

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

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
от 14 декабря 2022 г. (протокол № 32)

**Защита диссертации Селивонина Игоря Витальевича
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
«Влияние деградации коронирующего электрода на характеристики
поверхностного барьерного разряда»**

Специальность 1.3.9 – физика плазмы

Москва – 2022

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
Протокол № 32 от 14 декабря 2022 г.

Диссертационный совет 24.1.193.01 утвержден Приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 26.01.2022 г. № 86/нк в составе 31 человек.

На заседании присутствуют 22 человека, из них 10 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 9 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель – зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01

д.ф.-м.н., профессор Андреев Н.Е.

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01

к.ф.-м.н. Тимофеев А.В.

1	Петров О.Ф.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
2	Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
3	Храпак А.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
4	Тимофеев А.В.	К.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
5	Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.14	Подключен
6	Амиров Р.Х.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.9	Отсутствует
7	Баженова Т.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
8	Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
9	Васильев М.М.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Подключен
10	Васильев М.Н.	Д.т.н., профессор	1.3.14	Присутствует
11	Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
12	Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
13	Гавриков А.В.	Д.ф.-м.н., доцент	1.3.14	Подключен
14	Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
15	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	1.3.14	Подключен
16	Дьячков Л.Г.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
17	Еремин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
18	Зейгарник Ю.А.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.14	Присутствует
19	Зеленер Б.Б.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Подключен
20	Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Подключен
21	Киверин А.Д.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
22	Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
23	Лагарьков А.Н.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
24	Левашов П.Р.	К.ф.-м.н.	1.3.14	Присутствует
25	Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
26	Медин С.А.	Д.т.н., профессор	1.3.14	Подключен
27	Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
28	Пикуз С.А.	К.ф.-м.н.	1.3.9	Подключен
29	Савватимский А.И.	Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
30	Филиппов А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
31	Яньков Г.Г.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.9	Отсутствует

ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации научного сотрудника лаборатории 21.3 – плазменной аэродинамики и стимулированного горения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Селивонина Игоря Витальевича** на тему «Влияние деградации коронирующего электрода на характеристики поверхностного барьерного разряда». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы. Диссертация выполнена в лаборатории 21.3 – плазменной аэродинамики и стимулированного горения ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, jiht.ru).

Научный руководитель:

Моралев Иван Александрович – к.ф.-м.н., заведующий лабораторией 21.3 – плазменной аэродинамики и стимулированного горения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

Официальные оппоненты:

Знаменская Ирина Александровна - гражданка РФ, д.ф.-м.н., профессор отделения экспериментальной и теоретической физики Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, тел.: +7 (495) 939-16-82, www.phys.msu.ru, e mail: dean@phys.msu.ru),
Петров Алексей Алексеевич – гражданин РФ, к.ф.-м.н., высококвалифицированный старший научный сотрудник лаборатории вакуумной и плазменной электроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им.П.Н. Лебедева Российской академии наук " (119991, Москва, Ленинский проспект, 53, тел. +7 (499) 132-65-54, www.lebedev.ru, e-mail: office@lebedev.ru).

Ведущая организация:

Акционерное общество "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" (142190, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, тел.: +7 (495) 841-57-76, www.triniti.ru, e-mail: liner@triniti.ru).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., профессор Знаменская И.А. и к.ф.-м.н., в.с.н.с. Петров А.А., научный руководитель Селивонина И.В. к.ф.-м.н. Моралев И.А.

СТЕНОГРАММА

Председатель

Уважаемые коллеги, давайте перейдем прямо ко второй защите. Представлена диссертация Селивонина Игоря Витальевича. Алексей Владимирович, ознакомьте нас, пожалуйста, с документами, и мы начнем процедуру.

Ученый секретарь

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

Председатель

Есть вопросы по документам? Если нет тогда двигаемся дальше. Переходим к ознакомлению с результатами работы. Игорь Витальевич, пожалуйста, у вас 20 минут, прошу вас уложиться.

Селивонин И.В.

Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Селивонина И.В. прилагается).

Председатель

Спасибо, Игорь Витальевич. Пожалуйста, вопросы какие есть к соискателю по доложенному материалу? Да, Леонид Михайлович.

Василяк Л.М.

