

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

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 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 30 мая 2018 г. (протокол № 7)

Защита диссертации **Усманова Равиля Анатольевича**
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
**«Испарение и ионизация веществ, моделирующих отработавшее
ядерное топливо, в вакуумном дуговом разряде с подогреваемым
катодом»**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 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 № 7 от 30 мая 2018 г.

Диссертационный совет 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 23 человека, из них 12 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель – зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02
д.ф.-м.н., профессор Андреев Н.Е.

Ученый секретарь – ВРИО ученого секретаря диссертационного совета
Д 002.110.02 д.ф.-м.н., профессор Василяк Л.М.

1	Фортов В.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
2	Канель Г.И.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
3	Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
4	Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
5	Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.14	Присутствует
6	Амиров Р.Х.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.08	Присутствует
7	Баженова Т.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
8	Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
9	Васильев М.Н.	Д.т.н., профессор	01.04.14	Присутствует
10	Васильев М.М.	К.ф.-м.н.	01.04.08	Отсутствует
11	Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
12	Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
13	Гордон Е.Б.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
14	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Отсутствует
15	Дьячков Л.Г.	Д.ф.-м.н.	01.04.08	Присутствует
16	Зейгарник Ю.А.	Д.т.н., с.н.с.	01.04.14	Присутствует
17	Еремин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
18	Иванов М.Ф.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
19	Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
20	Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Присутствует
21	Лагарьков А.Н.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
22	Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
23	Медин С.А.	Д.т.н., профессор	01.04.14	Присутствует
24	Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
25	Петров О.Ф.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
26	Полежаев Ю.В.	Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
27	Савватимский А.И.	Д.т.н.	01.04.14	Присутствует
28	Сон Э.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
29	Старостин А.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
30	Храпак А.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
31	Якубов И.Т.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует

ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации младшего научного сотрудника лаборатории 2.1.4.2 – диагностики и измерительных систем НИЦ–2 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Усманова Равиля Анатольевича** на тему «Испарение и ионизация веществ, моделирующих отработавшее ядерное топливо, в вакуумном дуговом разряде с подогреваемым катодом». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Диссертация выполнена в лаборатории 2.1.4.2. – диагностики и измерительных систем НИЦ–2 ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, jih.t.ru).

Научный руководитель:

Гавриков Андрей Владимирович – к.ф.-м.н., доцент, заместитель директора 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.).

Хрипунов Борис Иванович – гражданин РФ, к.ф.-м.н., начальник лаборатории Курчатовского комплекса физико-технических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения Национального исследовательского центра «Курчатовского института» (Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

Ведущая организация:

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (ТРИНИТИ; Россия, 142190, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., профессор Паперный В.Л. и к.ф.-м.н. Хрипунов Б.И., научный руководитель Усманова Р.А. к.ф.-м.н., доцент Гавриков А.В.

СТЕНОГРАММА

Председатель

Уважаемые члены диссертационного совета, коллеги, давайте начнем наш сегодня авральный день, состоящий из трех защит и двух принятий к защите. Первая защита Равиля Анатольевича Усманова. Леонид Михайлович, ознакомьте нас с материалами личного дела, спасибо.

Ученый секретарь

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

Председатель

Нет вопросов? Отлично, тогда двигаемся по плану. Равиль Анатольевич, у Вас 20 минут.

Усманов Р.А.

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

Председатель

Спасибо, Равиль Анатольевич. Леонид Михайлович, позже мы ознакомимся с рецензиями, а сейчас вопросы. Да, пожалуйста, Игорь Львович.

Иосилевский И.Л.

Равиль, топливо реакторов – это диоксид урана, Вы его моделируете диоксидом церия, прежде всего, потому, что похожи теплоты испарения, похожи потенциалы ионизации. Но главной, как мне кажется, характеристикой является состав ионизированных продуктов испарения. По расчетам известно, что у диоксида урана ионизационный состав – это широкая палитра молекулярных ионов, и положительных и отрицательных (электронов над диоксидом урана практически нет), а что у оксида церия – не очень ясно. Есть ли у Вас картинка, где можно было бы увидеть расчетный ионный состав над диоксидом церия и над диоксидом урана, чтобы можно было их сравнить?

Усманов Р.А.

Благодарю за вопрос. Я рассчитывал равновесный состав именно пара, а не плазмы.

Иосилевский И.Л.

А в том, что вы рассчитывали, есть ионы, или только нейтралы?

Усманов Р.А.

Только нейтралы, рассматривалось химическое равновесие между компонентами пара.

Председатель

Да, пожалуйста, Алексей Георгиевич.

Храпак А.Г.

Когда на одном из первых рисунков Вы говорите о среднем заряде ионов, на самом деле речь идет о среднем заряде частиц, ведь заряд иона не может быть меньше единицы?

Усманов Р.А.

Да, имеется в виду средний заряд тяжелых частиц плазмы.

Председатель

Нет, средний заряд может быть меньше единицы, все зависит от того, по чему усреднять.

Храпак А.Г.

Да, но звучит именно средний заряд ионов.

Председатель

Все-таки ионом часто называют тяжелую частицу. Да, пожалуйста, Владимир Сергеевич.

Воробьев В.С.

Вы проводили спектральные измерения, в этой связи у меня несколько вопросов. Оценивалась ли реабсорбция компонентов спектра для Ваших условий? Свободный ли был выход излучения или частично некоторые участки спектра поглощались? Какие переходы Вы рассматривали – на основное состояние или между возбужденными состояниями?

Усманов Р.А.

Спектральная диагностика использовалась только для определения компонентного состава и выводов на основе измеренных интенсивностей не делалось. Но согласно величине оценочной плотности плазмы 10^{14} - 10^{15} см⁻³ частиц, в этих условиях реабсорбции излучения быть не должно.

