных систем." Данное утверждение в корне не верно. Указанный масс-спектрометр был создан в ведущей организации по данной диссертации - Институте сильноточной электроники СО РАН, о чём свидетельствуют аффилиации авторов работы [118] из списка литературы диссертации.

Отмеченные недостатки, однако, не являются критическими и не сказываются на общем высоком научном уровне диссертационной работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Мельников Антон Дмитриевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Последний абзац о высоком научном уровне, о соответствии требованиям положения о порядке присуждения и о заслушивании присуждении ученой степени соискателю встречается и следующих отзывах, если позволите буду их пропускать. На

этом замечания в отзыве ведущей организации закончены, и я перехожу к отзывам на автореферат. В деле имеется 5 отзывов на автореферат. Все 5 отзывов положительнее с замечаниями.

Первый отзыв на автореферат получает от ведущего научного сотрудника микроэлектроники научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ, д.ф.-м.н. Александром Фридриховичем Палем. Отзыв положительный, есть замечание.

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?

Второй отзыв на автореферат получен от научного руководителя отделения теоретической физики, вычислительной математики и перспективных разработок ГНЦ ТРИНИТИ д.ф.-м.н. Анатолия Васильевича Филиппова. Отзыв положительный, есть замечания.

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.

Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки работы.

Следующий отзыв на автореферат получен от с.н.с. группы низкотемпературной плазмы Института электрофизики УрО РАН, доцента к.ф.-м.н. Кузнецова Дмитрия Леонидовича. Отзыв положительный, есть замечание.

Первое, 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).

Второе, 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?

Перечисленные замечания не снижают высокий уровень работы.

Следующий отзыв на автореферат получен от старшего научного сотрудника ИЯФ СО РАН Елены Ивановны Солдаткиной. Отзыв положительный, есть замечание.

К недостаткам можно отнести, что 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.

Отмечен рекомендательный характер замечаний.

Последний отзыв на автореферат получен от зав. кафедрой общей физики д.ф.-м.н., профессор Бориса Ахуновича Тимеркаева и доцента кафедры общей физики д.ф.-м.н. Алмаза Ильгизовича Сайфутдинова. Отмечено два замечания.

Первое, 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.

Второе замечание, недостаточно подробно описано взаимодействие материала тигля с оксидными катодами. Также отмечен рекомендательный характер и соответствие пункту 9 положению.

Председатель

Спасибо, Алексей Владимирович. Антон Дмитриевич Вам слово для ответа на замечания.

Мельников А.Д.

Я сгруппировал замечания по группам по возможности объединил по тематике. Первый вопрос, на который хотелось бы ответить, это вопрос, относящийся к присутствию капельной фракции в плазменном потоке при наблюдении катодных пятен на поверхности катода. Тут стоит сказать, что основным критерием присутствия пятен и методом их обнаружения являлась визуальная диагностика разряда. Мы не наблюдали треков, которые наблюдались нами ранее (*показывает на слайде*). Это связано с тем, что наблюдаемые на металлических холодных катодах пятна, которые сопровождаются появлением капельной фракции, происходит при низкой средней температуре, а тут средняя температура высокая и нельзя говорить, что разряд контрагированный и, возможно, лучше говорить квазидиффузный. Появления капельной фракции при этом не происходит при наблюдении пятен.

Соответственно, по поводу того, почему катодные пятна сильно отличаются от, наблюдаемых на металлических катодах. Это связано с проводимостью, график которой показан на данном рисунке. Данных для температур, достигаемых в нашем эксперименте, нет, но можно их экстраполировать и это позволяет оценить сопротивление катода. В частности, мы тоже проводили удельного сопротивления катода, соответственно можно вычислить падение напряжения в теле катода, и оно как раз похоже на то, на сколько снижается напряжение в течение эксперимента. Поэтому мы и связываем это снижение с расходом катода. переходя к проводимости, у металлических катодов проводимость на много порядков больше из-за этого катодные пятна легко распространяются по поверхности катода, т.е. их скорость много больше, и они не стационарны. В случае керамических катодов это невозможно. При появлении пятна материал разогревается, возрастает проводимость, но по мере расходования материала образуется ямка и пятну выгодно переходить в соседняя область, где появляется микрорельеф. Таким образом оно медленно перемещается по поверхности катода.

Двигаясь дальше, можно ответить на вопрос про степень ионизации. Действительно, существует несколько вариантов ввести данное понятие. Мы пользовались определением, в котором находим отношение суммарной концентрации ионизированных компонент, включая молекулярные, атомарные и делим на общую концентрацию. Т.е. смотрим не отношение ионизированной и нейтральной, а ионизированной и общей, т.е. полная ионизации соответствует 1 или 100%.