На первом слайде у вас были две различные схемы создания барьерного разряда – то, что раньше называлось скользящим разрядом, потому что барьерные двух типов бывают: когда идёт разряд от высоковольтного электрода и от электрода заземленного – вот нижняя схема, которая применяется чрезвычайно редко. И скажите пожалуйста, вот измерение энерговклада делается на верхней схеме, а тока на нижней. Вообще говоря, разряды при этом одинаковые получаются? Или они все-таки разные? Каким-то образом это проверялось?

Селивонин И.В.

Значит, если говорить про полярность подключения, то процессы, которые определяют развитие разряда...

Василяк Л.М.

Не полярность. А у вас принципиально – у вас заземленный электрод и высоковольтный, я не про полярность говорю.

Селивонин И.В.

Ну, если говорить про номиналы измерительных элементов – ёмкость или сопротивление – то импеданс этих элементов оказывается существенно ниже, чем импеданс самой разрядной ячейки. Поэтому нет особой разницы, подключаем мы их к коронирующему

или ответному электроду. То есть непосредственно измерительная система влияния на развитие разряды не оказывает в обоих случаях.

Василяк Л.М.

То есть вы когда делаете съемку и сравниваете 2 типа разряда, то они получаются одинаковыми?

Селивонин И.В.

Да.

Василяк Л.М.

Ну, это очень интересно. Скажите пожалуйста, ещё вот у вас образование отрицательных ионов – там только трехчастичное налипание в двух реакциях. А вообще говоря, в сильном электрическом поле диссоциативное налипание. Если энергия электронов велика, оно, в общем-то, может быть решающим. Вы это как-то учитывали, или для вас важна была не зона близи кромки, а всё-таки зона там, где поле маленькое?

Селивонин И.В.

Подобный вопрос задавала ведущая организация. Ответ на него следующий. Приведённая на этом слайде оценка (и в работе) является в некотором роде является оценкой сверху. Она показывает, что в результате действия такого механизма, именно трехчастичного прилипания, происходит наработка ионов в разрядной области, и эти процессы влияют на развитие разряда. Соответственно, если мы в эту оценку включим реакции с образованием атомарных ионов, то есть диссоциативного прилипания, то эта оценка покажет, что влияние ионов на самом деле ещё больше. То есть качественно вывод о том, что именно ионы отвечают за эффект уширения импульсов, который наблюдаем, будет усилен, если мы добавим в рассмотрение ещё реакции образования атомарных ионов.

Василяк Л.М.

Спасибо. Ещё можно? Скажите пожалуйста, вы нагрев оценивали? Вот вы говорили про ионный ветер. Может, это влияние того, что разряд нагревается? Ведь движущаяся у вас ионизация? Двигается, то есть продвигается тепловая волна. Или нагрев маленький для этих энергокладов?

Селивонин И.В.

Это достаточно распространённый вопрос - что у нас, собственно, влияет на структуру ветра, который генерирует разряд. И если мы говорим про нулевые скорости внешнего потока (здесь у нас разряд индуцировал поток в неподвижном воздухе, то есть мы непосредственно течение, индуцированное разрядом, рассматривали) то при этом доминирующим механизмом является как раз ионный ветер, то есть пондеромоторные силы, а не нагрев. Нагрев начинает играть большую роль уже на высоких скоростях внешнего потока.

Василяк Л.М.

Понятно, спасибо.

Председатель

Спасибо. Еще вопросы пожалуйста? Да, Павел Ремирович.

Левашов П.Р.

У меня такой вопрос. Мне не хватило информации о том как деградация или эрозия электродов происходит со временем и как это влияет на эксплуатационные характеристики разряда, то есть, вот какое характерное время его работы? Вот когда его еще можно использовать для практических целей?

Селивонин И.В.