Воробьев В.С.

Только если Вы не рассматриваете резонансные переходы на основное состояние.

Усманов Р.А.

Анализа конкретных спектральных линий на возможность реабсорбции излучения не проводилось.

Председатель

Еще вопросы? Пожалуйста, Михаил Николаевич.

Васильев М.Н.

Я бы хотел вернуться к вопросу Игоря Львовича, но с другой стороны. Как Вы думаете, если суммировать результаты работы, будет ли Ваш испаритель работать в составе реального сепаратора?

Усманов Р.А.

Хотелось бы ответить, что будет, и аргументы следующие. Данная конфигурация разряда позволяет работать, т.е. испарять и ионизировать, вещество, которое при нормальных условиях даже не является проводником, и получать высокое значение среднего заряда плазменного потока. Поэтому для отработки метода сепарации испаритель использовать можно. Спрогнозировать же проблемы связанные с использованием реального топлива гораздо труднее. Необходимы более высокие рабочие температуры, другие материалы для тигля и т.д..

Вараксин А.Ю.

Равиль Анатольевич, у меня вот какой вопрос. Поскольку Вы работаете при

высокой температуре, тогда плазменный Ваш плазменный поток является сверхзвуковым. Поясните пожалуйста с точки зрения гидродинамики, как он реализуется в условиях Вашей геометрии, где из-за наличия отверстия без сопла имеются большие гидродинамические потери. И поясните, пожалуйста, Вашу фразу, про то, что 85-90% частиц свинца возвращаются назад с точки зрения гидродинамики.

Усманов Р.А.

По поводу сопла. Можно считать, что в тигле есть источник вещества, оно далее пролетает через сужающийся профиль и попадает в открытое пространство. Соответственно, если бы сужения не было, тогда можно было бы пользоваться законом о скорости испарения с открытой поверхности, и коэффициент испарения равнялся бы единице. Из-за сужающегося профиля, часть частиц отражается от узкой части и возвращается назад. Если рассчитать при помощи уравнений гидродинамики распределение числа Маха по высоте, тогда на поверхности испарения оно равно M_0 , в самом узком сечении – единице. Соответственно, концентрация и скорость пара в самом узком сечении получаются такими, что поток оказывается значительно меньше, чем тот, что был бы при испарении с открытой поверхности. Это означает, что количество реально вылетевшего вещества меньше чем могло бы быть.

Председатель

Откуда получилось это число 0,15?

Усманов Р.А.

Если записать поток вещества с какой-то поверхности через давление и температуру, то нужно связать давление насыщенного пара и температуру поверхности с давлением и температурой пара у поверхности. Для этого использовались граничные условия на границе испарения, приведенные на слайде. Подставив их в формулу скорости испарения, мы получим коэффициент 0,15.

Председатель

Есть еще вопросы? Нет вопросов? Тогда, Андрей Владимирович, слово Вам – научному руководителю.

Гавриков А.В.

Уважаемые коллеги, если говорить кратко, то никаких замечаний сказать не могу, могу сказать только хорошее. Равиль Анатольевич работает в нашей лаборатории начиная со студенческой скамьи и всегда проявлял целеустремленность, большую вдумчивость. Здесь был представлен результат колоссальной работы и это именно его заслуга. Поэтому я прошу Вас поддержать защиту. Спасибо!

Председатель

Какое будущее планируется соискателем?

Гавриков А.В.

Продолжаем работу. Как сказал Равиль, мы хотим использовать данный источник дальше, там конечно много вопросов, но мы продолжаем.

Председатель

Отлично, я думаю, дальше вопросов по этому пункту нет, поэтому, Леонид Михайлович, давайте мы перейдем к письменным оценкам.

Ученый секретарь

На диссертацию поступило 4 отзыва на автореферат и отзыв ведущей организации, все отзывы положительные, поэтому, если никто не возражает, я зачитаю только замечания. Давайте начнем с ведущей организации.

Во введении сформулированы основные требования к источнику плазмы для перевода отработанного ядерного топлива в плазменное состояние: плазма должна быть представлена преимущественно ионами одинаковой кратности, ее степень ионизации должна быть близка к 100%, в потоке плазмы должны отсутствовать микрокапельные фракции эродирующего катода, а производительность плазменного источника — находиться на уровне 100 г/ч. Требование по производительности не является критическим, так как выполнимо при использовании необходимого количества однотипных плазменных источников. Мне не очень понятно, в чем состоит замечание, но, думаю, Равиль Анатольевич нам пояснит.

В диссертации не рассмотрены требования на геометрические размеры плазменного источника, для его эффективного использования в перспективных плазменных сепараторах отработанного ядерного топлива.

При описании методики измерения оптических спектров разрядной плазмы не указано пространственное разрешение по объекту, а также не приведены данные по спектральной чувствительности и разрешающей способности использованного спектрографа.

Для разрядов на термоэмиссионных катодах основной перенос тока осуществляется электронной компонентой и энергетические затраты на получение однозарядного иона материала катода оцениваются величиной от 200 до 250 эВ. В этой оценке не учтены энергетические затраты на подогрев катода, хотя они сравнимы с мощностью самого диффузионного дугового разряда.

Температура катода диффузионного вакуумного разряда определяется как мощностью подогрева катода от внешнего электронного пучка, так и потоком мощности из плазмы разряда. Этот поток мощности сам зависит от режима разряда, что затрудняет поиск оптимальных условий разряда и, возможно, ограничивает диапазон оптимальных режимов. Представляется, что упомянутые в диссертации схемы установок, где развязаны области испарения материала катода и области разряда заслуживают более подробного обсуждения.