Есть замечание, отмечающее, что в магнитном поле не приводятся измеренные параметры плазмы. Тут ответ – главным вопросом являлась возможность реализовать режимы с низким напряжением, и для этого в первую очередь измерялись зависимости напряжения от мощности и магнитного поля. Несомненно, в дальнейшем, это замечание нужно учесть и проводить измерение критически важных для нас параметров плазмы. Это

запланировано на будущую работу.

По поводу графиков с тремя точками. Они приведены в разделе с аточным магнитным поле, и все дело в том, что не получилось реализовать стабильный разряд в режимах с магнитным полем близким к 100 Гс и выше, и провести достоверные измерения параметров было нельзя. Таким образом, у нас было всего три точки, но по ним уже можно сделать вывод о характере влияния магнитного поля. Опять же таки, это в предварительной серии с магнитным полем, в которой мы выявили негативные факторы конструкции источника.

Также есть замечание, касающееся указания в положениях параметров источника и указано, что ток от 0 до 300 А. Тут, действительно, не указано пороговое значение и с этим несомненно надо согласиться, т.к. существует некое минимальное значение тока и напряжения, при котором разряд функционирует.

Также имеется опечатка касающаяся того, что времяпролетный масс-спектрометр создан группой из Томского университета, и это действительно курьезная опечатка, связанная с тем, что один человек из ТГУ там присутствует, но основная группа из ИСЭ СО РАН и этот прибор там эксплуатируется.

Важный вопрос – это эквивалентность температур тигля и катода. Мы измеряем боковую поверхности тигля, а физически значимым параметром является температура катода. Ответ следующий. Температура тигля позволяет судить о средней температуре катода, а теплопроводность при этом влияет на время установления стационарного режима. Я привел график с напряжением, а судить о стационаре, т.е. прекращении изменения температура катода. можно судить по тому, что перестало меняться напряжения разряда. В частности, мы варьируем любой параметр попадаем в переходный режим, у которого время стабилизации для металлического катода порядка минуты, а дальше мы выходим на полочку, и при этом мы как раз и можем говорить о том, что температура уже установилась и соответствует средней температуре тигля. Таким образом, можно обосновать эквивалентность этих температур. Хотя конечно, хорошо бы непосредственно измерять температуру поверхности катода, но это очень сложно технически по ряду причин.

Было еще замечание касающиеся отличий нового источника от использовавшегося ранее. Это относится к автореферату, там, действительно, присутствует фраза, что в таком-то разделе подробно описаны отличия и причины, побудившие к созданию нового, но сами эти причины не приводятся, потому что это показалось избыточным для автореферата. Но, конечно, из-за этого страдает полнота изложения.

Также есть замечание по поводу обоснования выбора материалов катода. Этого не сделано в автореферате по той причине, что очень подробно это было изложено в работе моего научного руководителя и хотелось избежать дублирования информации и она была опущена, хотя она, несомненно, является важной.

Есть замечание, касающееся ссылок на рисунки. Ссылки приведены на нужные рисунки, но возможно место выбрано не очень удачно и возникает некоторое недопонимание. Ссылку на один из рисунков, возможно, стоило поместить чуть ранее. Это рисунки, относящиеся к измерениям в магнитном поле.

Также упоминается, что недостаточно подробно описано взаимодействие материала тигля с оксидными материалами. Это, действительно, так, потому что мы можем выдвинуть лишь гипотетическое предположение о том, что происходит в тигле при высоких температурах. Так как мы не можем из-за высокой температуры во время эксперимента провести анализ, а когда мы вытащим наш катод на атмосферу произойдет его доокисление, поэтому и элементный анализ затруднен, т.к. он будет не достоверным. Тем не менее, мы можем высказать предположение отталкиваться от давления насыщенных паров тех или иных оксидов.

Также вопрос про содержание кислорода в нейтральной компоненте. Вывод о малости его доли можно сделать на основе оптических измерений, которых проводились. В эмиссионных спектрах плазмы не были обнаружены ни линии атомарного, ни

молекулярные линии кислорода. Мы можем сделать вывод, что весь кислород быстро связывается с горячими элементами установки окисляя их, дальше может присутствовать в виде соединений, поэтому он и не наблюдается в нейтральной компоненте.