Если мы говорим про характерные времена деградации, то в случае 100 кГц питающего напряжения при амплитуде 3.4 кВ характерные изменения структуры кромки электродов, причем как в случае алюминиевого, так и медного электродов, происходит за время порядка 2 часов. За это же время происходит изменение разрядной мощности. И дальше структура электрода и рассеиваемая мощность практически не меняется. В этом случае мы можем считать, что перед эксплуатацией таких устройств на основе барьерного разряда желательно провести предварительную обработку электродов в барьерном разряде для того, чтобы исключить дальнейшей дрейф параметров разряда. Соответственно, если разряд используется при иных параметрах питающих напряжений, следует учитывать, что при снижении частоты следования разрядов (то есть либо мы уменьшаем амплитуду, либо уменьшаем частоту) эти изменения происходят за большие времена, а сами изменения меньше. То есть...

Председатель

Вы считаете, что это все, или еще хотите что-то добавить?

Селивонин И.В.

Я пытаюсь понять, ответил ли я на вопрос.

Председатель

Ну, по крайней мере частично – безусловно. Вы удовлетворены, Павел Ремирович? Тогда спасибо, с этим вопросом закончили. Еще есть вопросы? Да, пожалуйста.

Киверин А.Д.

Вы, говоря о применении, упомянули, что этот разряд для вас может выполнять роль, как вы выразились, виртуальной шероховатости. Что вы имели в виду? Не могли бы вы пояснить, тогда я продолжу.

Селивонин И.В.

В аэродинамике существует задача подавления неустойчивостей, которые возникают вследствие шероховатостей на обтекаемом теле. И чаще всего используются шероховатости механические. То есть наклеивается турбулизатор, который представляет из себя либо наждачную бумагу, либо какую-то напечатанную шероховатость. Но при этом мы не можем контролировать её параметры. При использовании разряда мы можем управлять такой шероховатостью, то есть включать и выключать её. Отдельные

микроразряды генерирует такие же возмущения, как неоднородности механической шероховатости которая может быть нанесена на обтекаемое тело.

Киверин А.Д.

Как-то производилось сопоставление...? Вы, отвечая на один из предыдущих вопросов, говорили, что вот в зависимости от скорости температура меняется, соответственно, по-видимому, состав среды у вас тоже может меняться.

Селивонин И.В.

От скорости – температура потока?

Киверин А.Д.

Да.

Селивонин И.В.

От скорости внешнего потока зависит соотношение вклада тепловых механизмов и механизмов индуцирования ионного ветра.

Киверин А.Д.

Нет. Ну а на сколько вот эти возмущения в таких условиях воспроизводят шероховатости механические?

Селивонин И.В.

Ну здесь довольно сложно сравнивать механические параметры и электрические характеристики разряда, которые к такому же эффекту приводят. Но, как правило дефект скорости, возникающий вследствие механической шероховатости, по порядку соответствует тем скоростям течения, которое индуцирует поверхностный барьерный разряд.

Киверин А.Д.

Просто интересно. Я к тому, что раз вы это упомянули, интересно было бы сопоставить какие-то конкретные параметры. Ну хорошо, может, что в будущем.

Председатель

Да, такого сопоставления не было, насколько я понял.

Селивонин И.В.

Да.

Председатель

Спасибо. Еще есть вопросы? Ну, если нет, тогда мы можем двигаться дальше и давайте заслушаем мнение руководителя работы. Да, Иван Александрович, пожалуйста. Пожалуйста, не о работе, а о соискателе сейчас расскажите.

Моралев И.А.

Добрый день, уважаемый совет, уважаемые коллеги. Игорь к нам пришёл, по-моему, без

малого уже 10 лет назад в лабораторию, еще будучи студентом 3 курса в МЭИ. Поэтому я его знаю достаточно давно. И вот за эти десять лет мы с ним прошли достаточно большой путь в исследовании различных устройств на основе барьерного разряда как в области аэродинамических приложений, так и, собственно, в области фундаментальной физики разряда. Я хочу сказать, что мне кажется, что Игорь получил ту квалификацию за это время, которая предполагается для кандидата физико-математических наук. Он является хорошим экспериментатором, то есть те методы, которые соискатель освоил в работе, требуют достаточно большой аккуратности выполнения – это наносекундные измерения на реальном объекте. Они требуют хорошего знания электродинамики и хорошего представления как о процессе измерения, так и объекте, с которым человек работает. Игорь освоил измерения в наносекундном диапазоне, освоил основные методы измерения в аэродинамике, как например, метод Particle Imaging Velocimetry.