Используемая в ряде мест диссертации терминология «нетермоэмиссионный свинец» не совсем удачная, так как подразумевает, что существует и термоэмиссионный свинец.

В заключении отмечено, что недостатки не влияют на общий высокий уровень диссертационной работы.

Отзывы на автореферат.

Первый отзыв. **Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники**, подписали профессор кафедры физики д.т.н. **Климов А.С.** и заведующий кафедры физики д.т.н., профессор **Окс Е.М.** Отзыв положительный, замечания:

- Положения, выносимые на защиту, построены не по классической схеме, что затрудняет их анализ. Следовало более конкретно сформулировать положения, отразив в них – в чем заключаются научные и практические результаты, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования.

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

Второй отзыв. **Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**. Отзыв подписан доцентом, к.ф.-м.н. **Визгаловым И.В.** Отзыв положительный, замечания:

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

Третий отзыв. **Институт космических исследований**. Отзыв подписан заведующим лабораторией плазменно-пылевых процессов в космических объектах, д.ф.-м.н. **Попелем С.И.** Отзыв положительный, без замечаний.

Четвертый отзыв. **Национальный исследовательский институт «МЭИ»**. Отзыв подписан профессором кафедры инженерной теплофизики, д.ф.-м.н. **Синкевичем О.А.** Отзыв положительный, замечания:

- Из автореферата трудно понять, как рассчитывалась скорость эрозии свинца и скорость испарения в вакуум в дуге Ga (рис. 3).
- Считалась ли поверхность катода однородной или нет? Учитывалось ли влияние электрического поля на эти процессы?
- На рис. 2 приведены данные об интенсивности излучения гадолиния, но никак не оценивалась достоверность данных.
- Из автореферата трудно понять, удалось ли установить границы перехода от однородного разряда к контрагированному и переносе полученных данных на проектируемые установки по переработке отработанного ядерного топлива.
- На последней странице автореферата приведены ссылки на достаточно старые и некоторые спорные работы, но нет ссылок на работы ведущего специалиста по вакуумным разрядам К.Н. Ульянова и его школы.

Председатель

Спасибо, Леонид Михайлович. Равиль Анатольевич, пожалуйста, ответьте на поступившие замечания. Будет хорошо, если Вы их сможете сгруппировать.

Усманов Р.А.

Начну с замечаний ведущей организации. К основным замечаниям, относится, первое, то, что в диссертации не рассмотрены геометрические ограничения на источник плазмы. Здесь я должен сказать, что данный вопрос больше относится к стыковке плазменного источника с сепаратором и находится несколько в стороне от решаемой мной задачи. Несомненно, совмещение этих двух узлов это важная задача, которая стоит перед нами в будущем и потребует много работы. О полезном плазменном потоке, который можно извлечь из разряда можно сказать, что он здесь, как характерно для большинства разрядов, составляет 5-10% процентов ионного тока от полного тока разряда.

Следующее замечание затрагивает цену иону, ведущая организация отмечает, что в цену иона должна быть включена составляющая мощность, отвечающая за внешний подогрев катода. Здесь я должен пояснить, каким образом рассчитывалась цена иона. Те значения, которые были приведены, они соответствуют отношению мощности, выделяющейся в разряде, к скорости испарения и приведены к размерности эВ на частицу.

Соответственно в этом подходе не учитывается мощность внешнего подогрева катода, но эту подводимую мощность можно значительно оптимизировать, лучше термоизолировав катод и добавив тепловые экраны для сокращения потерь, связанных с излучением. Поэтому основной мощностью, расходуемой на ионизацию частиц, останется та, что выделяется в самом разряде.

Далее есть замечание о том, что необходимо подробнее рассмотреть конфигурацию источника, в которой эмиттер электронов и испаритель пространственно и физически разделены. В диссертации упоминается данная схема, и это связано с тем, что, в соответствии с моим рассказом, на некоторых рабочих веществах достаточно сложно управлять характеристиками разряда. Казалось бы, что разделение задач эмиссии электронов и нейтралов, в перспективе, может увеличить управляемость. Однако, это также достаточно сложная, отдельная задача, и не факт, что в такой конфигурации возможно достичь схожей степени ионизации.

Теперь перейду к отзывам на автореферат. Из Томска основное замечание, это, на мой взгляд, вопрос об узком рассмотрении в автореферате обоснованности выбора модельных веществ. Его я осветил в ходе презентации.

Из МИФИ поступило справедливое замечание о том, что в реальном топливе рабочие температуры должны быть выше. Сейчас мы занимаемся отработкой метода на модельных веществах, а с настоящим топливом, конечно, нужно использовать другие, более тугоплавкие катоды из тантала или диоксида тория, кроме того можно использовать принципиально другую схему нагрева катода посредством ВЧ нагрева в холодном тигле.

Следующий достаточно большой блок замечаний из Московского Энергетического Института. Первый вопрос о том, что в автореферате не представлен метод расчета скорости испарения. Его я показал на слайдах. Далее есть вопрос – считалась ли поверхность свинца однородной? Да, она считалась однородной, т.к. он был расплавлен, и в расчете не учитывалось электрическое поле, т.к. рассматривался только термический случай. Влияние же электрического поля сказывалось на измеряемые в экспериментах скорости испарения катода в присутствии разряда.

На этом все.

Председатель

Спасибо, Равиль Анатольевич. Мы переходим тогда к отзывам оппонентов, и предоставляем слово профессору Паперному Виктору Львовичу из Иркутского государственного университета.

Паперный В.Л.