Есть еще вопрос про производительность, которая была достигнута. Производительность, требуемая на уровне 100 г/час и даже выше. Скорость испарения катода на уровне 10-30 г/час, при этом из измерений конденсационным зондом мы можем понять сколько вышло по массе в ионах и это значение на уровне 1 г/час на данный момент. Задачи максимизировать производительность пока еще не стояла.

Кажется, на этом я ответил на все замечания по автореферату и от ведущей организации.

Председатель

Спасибо. Переходим теперь к выступлениям оппонентов и слово предоставляется официальному оппоненту д.ф.-м.н. Виктору Львовичу Паперному ИГУ. Пожалуйста Виктор Львович.

Паперный В.Л.

Добрый день, коллеги. Прежде чем, я приступлю к изложению своего отзыва я бы хотел пару слов сказать отвлеченно. Я уже давно слежу за работами этой группы, возглавляемой Андреем Владимировичем. Можно сказать практически с самого начала. Я оппонировал докторскую Андрея Владимировича, кандидатскую диссертацию научного руководителя и вот теперь оппонирую человеку, представляющему третье поколение ученых в этой группе. На мой взгляд, можно говорить о школе, которая создана благодаря усилиям Андрея Владимировича и ребят. Был достаточно длительный период, когда работ не было и потом они пошли и очень успешные, в лучших журналах и пошли защиты в больших количествах. Я очень высоко оцениваю деятельность этой группы. Касательно диссертации безусловно это достойная работа, но о содержательной части я попробую сказать подробнее. С вашего разрешения я не буду касаться содержания работы, актуальности. Во-первых, остановлюсь на наиболее интересных, на мой взгляд, результатах. Нужно сказать, что перевод диэлектрических материалов в плазменную фазу – это довольно непростая задача и есть несколько способов, достаточно хорошо известных. При помощи электронных пучков, с помощью магнетронных разрядов с подогревом и предложенный в работе способ перевода в плазменную фазу комбинированных, композитных катодов дорогого стоит. Потому что получить устойчивый разряд на таких композитных катодах с существенно различными электрофизическими и теплофизическими свойствами компонентов это непростая задача. И то, что авторам удалось получить устойчивый, долговременный разряд, с достаточно большим выходом ионной фазы, я считаю очень серьезным достижением, как с прикладного плана, так и с точки зрения фундаментальной физики высокотемпературных разрядов. По поводу масс-анализатора. Это интересная конструкция, с помощью нее были проведены, на мой взгляд, очень интересные измерения. Ниже я скажу о недостатках, но то, что с помощью нее были сделаны количественные измерения состава, а не просто относительное содержание компонент, а абсолютное, это конечно некое достижение. С этим я впервые столкнулся. Ну и наконец, то, что удалось получить стабильное горение во внешнем магнитном поле, как и то, что это будет далее использоваться в плазменном сепараторе, тоже серьезное достижение, поскольку это совершенно нетривиально. Было показано, что условия горения разряда и его характеристики существенно отличаются от случая, когда магнитное поле отсутствует. Удалось получить стабильный, с хорошими характеристиками разряд в магнитном поле. Это как я считаю серьезное достижение. Теперь немножко о грустном. Поговорим о недостатках, которые во всяком серьезном исследовании имеются и о них я хотел бы сказать более подробно.

Во-первых, касательно времяпролетного масс-анализатора. Это конечно хорошая машина, но возникает несколько вопросов. Во-первых, есть несколько конструкции,

которые отмечаются в диссертации. В частности, масс-пролетный анализатор из ИСЭ. Он гораздо проще и хотелось бы узнать с чем связана такая сложная конструкция, особенно с учетом того, что приходится работать в условиях сильного запыления диэлектриками. В общем-то не очень понятно, зачем нужно было создавать достаточно сложную конструкцию. Хотя можно было бы воспользоваться более простыми и эффективными конструкциями как сделанная в ИСЭ. Как я уже сказал, я впервые столкнулся с тем, что проведены абсолютные измерения компонентного состава, а не относительного и это достаточно серьезная задача. Она на мой взгляд требовала абсолютной калибровки прибора, которая не была сделана. Надо было аккуратно обосновать, например, оценить эффект вторичной эмиссии из коллектора. В том анализаторе, о котором я говорил, используется цилиндр фарадея и различные подаватели вторичной эмиссии. Здесь этого не было сделано. С учетом того, что измерения были абсолютные, я считаю, что это следовало, конечно, сделать.