На мой взгляд, соискатель достаточно хорошо знакомы с физикой газового разряда, с физикой тех процессов, которые исследует. Мне кажется, завершая свой отзыв, что Игорь вполне достоин присуждения ему степени. Я призываю совет голосовать «за».

Председатель

Спасибо, Иван Александрович. Наверное, мы могли бы сейчас ознакомиться со всеми письменными отзывами, которые нам поступили. И начнем с организации, да?

Ученый секретарь

Дорогие коллеги, начнём с организации, где выполнялась работа. Это **Объединенный институт высоких температур**. Представлено заключение. Я не буду описывать все подробности про работу, достаточно много уже сегодня сказано. В заключении – диссертация «Влияние деградации коронирующего электрода на характеристики поверхностного барьерного разряда» Селивонина Игоря Витальевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физ-мат наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы. Подписано председателем семинара академиком РАН **Олегом Фёдоровичем Петровым** и ученым секретарем семинара **Евгением Александровичем Лисиным**, заверено заместителем директора **Андреем Владимировичем Гавриковым**.

Если позволите, перейду к следующему отзыву. Это отзыв **ведущей организации** - **Акционерное общество Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий Институт инновационных и термоядерных исследований**. Отзыв подготовлен профессором, доктором физмат наук **Юрием Семёновичем Акишевым**. Кроме того, так как обсужден и одобрен на заседании секции, подписан секретарём секции **Игорем Валериановичем Кочетовым**. Отзыв положительный, есть замечания. Если позволите, полностью отзыв зачитывать не буду. Тут достаточно подробно описана диссертация, ее плюсы, минусы, актуальность, практическое применение и так далее. И так, **замечания и вопросы**.

– В обсуждении результатов главы 4 утверждается, что основным механизмом, ответственным за увеличение длительности токовых импульсов отрицательных микрозарядов в конце активной фазы напряжения на медном электроде, является накопление отрицательных ионов в области привязки разрядных каналов. При этом не принимается во внимание, что длина микрозарядов растет для последующих поколений, т.е. увеличивается индуктивность микрозаряда. Не может ли именно этот эффект

привести к уширению импульса?

– В качестве основных реакций гибели электронов и наработки отрицательных ионов O_2^- указываются трехчастичные реакции прилипания (33 и 34 в диссертации на стр. 138). Однако, в электродной конфигурации кромка-плоскость электрическое поле обладает большой неоднородностью, и вблизи кромки его напряженность может достигать высоких значений, при которых доминирующим кинетическим механизмом становится двухчастичная реакция с образованием атомарных ионов O^- , которые также будут выступать дополнительным источником электронов вследствие отлипания. Таким образом, при оценке влияния отрицательных ионов на распад плазмы необходимо учитывать эти реакции.

– При использовании метода PIV газоразрядная область засеивается частицами трассерами. В работе приводятся оценки робастности метода в условиях сильного электрического поля, а также на малых временах, однако, не комментируется возможное влияние засева на развитие разряда.

– При измерении динамики рассеиваемой в разряде мощности в начальные моменты после инициирования разряда ее рост может быть связан с нагревом газа и элементов электродной системы, что не учитывается в работе. Этот эффект может оказывать существенное влияние на измерения при исследовании динамики мощности после пауз в разрядной экспозиции, когда анализируется изменение мощности разряда в первые несколько минут после инициирования разряда.

– В работе сравнивается два материала коронирующего электрода (Cu и Al), которые различаются не только энергией связи оксида, но и по многим параметрам, например, температурой плавления и теплопроводностью, электропроводностью. Для того, чтобы более полно сформулировать выводы об особенностях поведения электродов из различных материалов, количество рассматриваемых материалов желательно увеличить, проварьировав различные их параметры.

Отмеченные выше недостатки и возникшие вопросы не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу и соответствует всем критериям положения о порядке присуждения ученых степеней, и автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата наук. Отзыв положительный. Если позволите, перейду к следующим отзывам. Это у нас **4 отзыва на автореферат**. Сразу скажу, что все отзывы положительные.