Добрый день. Прежде чем обратиться к отзыву я хотел бы обратить внимание в целом на ситуацию, которая, на мой взгляд, немного парадоксальна. Проблема утилизации ОЯТ стоит достаточно остро, и я думаю, что сомнений в этом ни у кого нет. И то, что ей должны заниматься во всем мире, по крайней мере, в ведущих странах, мне кажется очевидным. Но как ни странно, почти никто этим не занимается, кроме известной установки Архимед, которая некоторое время поработала и была по разным причинам законсервирована американцами. Недавно вышел довольно обстоятельный обзор в УФНе от наших коллег из Курчатовского института, где довольно подробно описывается ситуация на сегодняшний момент. Оказывается, что существует достаточно много теоретических работ и предлагаются разные модели для установок, но экспериментом занимается, по существу, три команды. Это та, которую представляет здесь Равиль, и две небольшие группы из Иркутска. Для меня этот факт является достаточно удивительным, и то, что Равиль представил работу, которая является первым, на мой взгляд, очень существенным вкладом, по крайней мере, в физическое обоснование этой технологии плазменной переработки ОЯТ, говорит о том, что актуальность этой тематики и работы переоценить трудно. Не побоюсь этого слова, по-видимому, это первая в мире работа,

которая посвящена достаточно детальному исследованию различных типов источников для перевода конденсированной фазы модельных веществ в плазменную фазу. Поэтому, еще раз повторяюсь, ценность и актуальность этой работы переоценить сложно. Работа далеко выходит за, непосредственно, ту тематику и те задачи, которые ставятся в ней. Поставлены задачи общефизического плана, достаточно серьезные и глубокие. В целом, с точки зрения актуальности, перспективности и важности этой работы я могу дать только самую высокую оценку.

С Вашего позволения я не буду зачитывать содержание работы, а остановлюсь только на наиболее интересных, на мой взгляд, результатах. Прежде всего – это обстоятельная глава, посвященная термодуге на гадолинии. Не смотря на то, что этот материал давно исследуется, в том числе и в стенах этого института, тем не менее, диссертанту удалось получить новые, оригинальные, достаточно интересные результаты и существенно расширить представления об этом типе материала в классе материалов катодов в термодуге, ряд результатов совершенно оригинален по энергиям ионов. Что касается катода из свинца, можно сказать, что это достаточно экзотический материал и Равиль подробно освятил это в диссертации. Здесь получены совершенно новые данные, и нет сомнения в оригинальности и важности этих результатов. То же самое касается дуги на окиси церия. На керамике вообще не факт, что можно получить стабильно горящую дугу на диэлектрике, и то, что диссертанту это удалось - очень отраднo, т.к. это и с физической точки зрения и с точки зрения поставленной задачи представляет большой интерес. То, что удалось измерить параметры разряда, и представить физическую картину этого процесса, считаю, что - очень важный и интересный результат.

Немного о практической ценности работы. По прямой задаче переработки ОЯТ она очень важна, как я уже говорил. Сделан очень важный первый шаг – первая стадия перевода твердого вещества в плазму. По существу на модельных материалах удалось показать, что это вполне реально. Полученные физические параметры и энергетические затраты на плазменный поток, пока, в первом приближении, показывают перспективность этого метода. Если бы тут были серьезные неудачи или параметры оказались неудовлетворительными, то вообще говоря, тематику следовало бы закрыть. Равилю удалось показать, что можно работать, нужно дальше этим заниматься и очень активно. Работа далеко выходит за рамки этой задачи, решен целый ряд общефизических задач, исследован широкий класс материалов, совершенно отличающихся по электро- и теплофизическим характеристикам. Термодуги на них достаточно подробно исследованы. И это серьезный вклад в физическую картину процессов, происходящих в разрядах. Хотя эта тема уже давно, более 30 лет, исследуется, в том числе и в стенах ОИВТ РАН, тем не менее представленная работа является серьезным вкладом в построение целостной картины для широкого класса материалов катодов в термодугах.

Обоснованность работы не вызывает сомнений, представлен широкий спектр различных диагностик. Автору повезло, что в институте присутствует классики по этому направлению, разработаны достаточно подробные теоретические модели, с которыми автор сравнивался. Достоинством работы является серьезная теоретическая поддержка, поэтому обоснованность и достоверность результатов не вызывает сомнений. Отмечу достаточно высокий уровень публикаций, особенно в журналах IEEE, Физика плазмы и целый ряд публикаций в Journal of Physics: Conference Series.

Теперь необходимо сказать о **недостатках**. Прежде всего хотел бы обратить внимание на такой параметр как степень ионизации. Мы уже давно на эту тему дискутируем. Я не разделяю точку зрения о том, что степень ионизации в разряде близка к единице. Та терминология, которую использует автор, это оценка в которую входит помимо классического определения, куда входит отношение концентраций, как принято в физике плазмы, но туда входит и отношение скоростей, т.к. измеряется отношение потоков. В разряде значительно отличаются скорости ионов и нейтралов, поэтому отношение концентраций получится завышенным в несколько раз. В реальности оно

ниже, чем указывает автор. Это определение, которое использует автор, широко используется людьми, которые занимаются нанесением покрытий. Там действительно основной параметр – это потоки, так как присутствуют процессы напыления и конденсации потоков. В данной задаче идет речь о переводе конденсированного вещества в плазму, и важно, именно какая часть из нейтральной фазы переходит в ионную компоненту. Поэтому, на мой взгляд, нужно пользоваться классическим определением, и со всеми этими оговорками указывать степень ионизации.