Второе замечание. Представляется недостаточно обоснованным проведение весьма обширных физико-химических расчетов фазового состава системы церий-кислород, выполненные в разделе 3.7. Потому что достаточно большая работа была проведена, а как следует из дальнейшего она, на мой взгляд, была избыточной, так как содержание кислорода оказалось столь ничтожным, что он не оказывает влияния на конечные результаты. Я хотел бы выслушать комментарий, зачем было проводить такую деятельность.

Далее, автор уделяет значительное внимание анализу характеристик ионов материала тигля (вольфрама, молибдена). Об этом много говорилось. Непонятно, почему он отказался от более высокотемпературных графитовых тиглей, которые широко используются в подобных источниках плазмы. Я полагаю, что это сильно бы облегчило жизнь уважаемому диссертанту, и не надо было исследовать примеси молибдена и вольфрама.

Далее, 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. Автор очень бегло, практически, не пояснял методику, а здесь она не простая, и, как обычно, вероятно использовалась модель ЛТР. Она при данных параметрах неприменима, тем не менее, конечно, все применяют и, полагаю, что это корректно было сделано, но об этом необходимо было сказать и какие-то комментарии сделать. Дело в том, что спектральные измерения в низкотемпературной плазме по разным парам линий дают большой разброс и нужно к этому вопросу подходить аккуратно и детальные пояснения методики привести, а они отсутствуют, к сожалению.

Далее, автору следовало пояснить выбор в качестве диэлектрического модельного компонента ОЯТ именно керамики CeO_2 и TiO_2 . Как эти керамики моделируют компоненты ОЯТ и насколько корректно.

Далее рис. 3.10 требует комментариев, в частности, необходимо пояснить различие в характере зависимости от разрядного тока содержания ионов Се, а именно, существенный монотонный рост для тигля из молибдена и слабое немонотонное изменение для тигля из вольфрама. Это то, о чем уже говорилось выше. В разных тиглях ведет по-разному, почему? 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.

Следующее замечание, седьмое. Следует также пояснить причину разного поведения зависимостей для Мо и W, изображенных на рис. 3.11.

Восьмое замечание, содержание табл. 3 противоречит, как подписи к ней, так и комментариям в тексте, и я был в недоумении, когда смотрел в таблицу и читал подписи.

Наконец, девятое замечание. Непонятно, как из рис. 5.9 автор получил «Коэффициент наклона линейной аппроксимации 1,62».

На этом замечания заканчиваю. Отмеченные недостатки не являются критическими и не сказываются на общем высоком научном уровне диссертационной работы. Таким образом, диссертация соответствует всем критериям, установленным положением ВАК, а ее автор Мельников А.Д. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы. Все, спасибо.

Председатель

Спасибо большое. Антон Дмитриевич, Вам слово для ответа на замечания.

Мельников А.Д.

Уважаемые коллеги, хотелось бы начать с первого замечания, которое касается времяпролетного масс-спектрометра, который был создан. Действительно, целесообразно использовать готовые решения, когда это возможно, а в данном случае используется более сложная схема с продольным диагностированием пучка. Это связано с потенциальным использованием масс-спектрометра в продольном магнитном поле. Из-за этого схема, которая используется в ИСЭ. Которая очень хорошо себя зарекомендовала, с ортогональной экстракцией ионов неприменима в больших магнитных полях. Хотя это и позволяет добиться высокого разрешения и избежать запыления электродов. Тем не менее, это просто невозможно использовать в нашем случае. Фактически каждый раз, когда происходит внедрение методов времяпролетной масс-спектрометрии. Даже коммерческие устройства требуют долгого времени на разработку и внесение модификаций к конкретным условиям. Поэтому в данном случае было более целесообразно провести собственную разработку, которая оказалась более трудоемка, чем ожидалось. Тем не менее, те задачи, которые планировалось решать она полностью решает. Важный вопрос, касающийся абсолютных измерений. Первый влияющий фактор – это ионно-электронная эмиссия, которая может иметь место при наших энергиях. Если посмотреть на коэффициенты вторичной эмиссии, они в первую очередь зависят от энергии и массы ионов. Для значений около 1 кЭв и высоких масс на уровне 150 эти коэффициенты очень маленькие. Что более важно, хоть мы используем плоский коллектор в финальной версии, мы производим калибровку по концентрации, в режиме, когда в плазме присутствуют ионы только одного сорта. Это позволяет непосредственно площадь массового пика сопоставить концентрации. Даже если была бы вторичная эмиссия ее влияние было только для элементов с сильно разными массами, а у нас все массы выше 100 а.е.м. Можно посчитать для 150, тогда вторичная эмиссия на уровне процентов, из-за высокой массы она очень мала.