(Первый отзыв). Первый отзыв на автореферат получен из **МФТИ**, составил его **Александров Николай Леонидович**, профессор кафедры прикладной физики МФТИ, заверил ученый секретарь МФТИ **Евсеев Евгений Григорьевич**. Отзыв положительный, замечаний нет.

(Второй отзыв). Следующий отзыв на автореферат получен из **Института Теоретической и прикладной механики имени Христиановича сибирского отделения РАН**. Составил кандидат физ-мат наук, старший научный сотрудник **Павел Александрович Поливанов**. Его подпись заверил ученый секретарь ИТПМ СО РАН **Юлия Владимировна Кратова**. Отзыв положительный, есть замечания:

– На рис. 6 (справа) наблюдается отличие мощности разряда, при околонулевом времени разрядной экспозиции, для случая алюминиевого электрода и частоты питающего

напряжения 25 кГц от остальных случаев. Чем это можно объяснить?

– Из автореферата следует, что исследования проводилось в широком диапазоне давлений от 0.2 до 10 бар, но конкретных данных о влиянии давления на деградацию электрода и характеристики пДБР не приводится. С чем это связано?

– В работе отмечается, что из-за роста концентрации отрицательных ионов в течение активной фазы разряда происходит удлинение токовых импульсов (рис. 8). Стоит ли ожидать, что для случая высокоскоростного внешнего течения и/или низких частот напряжения питания этот эффект не будет наблюдаться?

– В автореферате ничего не сказано по поводу значения влажности воздуха, при котором проводились исследования. Контролировалось ли это значение? Проводились ли исследования влияния влажности среды на процесс деградации электрода пДБР?

Научная значимость полученных Селивининым результатов не вызывает сомнений, отзыв положительный. Если позволите, перейду дальше.

(Третий отзыв). Следующий отзыв на автореферат получен из **Института Электрофизики и Электроэнергетики Российской Академии Наук**. Составил его старший научный сотрудник, кандидат физмат наук **Ольга Михайловна Степанова**. Заверена ее подпись заместителем директора института **Виктором Евгеньевичем Поповым**. Отзыв положительный, есть 3 замечания:

– Автор использует некорректный термин «диэлектрический барьерный разряд», который, по-видимому, является прямым и неграмотным калькированием с английского словосочетания «dielectric-barrier discharge». Правильное написание английского термина со сложным определением (через дефис) передаёт смысл как «разряд с диэлектрическим барьером», то есть диэлектрическим является барьер, а не разряд. Это небрежное заимствование, к сожалению, часто встречается у молодого поколения исследователей, которые активно используют зарубежную литературу на английском языке, но часто пренебрегают монографиями и статьями, изданными ранее на русском языке (например, Самойлович В.Г. и др. Физическая химия барьерного разряда, 1989; Автаева С.В. Барьерный разряд //Исследование и применение, 2009). Открыв эти источники, мы встретим уже давно введённый и устоявшийся в речи термин «барьерный разряд».

– На рисунках 1 и 2 представлены две схемы подключения разрядной ячейки с коронирующим электродом - высоковольтным и заземлённым - соответственно. Первую схему автор использовал для измерения мощности разряда, вторую — для регистрации тока. Однако в тексте автореферата ничего не сказано о том, какая схема подключения разрядной ячейки использовалась при проведении экспериментов. Влияет ли схема подключения на режим горения разряда, формирование токовых событий и, соответственно, на эволюцию морфологии поверхности коронирующего электрода? Или при длительной эксплуатации разрядной системы процессы, происходящие на поверхности электрода, для обеих схем подключения оказываются идентичными и приводят к одинаковым закономерностям развития исследуемых разрядных процессов?

– Из собственного опыта работы нам известно, насколько существенным является фактор влажности при наработке химически активных частиц в плазмохимическом реакторе на основе барьерного разряда в воздухе. В тексте автореферата отсутствуют сведения о контроле влажности воздуха во время экспериментов. Оказывает ли она влияние на деградацию коронирующего электрода?

Перечисленные замечания не снижают ценность проделанной соискателем работы. Отзыв положительный.

(Четвертый отзыв). И четвертый отзыв получен от **Сергея Александровича Баренгольца**, доктора физ-мат наук, ведущего научного сотрудника **Института Общей Физики имени А. М. Прохорова**. Заверена подпись ученым секретарем **Владимиром Витальевичем Глушковым**. Отзыв положительный, замечаний нет.