Еще одно замечание по этому поводу, на рисунке 2.14, где приведены результаты оптических измерений, показаны интенсивности линий нейтрального гадолия и заряженного. Оказывается, что в оптимальном режиме отношение составляет 0.4, это означает, что нейтральной компоненты достаточно много, и это ставит под сомнение то утверждение, что степень ионизации плазмы находится вблизи 100%. Из рисунка 2.16 следует, что температура электронов составляет всего-навсего 0.5 эВ. При данных концентрациях, это низкая температура электронов, что поддерживает мои сомнения в представленной величине степени ионизации, и я бы порекомендовал автору сделать простейшие оценки по формуле Саха для поддержания важного вывода о данном параметре.

Остальные замечания уже конкретные, скажем, на странице 41 приведены оценки цены иона на основе найденного коэффициента электропереноса. На мой взгляд, это сделано очень бегло, без комментариев, что было бы полезно прокомментировать. Также приведены результаты модельных расчетов, но как ни странно, на них нет экспериментальных точек. Кроме того, местами не соответствуют подписи на рисунке 2.12, есть неудачные фразы, не буду их все перечислять.

Теперь стоит поговорить о выводах. В выводах к главе 3 отсутствует заключение о пригодности использованного типа дуги на свинце, в докладе Равиль об этом сказал, но в диссертации не отмечено. Из текста не ясно, как результаты относятся к поставленной задаче. То же самое касается дуги на оксиде церия. Приведены результаты исследования, но в выводах ничего не сказано о том, что дуга действительно подходит для задач, которые были поставлены перед диссертантом.

Указанные замечания носят, в основном, характер рекомендаций и не снижают общей положительной оценки работы, поставленные цели соответствуют полученным результатам, содержание соответствует специальности 01.04.08 – физика плазмы, работа в целом написана грамотно, хорошо оформлена. Диссертация является законченной квалификационной работой, в которой решены важные вопросы, касающиеся физических основ плазменной технологии переработки ОЯТ. Работа соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г, а автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Спасибо.

Председатель

Спасибо, Виктор Львович.

Иосилевский И.Л.

У меня вопрос, можно?

Председатель

Да, пожалуйста, Игорь Львович.

Иосилевский И.Л.

Скажите пожалуйста, Вы упомянули о том, что предпочтение в смысле использования

термина степень ионизации у Вас отличается от того, какое употреблял Равиль. Также Вы сказали, что потоки плазмы состоят из частей, которые летят совершенно с разной скоростью, даже в несколько раз. Просветите, пожалуйста, нас из всех трех компонент: электроны, нейтралы и атомы - кто кого летит быстрее.

Паперный В.Л.

Ионы летят быстрее. Энергия их порядка 10 эВ, то есть скорости у них вполне приличные – на уровне 10^6 . Нейтралы, у них температура 0.2 эВ, то есть примерно в 6-7 раз тепловая скорость меньше скорости ионов.

Иосилевский И.Л.

А какая скорость электронов? Они там есть? Ведь они охотно прилипают к оксидными молекулам.

Паперный В.Л.

Электроны есть, плазма остается плазмой, а взаимодействие с молекулами требует отдельно обсуждения, так как ситуация с ними сильно усложняется.

Председатель

Спасибо большое, Виктор Львович. Равиль Анатольевич, пожалуйста, Вам слово для ответа и сконцентрируйтесь на основном вопросе, связанном со степенью ионизации, которую Вы выносите на защиту.

Усманов Р.А.

Спасибо. Да действительно, применение термина степень ионизации не совсем удачно для той характеристики, которая измеряется конденсационным методом, а именно отношение потока заряженных частиц к потоку нейтралов. В защиту можно сказать, что именно эта характеристика более верно описывает качество плазменного потока, которое генерируется в источнике. Важно на выходе получать значение того, сколько ионов из него вылетело по отношению к атомам. Поэтому, если бы я приводил реальную степень ионизации, то она тоже не говорила о качестве потока. С неудачным использованием термина я согласен.

Далее Виктор Львович рекомендовал сделать оценку степени ионизации по формуле Саха. Здесь я должен сказать, что концентрации в эксперименте достаточно малы, за анодом где-то 10^{12} см⁻³, и локальное термодинамическое равновесие вряд ли выполняется, поэтому применение формулы Саха не оправдано. Но если подставить в нее температуру электронов 0.5 эВ, то степень ионизации гадолия, для которого первый потенциал ионизации около 6 эВ, окажется высокой и отношение концентраций ионов к нейтралам будет порядка 100.

По поводу расчета. Да в диссертации есть часть, посвященная расчету вылета плазмы через анод, но он сделан на основе одной экспериментальной точки, а второе граничное условие соответствует значению параметров на бесконечности. В связи с этим, я посчитал, что приводит на расчетном графике одну экспериментальную точку не совсем удачно. На этом все.

Председатель

Спасибо далее мы должны ознакомиться с отзывом второго оппонента. Борис Иванович Хрипунов из Курчатовского института, пожалуйста, Вам слово.

Хрипунов Б.И.