Касательно, расчета состава газовой фазы, который был произведен в одном из разделов. Действительно, был проведен достаточно объемный расчет, и он был выполнен по той причине, что остро стоял вопрос о присутствии отрицательных ионов еще до того, как появился метод непосредственной диагностики. По оптическим спектрам его не было, но это не непосредственный метод, так как обнаружить оптическими методами отрицательные ионы сложно. Соответственно, был проведен расчет исходя из химического равновесия и показано, что в случае неконгруэнтности фазового перехода,

который имеет место в диоксиде церия, газовая фаза обогащается кислородом. Уже зная эту информацию, мы решили создавать масс-спектрометр, чтобы проверить это напрямую, т.е. это послужило отправной точкой к созданию масс-спектрометра.

По поводу того, почему не был выбран графитовый тигель. Он не был выбран, по той причине, что мы боялись образования CO_2 . Соответственно происходила бы сильная деградация тигля, более сильная, чем на металлических. Ранее в нашей научной группе они использовались, но от этого ушли к металлическим тиглям.

Касательно оптических измерений температуры электронов. Совершенно верное замечание, важная методическая часть была опущена. Модель излучательных процессов, действительно, была моделью локального термодинамического равновесия. При этом область измерения оптических спектров – это катод-анодный промежуток, где плазма более плотная, чем в заанодном пространстве. Там более оправдано применение ЛТР. Исходя из предположения ЛТР были получены значения температуры, которые согласовались с зондовыми измерениями. Мы можем сделать вывод, что предположение о применимости верно. Использовались не пары линий, использовалось 11 линий из которых строились пары и строился график зависимости отношения интенсивностей от разницы энергий. Угол наклона этой зависимости в логарифмическом масштабе позволяет нам определить температуру электронов. По факту производится усреднение по большому количеству пар, благодаря этому и удалось получить более-менее обоснованный результат. Хотя, конечно, более корректно использовать столкновительно-излучательную модель, но ее построение требует знания сечений всех кинетических процессов. Они, как правило, неизвестны, например, сечения возбуждения с метастабильных уровней. Для них проводят оценочные расчеты, которые сильно снижают точность столкновительно-излучательных моделей, поэтому все, действительно, пользуются ЛТР.

По поводу выбора диоксида церия и диоксида титана. Про диоксид церия я уже ответил. Потому что это было очень подробно описано в работе руководителя, и я решил в своей диссертации это опустить. Диоксид титана был выбран, так как является не термоэмиссионным материалом для демонстрации различий при разных комбинациях теплофизических параметров материалов катода.

Касательно рисунка 3,10, действительно, для вольфрама и молибдена наблюдается отличие в поведении материала катода, о котором уже говорилось. Их можно интерпретировать, отталкиваясь от давления насыщенных паров. В частности, таблица 3, про которую был комментарий. Тут приведены значения температуры, при которых достигаются значения давления близкие к одному Па. Соответственно, для некоторых элементов данных, соответствующих такому давлению нет. Например, MoO_3 сильно парит и уже при температурах около 1400 имеет очень большое давление. Поэтому эта таблица демонстрирует отличие в летучестях разных компонент. Аналогично для вольфрама, который при куда больших температурах достигает схожего давления. Минимальная температура около 2000 близка к тем, что у нас достигалась, отсюда можно сделать вывод - молибден парит при более низких температурах т.е., если происходит окисление он практически сразу улетает, в отличии от вольфрама. На самом деле, возможна такая ситуация, что оксид вольфрама накапливается при разогреве. При инициации же разряда, происходит нагрев поверхности, и он начинает парить, а с ростом тока энерговыделений увеличивается. Вновь увеличивается температура поверхности катода и он начинает парить чуть сильнее, потому что он не сразу улетает после того, как вольфрам окислился. Именно поэтому наблюдается рост.

Ещё одно очень ценное замечание было связано с различием зависимостей общей концентраций плазмы от тока, причем это концентрация именно ионной компоненты. Наблюдается отличие в случае вольфрамового и молибденового тигля. В случае молибденового тигля снижение в два раза, в случае вольфрамового примерно на четверть. Это может быть объяснено тем, что в случае вольфрамового тигля доля вольфрама при высоких тока большая и именно она отвечает за не столь сильное падение концентрации.