На этом отзывы закончены

Председатель

Спасибо, пожалуйста, вам слово для ответа на замечания, и часть замечаний там повторилась, по-видимому. Те вопросы, на которые вы уже отвечали, можно опустить.

Селивонин И.В.

Большое спасибо. Я, с вашего позволения, начну с **отзыва ведущей организации**.

Первый вопрос касается механизма уширения токовых импульсов. Спрашивается, не могла ли на это повлиять индуктивность микроразряда. Для того, чтобы ответить на этот вопрос можно сделать такую оценку. Представим индивидуальный микроразряд в виде простейшей LC-цепи, где L – это индуктивность микроразрядного канала, а C – ёмкость барьера, загружаемого микроразрядом. Согласно простейшим оценкам ёмкость составляет порядка 1 пФ, индуктивность составляет около 0.1 нГн. В этом случае соотношение импеданса частотной и индуктивной составляющей будет равняться, соответственно 160 и 0.6 Ом, и, таким образом, основной вклад в импеданс разряда вносит значение ёмкости заряжаемой области барьера, а изменения индуктивности канала не влияют на динамику тока разряда.

Следующее замечание было про реакции прилипания, с вашего позволения, я его пропущу, потому что я уже ответил ранее.

Третьим замечанием был вопрос про возможность использования метода PIV. Разрядная область заселяется частицами трассерами, и в работе приводится оценка робастности метода в условиях сильного электрического поля, однако не комментируется влияние засева на разряд. В ходе других работ и предварительных экспериментов мы убедились, что основные интегральные характеристики разряда, то есть мощность и структура разряда при добавлении частиц не менялись. Кроме того, основным результатом использования метода PIV было качественное описание структуры генерируемого разрядом течения. Существует другие работы, в которых метод PIV использовался параллельно с другими методами диагностики. На этом слайде я представил реализация теневого метода и метода PIV. Видно, что качественно структура течения одинакова, как при реализации теневого метода, где, очевидно, частицы трассеры отсутствуют, и метода PIV.

Следующее замечание связано с эффектом нагрева разрядной ячейки и газа. Во всех экспериментах разрядные чеки помещались на радиатор. Алундовая керамика обладает высокой теплопроводностью и эффективно охлаждается. Был проведён контрольный эксперимент, во время которого измерялась температура ячейки при инициации разряда. И при 100 кГц и 3.4 кВ питающего напряжения нагрев ячейки происходит за первую минуту после инициации разряда и не превышает около 50 градусов по Цельсию. Далее температура практически не меняется. При этом охлаждении ячейки происходит менее чем за 20 секунд. Мощность разряда при этом действительно меняется, но это изменение составляет не более единиц процентов. Кроме того места не совпадает с динамикой

мощности разряда.

Последнее замечание довольно существенное, точнее, на него необходимо дать объемный ответ. В работе сравнивается 2 материала коронирующего электрода, которые различаются по многим параметрам. В начале работы использовалось большее количество материалов электродов. При этом поведение медного электрода и алюминиевого в этой выборке были крайними случаями. Использовались также электроды из никеля и молибдена, и в этом случае поведение никелевого электрода и молибденового было похоже, соответственно, на поведение медного и алюминиевого. Кроме того, в других работах были представлены и другие материалы электродов, например, вольфрам. И приводятся изображения разряда. В этой таблице я привел свойства оксидов выбранных материалов в порядке убывания энергии их связи. Можно видеть, что эти данные точно коррелирует с поведением электродов, то есть со структурой разряда. Другие указанные свойства, то есть теплопроводность, температура плавления, электропроводность не позволяют установить соответствие между параметрами и структурой разряда

Перейдем к замечаниям в отзывах к авторефератам.

На рисунке шесть справа – имеется в виду вот этот график – наблюдается отличие мощность разряда при околонулевых экспозициях для алюминиевого электрода. Чем это можно объяснить? Показанные здесь графики мощности были получены в рамках одной реализации эксперимента в течение дня. В процессе эксперимента контроля влажности воздуха и не проводилось, и этот эффект может оказывать влияние на величину рассеивание мощности. Основным выводом в этой части работы являлось качественная динамика разрядной мощности, поэтому такое расхождение в начальных данных не является значимым.