Уважаемые члены совета, представленная работа согласно названию и по существу ставит целью направленность на создание плазменной сепарационной установки для

переработки ядерного топлива. В этом смысле работа рассматривает единственный аспект – источник плазмы, это очень хорошо и правильно. Именно способ подачи вещества, в данном случае потока плазмы, в сепарационную установку является очень важным и даже определяющим шагом. Здесь был упомянут американский проект Архимед – большая установка, на ней были проведены исследования и задача была поставлена так: не делать моделирование, а сделать сразу масштабную установку и сразу сепарировать большой объем. Не исключено, что отсутствие успехов той программы (установка была закрыта, а проработала несколько лет), связаны с, в частности, с не проработанностью вопроса подачи вещества. В этом смысле предложение и работа, которую проделал Равиль Анатольевич, то есть исследование разряда, который мог бы подавать ионизованное вещество в такую установку, является абсолютно актуальной, не смотря на то, что плазменная установка для переработки ОЯТ еще находится в проекте на этапе осмысления. Вопрос же подачи вещества – чрезвычайно важен. Предлагались способы подачи вещества в виде пыли или пара, но эти методы обладают своей спецификой, и их применение к ОЯТ вызывает жесткие требования к подаче вещества. Само вещество – оксид урана и его продукты распада являются твердыми и обладают разными теплотой испарения и температурами кипения, работа с ними чрезвычайно сложна. То, что здесь рассматриваются модельные вещества – это очень важно, так как вопрос требует решения и протестировать процесс на самом топливе вряд ли возможно. Для того чтобы сделать подобную установку или плазменный источник на ОЯТ – нужны большие средства и большая работа, не факт, что это получится с нужными параметрами. Поэтому работа представляется чрезвычайно актуальной. С точки зрения исследования в процессах в вакуумной дуге, то она представляет собой специальный интерес, не смотря на то, что всем известны работы по физике вакуумной дуги, которые здесь проводились, диссертант Равиль Анатольевич показал, что в этих вопросах еще не все изучено и понято, поэтому полученные им результаты на веществах, которые он вполне обоснованно предлагает как модельные, причем с различными свойствами по отношению к термоэмиссии и химического соединения являются новыми. Его работа является исследованием, которое приносит существенно расширительный характер в понимание процессов, происходящих в вакуумной дуге. В обосновании работы проведены и рассмотрены три вещества: гадолиний, свинец и оксид церия, которые обладают разными свойствами по отношению к разряду. Два из них изучались Равилем Анатольевичем впервые. Что значит изучались? Кто занимается экспериментальной работой понимает что, реализовать разряд на веществе, которое никто раньше не использовал – не так просто. В разряде на гадолинии тоже получены новые результаты: потоки, параметры и температуры. На противоположном материале с точки зрения эмиссионных свойств, свинце, встал вопрос о переносе тока, который Равиль рассмотрел, изучил. С привлечением необходимых экспериментальных стандартных средств, тем не менее очень правильных, проведен большой анализ. Проведенные расчеты теплового обмена на катоде представляются важными в вопросе переноса тока, что, в частности свинца, вылилось в предположение о том, что ток переносится на катоде в основном ионами. Положения на защиту подтверждаются экспериментальными данными в достаточной степени и представляются вполне обоснованными. Диссертация содержит результаты, которые опубликованы в различных изданиях. Находятся на достаточно высоком уровне.

Перейду к **замечаниям**. Представляется разумным обсудить возможность применения вакуумного дугового разряда при наличии магнитного поля. Почему? Магнитный сепаратор в своей работе использует магнитное поле, поэтому вопрос о работе источника с магнитным полем будет необходимо решать. Может ли существовать разряд? Следующее замечание относится к использованию конденсационного зонда. Речь идет о том, что конденсация происходит на него, как указано в диссертации, с коэффициентом аккомодации равным единице. Отсюда возникает вопрос об определении среднего заряда, если коэффициент осаждения не равен единице, то это приведет к ошибке. Этот вопрос требует более подробного обсуждения. Также в диссертации есть параграф, относящийся

к пробным экспериментам, сделанным на других окислах, это окислы титана и ниобия. Замечание состоит в том, что результаты этого раздела отрывочны, не носят систематического характера и требуют большей дополнительной исследовательской работы.

Не смотря на это, диссертация имеет самостоятельный характер, представляет собой систематическое и последовательное исследование. Представленные замечания носят рекомендательный характер. Диссертация является законченную квалификационной работой и соответствует всем предъявляемым к ней критериям по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Усманов Равиль Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08.

Возвращаясь к замечанию по поводу коэффициента аккомодации. В плазменных сепарационных установках существует две очень серьезные проблемы: методы подачи вещества и сбора вещества. Замечание неявно относится также и к вопросу об осаждении вещества на поверхности, который также необходимо рассматривать. Спасибо.

Председатель

Спасибо Борис Иванович. Вопросов нет к оппоненту? Спасибо еще раз. Равиль Анатольевич, пожалуйста.

Усманов Р.А.

Спасибо большое за отзыв. По поводу замечания об использовании разряда в магнитном поле – это действительно очень важный вопрос, который относится к стыковке источника плазмы с сепаратором. Он немного выходит за рамки диссертационной работы, но в планах у нас конечно же есть исследование того, как сама дуга горит в присутствии магнитного поля, как располагать источник и откуда должны стартовать частицы.

Далее по вопросу о коэффициенте конденсации частиц на коллекторе. Да, в работе сказано, что он считался равным единице, и это связано с тем, что предполагалось следующее. По оценкам температура коллектора не превышала тысячи градусов. Время набора массы коллектором составляло порядка 7-10 минут, поэтому считалось, что после первых нескольких десятков секунд осаждение пара происходило уже на запыленную поверхность. В этих условиях, принималась модель того, что есть пленка-поверхность, вблизи которой находится пар. Температура пара такова, что он пересыщен и коэффициент конденсации, согласно работе Паунда близок к единице. Но я согласен с тем, что экспериментальное измерение коэффициента конденсации усилили бы работу. Это в планах у нас также есть.

Третье замечание об использовании других оксидных материалов. Этой частью я хотел подтвердить то, что разряд возможно зажигать и на других рабочих веществах. В этом разделе есть также упоминание работы разряда на смеси оксида с хромом.

Председатель

Спасибо Равиль Анатольевич, Вы присаживайтесь, а мы переходим к дискуссии. Кто хотел бы высказаться по существу обсуждаемого вопроса? У кого есть мнение?