И соответственно последнее замечание касалось вот этого графика и коэффициента наклона линейной аппроксимации. Возможно, выбран не очень удобный масштаб, но даже из графика видно, что по оси у разница около 18, по х около 10, т.е. коэффициент наклона около одной и шести. При этом сильно превышена, конечно, точность, но в последнюю цифру не вкладывалась физического значения, а просто подразумевалось, что коэффициент больше единицы, т.е. наблюдался рост энергии больший, чем рост напряжения разряда. Кажется, я на все замечания ответил. Спасибо. Многие из них сильно дополняют работу, особенно замечания про концентрацию и различия в поведении трендов для молибдена и вольфрама.

Председатель

Антон Дмитриевич, спасибо. Двигаемся дальше. Оппонент у нас следующий: к.ф.-м.н. Гаспарян Юрий Микаэлович из МИФИ, он будет дистанционно участвовать. Пожалуйста, Юрий Микаэлович, Вам слово предоставляется.

Гаспарян Ю.М.

Добрый день! Слышно меня?

Председатель

Да-да. Хорошо слышно.

Гаспарян Ю.М.

Здравствуйте коллеги. Я, пользуясь подробным предыдущим отзывом и уже довольно длинной дискуссией, не буду полностью зачитывать. Сразу скажу, что общее впечатление от работы положительное. Уже много говорилось в большом количестве интересных физических результатов. В первые проведенных измерениях и для керамического катода, и для эмиссии, что ориентировано на конкретную практическую задачу. Все формальные признаки соблюдены и апробация, и публикации. Значит перейду к замечаниям. Значит по порядку.

Первое замечание. При исследовании многокомпонентного катода из смеси диоксида церия и хрома, показано, что в составе плазмы более 90% составляет хром. При этом для задачи сепарации в плазменное состояние необходимо перевести весь катод, включая диоксид церия, который попадает в состав только в конце эксперимента. Как данный результат интерпретировать в контексте плазменной переработки?

Второе замечание. Для случая многокомпонентного катода не приводятся оценки динамики горения разряда при существенном уходе одного из компонентов катода со смесью материалов, например, уход хрома.

Третье замечание. В тексте отсутствует подробное описание схемы электропитания, характеристик используемых источников, схемы поджога разряда, а также зондовой диагностики (конструкция зонда, схема развертки и сбора данных). Из-за этого, например, сложно сделать вывод о причинах и характере разрушения анода в главе

5, а также о возможности обеспечения электрической изоляции разрабатываемого плазменного источника от заземленной камеры.

Четвертое замечание. Результаты испытания масс-анализатора предшествуют разделу с описанием экспериментальной установки, что требует предварительного изучения более позднего раздела.

Последнее замечание. В тексте диссертации не показано какая доля материала осаждается на аноде и прилегающих к электродной системе конструктивных элементах. Этот вопрос важен для обоснования эффективности преобразования в плазму, а также ресурса предлагаемого устройства. Хотелось бы услышать комментарии. В остальном работа очень хорошая и соответствует всем основным требованиям, предъявляемым к защите кандидатской степени физико-математических наук по специальности: физика плазмы. Спасибо.

Председатель

Юрий Микаэлович, спасибо Вам! Антон Дмитриевич – Вам слово для ответа на замечания.

Мельников А.Д.

Спасибо большое за замечания, Юрий Микаэлович. Сейчас я отвечу на них. Касательно первого вопроса о том, что в случае использования смесового катода из диоксида церия и хрома материалы вступают последовательно. Сначала переходит в плазменную фазу более летучий хром, а по мере расходования катода увеличивается доля диоксида церия. При этом ключевой вопрос в о переходном моменте, который, на что обращает внимание Юрий Микаэлович, мы можем ожидать. Действительно по мере изменения состава катода и увеличение доли церия в составе нам необходимо будет осуществить переход в другой температурный диапазон катода, для тех температур для которых стабильный разряд уже на чистом диоксиде церия и экспериментальные исследования этого переходного режима не проводилось, но результаты, полученные на чистом диоксиде церия и на металлических катодах ранее позволяют нам ожидать, что это в принципе вполне возможно. Для процесса сепарации не критично, что сначала металлическая компонента оседет в одном месте. Потом оксидная компонента оседет в другом месте, если за это время параметры буферного разряда не поменяются, то ничего критичного не произойдет.

Касательно схемы электропитания она, действительно, важна для интерпретации некоторых результатов. Мы сочли, что это излишняя техническая информация, но стоит воспроизвести. Вот, в частности, схема для первой экспериментальной установки, которая использовалась (*показывает на слайде*). Важно, что вакуумная камера заземлена через резистор, т.е. она приобретает потенциал отличный от земли и это сделано для того, чтобы не происходило пробоя на стенки камеры, а происходил пробой между катодом и анодом при инициации разряда. В новом источнике схема пробоя другая. Есть пробивающий электрод, подающий высоковольтные импульсы. Вакуумная камера и источник плазмы заземлены. Это было сделано после наблюдения динамики разряда в арочном поле. Источники, которые же мы использовали — это промышленные источники, сделанные фирмой «Плазматех» и «Электроавтоматик». Мы не приводили кроме диапазонов напряжений и токов их параметры, хотя при анализе причин разрушения анода вопрос стабильности напряжения достаточно важен. Вполне возможно было бы это интерпретировать как сильное колебание напряжения, питающего разряд. В целом источники современные и они хорошо стабилизированы по выходным параметрам. На данном слайде приведены характеристики. С параметрами можно ознакомиться при необходимости.

Результаты масс-анализатора предшествуют разделу с описанием экспериментальной установки, как верно отмечено, это затрудняет восприятие материала.

И самый важный вопрос, касающийся также производительности метода. В процессе эксплуатации разряда происходит сильное запыление как стенок камеры, так и анода. На фото показано, что материала катода в начале эксперимента нет на аноде. В конце эксперимента наблюдается сильное плёночное напыление, которое не является тем положительным фактором. Важно вытянуть как можно больше в виде ионов и это неизбежный фактор, т.е. в любом случае такая ситуация будет присутствовать, если у нас нет рециркуляции пара, а это существенно более сложная схема. И отвечая еще раз на производительность, какая она была достигнута в ионах, это можно оценить при помощи так называемого конденсионного зонда, в котором конденсируется поток плазмы, измеряется протёкший заряд и можно измерять средний заряд и определить сколько в ионах по массе вышло из нашего источника. Эта величина на уровне 1 грамм в час. Надеюсь на этом я на замечания Юрия Микаэловича ответил.

Председатель

Спасибо. Уважаемые коллеги теперь мы переходим к дискуссии по диссертации. Кто хотел выступить? Михаил Николаевич пожалуйста.

Васильев М.Н.

Уважаемые коллеги. Слышно меня? Да? Во-первых, с Новым годом всех, с наилучшими пожеланиями в новом году. По существу диссертации, которая нам сейчас была доложена вот на что обратить внимание. Олег Федорович процитировал О.И. Осинковского с его основополагающими принципами так вот Олег Иванович был и у меня оппонентом на диссертации, когда он меня готовил к защите он сказал примерно так: «Вот когда ты будешь выступать покажи подвиг. Вот если подвиг покажешь всё будет хорошо». В общем-то, я примерно тоже самое хочу адресовать нашему сегодняшнему диссертанту, который как мне кажется свой подвиг продемонстрировал, т.е. он создал некоторую установку, которая сама по себе заслуживает глубокого уважения, и второе, то, что при помощи этой установки он получил весьма интересные результаты. Не было бы железа, не было бы результатов. Кто занимался строительством сложных установок, тот знает о чём идет речь. Так что подвиг имеет место быть. Второй момент, на который я хотел бы обратить внимание членов совета. Я, конечно, не так давно, как Виктор Львович знаю эту команду, но тем не менее получилось так, что по линии Росатома, где я экспертирую этот проект, я слежу за динамикой, как там дела происходят. Регулярно приходится читать обстоятельно отчёты достаточно толстые. Видно, какой прогресс сделала эта группа. И вот такое впечатление складывается, потому что мы сегодня услышали, что вот этот прогресс группы не в последнюю очередь связан с достижениями нашего сегодняшнего диссертанта. И вот с учётом этих двух обстоятельств я призываю членов диссовета поддержать диссертацию, и я буду голосовать за. Спасибо.

Председатель

Михаил Николаевич, спасибо. Уважаемые коллеги я тоже хотел бы поддержать эту работу. На это есть тут целый набор причин. Упомянул Михаил Николаевич про подвиг, но есть ещё одна существенная деталь этого подвига – та работа, которая Антоном Дмитриевичем сделана, рассчитана на четыре года аспирантских. Он уложился в три года, в этом смысле она досрочно защищается, она защищается до конца календарного года. Она является плановой для тех, кто в этом году закончил, и является как раз внеплановой для Антона Дмитриевича. Это действительно крупное достижение, потому что пройти через экспериментальную установку, и её создавая, и даже модернизируя, совершенствуя, что это такое мы все хорошо представляем. Работа была выполнена как вы знаете у Андрея Владимировича Гаврикова и это действительно уже идёт второе поколение, отсчитывая от Рабиля Анатольевича. Это второе поколение выпускников не только

кафедры физики высоких плотностей энергии, но и выпускников отдела, второе поколение тех, кто представляет кандидатские диссертации, так что призываю всех поддержать. И ещё в начале Леонид Михайлович, потом Анатолий Васильевич.