Вараксин А.Ю.

Мне очень понравилось замечание по поводу степени ионизации, здесь оппонент четко вычленил вероятную ошибочку в интерпретации результатов. Сходные явления есть в двухфазных течениях, допустим, воздух в трубе движется вверх, восходящий поток с твердыми макро-частицами, они летят вверх. Экспериментатору всегда очень выгодно определять расходную концентрацию, как мы кран открываем, ведро наполнили, время

засекли и получили расход – очень удобно. С точки зрения расчета и проверки данных, с вычислительной точки зрения, во всех дифференциальных уравнениях у нас присутствуют реальные концентрации, которые могут отличаться в разы в зависимости от скоростей. Есть работы, в которых тридцать лет назад описан эксперимент, а теоретики сейчас берут другое значение концентрации и ставят в расчет. Они видят число 5, и ставят 5, а там отличие от действительной концентрации в десять раз. В итоге, вычисляются тонкие структурные характеристики, а в интегральных характеристиках (концентрации) получается ошибка в 10 раз. Здесь я не очень чувствую насколько важно, но раз прозвучало, значит важно, то насколько значение степени ионизации влияет на качество трансформации ОЯТ в поток плазмы. Но, безусловно, выполнена прекрасная работа и по объему и по существу, поэтому я буду голосовать положительно, и призываю всех это делать. Еще раз отмечу, что мне очень понравилось замечание, и оно пригодится для учета этих вещей в будущих работах.

Председатель

Четче определять понятия. Равиль правильно отметил, на мой взгляд, он сказал, что именно эта характеристика важна для отбора материала. Именно такую степень ионизации нужно мерить, только не называть ее степенью ионизации.

Вараксин А.Ю.

Да, если логически выделяем, тогда это нужно описывать.

Председатель

Еще, пожалуйста.

Ученый секретарь

Мне работа очень понравилась. Экспериментальный уровень работы очень высокий. Он опирается на те работы, которые раньше проводились в ИВТАНе Владимиром Полищуком на гадолинии в основном. Поэтому уровень изначально был задан высоким, что позволило, как мне кажется, автору и получить абсолютно новые результаты на свинце и непроводящем катоде. С этой точки зрения работа очень хорошая, я буду голосовать «За» и призываю членов совета поддержать работу.

Председатель

Спасибо. Есть еще желающие? На мой взгляд, вопрос достаточно ясный, потому что работа большая, на мой взгляд, хорошая, прекрасно доложена и обсуждена. Поэтому заключительное слово соискателю, и мы можем переходить к голосованию.

Усманов Р.А.

Спасибо большое. В заключении я бы хотел поблагодарить диссертационный совет за проявленное внимание к работе, полезные замечания и обсуждение. Спасибо оппонентам за подробные отзывы, за погружение в вопрос. Благодарю научного руководителя за то, что не давал расслабиться и всех тех, кто так или иначе принимал участие в проведении экспериментов, подготовке экспериментов и обсуждение экспериментальных данных. Из присутствующих это, в первую очередь, Владимир Павлович Полищук, Виктор Иванович Киселев, Геннадий Лизякин и Николай Антонов. Благодарю за внимание.

Председатель

Отлично, значит нам нужна комиссия, несомненно, для того, чтобы проголосовать. Давайте попробуем состав комиссии из Александра Владимировича, Михаила Николаевича и Игоря Львовича (*Иосилевский, председатель счетной комиссии*). Есть возражения? Нет? (*Счётная комиссия выбирается единогласно*). Если нет, тогда утвердим комиссию и попросим ее приступить к работе (*Проводится процедура тайного голосования*).

Председатель

Уважаемые члены Совета! 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.

Иосилевский И.Л.

Уважаемые коллеги! Протокол счетной комиссии по подсчету голосов при тайном голосовании по диссертации Усманова Рауиля Анатольевича. Число членов совета **31** человек. Присутствовало на заседании **23** члена совета из них по профилю рассматриваемой специальности – **12**. Роздано бюллетеней – **23**, в урне оказалось – **23**, не роздано – **8**.

Результаты голосования **за – 22, против – нет, недействительных бюллетеней – 1.**

Есть вопросы?

Председатель

Вопросов я думаю, что нет. Есть предложение утвердить результаты голосования (*Протокол счетной комиссии утвержден единогласно*). Спасибо! Мы Вас поздравляем. Обсуждение проекта у нас произошло, есть еще предложения? Кто за предложенные замечания? Кто против? Нет. (*Проект заключения принят единогласно*). Спасибо.

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

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 30.05.2018г. протокол № 7

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

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

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

С 2015 года по настоящее время, проходит обучение в очной аспирантуре «Проблем физики и энергетики» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

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

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

Официальные оппоненты:

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

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

дали положительные отзывы на диссертацию.

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

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

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

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

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в Объединенном Институте Высоких температур РАН, Иркутском государственном техническом университете, Научно-исследовательском центре «Курчатовский институт», в Институте сильноточной электроники СО РАН, Московском инженерно-физическом институте (НИЯУ МИФИ), Институте общей физики им. А.М. Прохорова, Московском энергетическом институте (МЭИ ТУ), Институте прикладной физики РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева, Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, Казанском федеральном университете, в Санкт-Петербургском и Московском университетах.