Василяк Л.М.

Я внимательно ознакомился с диссертацией, поскольку был в комиссии, и затем мы уже неформально с диссертантом обсуждали многие вопросы, в частности, поэтому я не спрашивал никаких вопросов. Я хотел бы обратить внимание на объем работы, который был сделан. Этот объём работы не только, чтобы железку, а был направлен на выяснение физических механизмов, и что происходит в том или другом случае. И именно понимание диссертантом физики разрядов и позволило ему сделать достаточно много различных очень сложных механических узлов и установку. И это было отражено в диссертации. Я буду голосовать за и предлагаю членам учёного совета также голосовать за.

Филиппов А.В.

Я выскажу своё сугубо личное мнение, что данный метод для разделения изотопов вряд ли составит конкуренцию существующим методам разделения ОЯТ, но вот при получении радиоизотопов, когда вопрос цены отходит на второй план, и на первый план выходят положительные потребительские качества получаемых радиоизотопов, для применения в ядерной медицине, для применения в автономных источниках энергии, для создания датчиков – этот метод конечно даже может составить конкуренцию существующим методам. Этот метод действительно можно развивать. Работа проделана большая и экспериментальная установка создана дальнейшие исследования на этой установке вполне возможны Антон Дмитриевич хорошую работу проделал, так что я тоже призываю голосовать за.

Председатель

Спасибо Анатолий Васильевич. Если есть ещё желающие выступить? Картина сформировалась достаточно полная. Тогда переходим к следующему пункту – голосование. Заключительное слово предоставляется АД.

Мельников А.Д.

Уважаемые члены диссертационного совета хочу сказать большое спасибо своему научному коллективу, без которого конечно невозможно было бы хоть какое-то продвижение в научной области, потому что это работа, которая требует больших усилий, и поддержка коллектива при этом выходит на первый план. И в моём случае она была беспрецедентной за это я хочу поблагодарить Андрея Владимировича Гаврикова, который создаёт дружную атмосферу высокой продуктивности и своего научного руководителя Усманова Равиля Анатольевича, который поделился своим опытом и передал самые высокие стандарты профессионализма в научной деятельности. Ну и членам диссертационного совета, которые так внимательно заслушали работу и всем, кто ознакомился с моей диссертацией. Мне правда очень ценны те высказанные замечания, и я в дальнейшем буду это учитывать, это очень полезно для дальнейшей работы. Всем спасибо.

Председатель

Антон Дмитриевич, спасибо Вам. Сейчас переходим к голосованию, Алексей Владимирович.

Ученый секретарь

Дорогие коллеги, наше заседание проводится в комбинированном очно-дистанционном режиме. Соответственно, голосование проводится с использованием телекоммуникационных систем, т.е. на сайте нашего института. Прошу всех

присутствующих членов диссертационного совета проголосовать с помощью своего устройства или компьютера дис. совета.

Председатель

Уважаемые коллеги, голосование завершилось, Алексей Владимирович объявит его результаты.

Давайте, пока работает комиссия, обсудим проект заключения. *(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).*

Давайте вернемся к заключению после того, как счетная комиссия сообщит результаты голосования.

Ученый секретарь

Дорогие коллеги! Всего присутствовало на заседании **27** членов диссертационного совета, из них докторов. Очно присутствовало **18** членов, в том числе докторов по профилю рассматриваемой диссертации – **10**. Дистанционно присутствовало – **9**, в том числе докторов по профилю рассматриваемой диссертации – **3**. Получено **27** голосов, **за – 27, против – нет, недействительно – 0**.

Председатель

Давайте утвердим протокол. Прошу проголосовать за, против. *(Протокол счетной комиссии утвержден единогласно)*. Теперь мы Вас поздравляем. Есть время для обсуждения проекта заключения, кто хотел бы высказаться. *(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения)*. Кто поддерживает проект с учетом замечаний? Кто против? Нет. *(Проект заключения принят единогласно)*. Спасибо большое.

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., Polistchok 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., Polistchok 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., Polistchok 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–Y SMART alloy» // Vacuum 199 (2022) 110956

Выбор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук в качестве ведущей организации обусловлен тем, что оно 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 смесовым 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 (VAX , $U(P_{элп})$) 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.