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

Основные работы:

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

4. Амиров Р. Х., Ворона Н. А., Гавриков А. В., Жабин С. Н., Лизякин Г. Д., Полищук В. П., Самойлов И. С., Смирнов В. П., Усманов Р. А., Ярцев И. М. Экспериментальное исследование процессов вакуумно-дугового испарения и ионизации вещества (гадолиния), моделирующего уран, для разработки технологии плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива // **Труды МФТИ**. - 2014. – Том 6, № 1, С.136-145.
5. Амиров Р.Х., Ворона Н.А., Гавриков А.В., Лизякин Г.Д., Полищук В.П., Самойлов И.С., Смирнов В.П., Усманов Р.А., Ярцев И.М. Исследование возможности применения диффузной вакуумной дуги как источника плазмы для разработки технологии плазменной сепарации ОЯТ и РАО // **Ядерная физика и инжиниринг**. – 2014. – Том 5, № 11-12, С. 952-955.
6. R. Kh. Amirov, N.N. Antonov, N.A. Vorona, A.V. Gavrikov, G.D. Liziakin, V.P. Polistchook, I.S. Samoylov, V.P. Smirnov, R.A. Usmanov, I.M. Yartsev The stationary vacuum arc on non-thermionic hot cathode // **J. Phys.: Conf. Ser.** 653 (2015). P. 012164.
7. R.Kh. Amirov, N.N. Antonov, G.D. Liziakin, V.P. Polistchook, I.S. Samoylov, R.A. Usmanov, I.M. Yartsev High-voltage discharge in supersonic jet of plumbum vapor // **J. Phys.: Conf. Ser.** 653 (2015). P. 012165.
8. Amirov R.Kh., Vorona N.A., Gavrikov A.V., Liziakin G.D., Polistchook V.P., Samoylov I.S., Smirnov V.P., Usmanov R.A., Yartsev I.M. and Ivanov A.S. Diffuse vacuum arc with cerium oxide hot cathode // **J. Phys.: Conf. Ser.** 774 (2016). P. 012190.
9. R Kh Amirov, N A Vorona, A V Gavrikov, G D Liziakin, V P Polistchook, I S Samoylov, V P Smirnov, R A Usmanov and I M Yartsev Plasma jet characteristics in vacuum arc with diffused cathode spot // **J. Phys.: Conf. Ser.** 830 (2017). P. 012059.
10. R Kh Amirov, A V Gavrikov, G D Liziakin, V P Polistchook, D A Pershin, I S Samoylov, V P Smirnov, R A Usmanov, N A Vorona and I M Yartsev On the parameters of the diffused vacuum arc with cerium oxide hot cathode // **J. Phys.: Conf. Ser.** 946 (2018). P. 012170.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

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

- Положения, выносимые на защиту, построены не по классической схеме, что затрудняет их анализ. Следовало более конкретно сформулировать положения, отразив в них – в чем заключаются научные и практические результаты, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования.

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

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

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

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

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

- Из автореферата трудно понять, как рассчитывалась скорость эрозии свинца и скорость испарения в вакуум в дуге Ga (рис. 3).
- Считалась ли поверхность катода однородной или нет? Учитывалось ли влияние электрического поля на эти процессы?
- На рис. 2 приведены данные об интенсивности излучения гадолиния, но никак не оценивалась достоверность данных.
- Из автореферата трудно понять, удалось ли установить границы перехода от однородного разряда к контрагированному и переносе полученных данных на проектируемые установки по переработке отработанного ядерного топлива.
- На последней странице автореферата приведены ссылки на достаточно старые и некоторые спорные работы, но нет ссылок на работы ведущего специалиста по вакуумным разрядам К.Н. Ульянова и его школы.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

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

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

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

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

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

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

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

3. Хрипунов Б.И., Койдан В.С., Рязанов А.И., Гуреев В.М., Корниенко С.Н., Латушкин С.Т., Муксунов А.М., Семенов Е.В., Столярова В.Г., Унежев В.Н. «Радиационно-повреждённый вольфрам: получение и исследование в потоке стационарной плазмы» //

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

1. Шишпанов А.И., Ионих Ю.З., Мещанов А.В., Дятко Н.А. «Эффект памяти при зажигании тлеющего разряда низкого давления в азоте в длинной разрядной трубке» // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 6. С. 548.
2. Akishev Y., Karalnik V., Kochetov I., Napartovich A., Trushkin N. «High-Current Cathode and Anode Spots in Gas Discharges at Moderate and Elevated Pressures» // Plasma Sources Science and Technology. 2014. V. 23. № 5. P. 054013.
3. Болдарев А.С., Болховитинов Е.А., Вичев И.Ю., Волков Г.С., Гасилов В.А., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Данько С.А., Зайцев В.И., Новиков В.Г., Олейник Г.М., Ольховская О.Г., Рупасов А.А., Федулов М.В., Шиканов А.С. «Методы и результаты исследований спектров излучения мегаамперных z-пинчей на установке АНГАРА-5-1» // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 2. С. 195-199.

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

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

поступающего из плазмы в катод, получены данные о параметрах плазмы (электронная температура, средний заряд тяжелых частиц, компонентный и зарядовый состав, энергия ионов).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

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

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

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

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в Объединенном Институте Высоких температур РАН, Иркутском государственном техническом университете, Научно-исследовательском центре «Курчатовский институт», в Институте сильноточной электроники СО РАН, Московском инженерно-физическом институте (НИЯУ МИФИ), Институте общей физики им. А.М. Прохорова, Московском энергетическом институте (МЭИ ТУ), Институте прикладной физики РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева, Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, Казанском федеральном университете, в Санкт-Петербургском и Московском университетах.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

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

- результаты не раз обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях, а также были удостоены премий на конкурсах научных работ аспирантов;

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

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

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

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

Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02

д.ф.-м.н., профессор



Андреев Н.Е.

ВРИО ученого секретаря диссертационного совета Д 002.110.02

д.ф.-м.н., профессор



Василяк Л.М.



30.05.2018г.