Из автореферата следует что следует, что исследования проводились в широком диапазоне давлений... В рамках диссертационной работы процессы деградации исследовались только при атмосферном давлении. При различном давлении сравнивались пороговые значения напряжения зажигания разряда и филаментации. Действительно при уменьшении давления будет происходить увеличение энергии блокирующих ионов, и эффективности эрозионной очистки в этом случае будет увеличиваться. При давлении ниже 100 мбар оксид алюминия также эффективно распыляется ионами, что мы показывали в рамках контрольного эксперимента. Однако параметрических исследований зависимости темпов эрозии и деградации от давления в рамках работы не проводилось.

В работе отмечалось, что из-за роста концентрации отрицательных ионов в течение фазы происходит удлинение токовых импульсов, и можно ли ожидать, что для случая высокоскоростного внешнего потока этот эффект будет пропадать? Действительно для того, чтобы этот эффект был значимым, необходимо, чтобы за время между последовательными разрядами ионный заряд не успевал покинуть разрядную область. А это может происходить во внешнем потоке, скорость которого соизмерима со скоростью дрейфа ионов, которая составляет около пятисот метров в секунду. То есть, предположительно, при полутора-двух Махах внешнего потока при такой же частоте следования разрядов увеличения длительности токовых импульсов из эффекта накопления ионов происходить не будет. Но и очевидно, что для низких частот следования микрозарядов у ионов будет гораздо больше времени на то, чтобы покинуть разрядную область, и мы также ожидаем что этот эффект будет пропадать.

Про влажность было сразу несколько замечаний высказано. Сразу отмечу, что характеристики импульсов в работе исследовались в синтетическом воздухе, потому что на их характеристики влияние влажности достаточно заметно. Основные экспериментальные данные по деградации электродов были получены в комнатном воздухе тебе позвоню относительной влажности от 20 до 60%. Проводился контрольный эксперимент в синтетическом воздухе, и было показано, что замена воздуха комнатного на синтетику не приводит к каким-то изменением ни в динамике мощности, ни в изменения структуры кромки.

С замечанием относительно использования термина «диэлектрический барьерный разряд» могу только согласиться, отметить, что в настоящее время термин «диэлектрический барьерный разряд» также прочно укрепился и в русскоязычных работах.

Следующий вопрос был про влияние схемы подключения ячейки. На него я давал ответ: схема подключения электрода и измерительные элементы не оказывают влияния на характеристики разряда.

Про влажность я уже ответил. Собственно, на этом всё.

Председатель

Спасибо. Давайте тогда перейдем к мнению официальных оппонентов. Оба оппонента у нас присутствуют, и давайте начнем с Ирины Александровны Знаменской. Пожалуйста, ознакомьте нас со своим мнением о работе. Если не возражаете, то мы хотели бы услышать ваше мнение о работе, а не о ее содержании.

Знаменская И.А.

В целом работа выполнена в рамках специальности физика плазма, но при этом она носит во многом междисциплинарный характер, что только на пользу данной работе, потому что междисциплинарность – это та область, вернее тот набор областей, где осуществляются сейчас какие-то действительно новые прорывы, и в данной ситуации тоже здесь включены и физика материалов, и химическая физика, и механика жидкостей и газов. И приложения, которые предусматривает данная работа – это широкие аспекты задач, инженерных в том числе. Ну и плюс междисциплинарность требует от автора работы некоторого, конечно, расширения диапазона знаний, навыков и умений, что отражено в данной работе. В ней присутствует и обработка, и сам эксперимент, и химия, и диагностика, и это присутствует в данной работе. Ну, безусловно, она всего заслуживает, но у меня имеются 2 не очень глобального возражения.

(Замечание 1). Одно из них уже обсуждалось, но поскольку у меня ряд работ связан с PIV – Particle Imaging Velocimetry, или анемометрия по изображениям частиц, как положено говорить в русскоязычной литературе. В плазме, когда мы используем этот метод засеивания, тем более засеив здесь масляными каплями в 2 микрона, в других местах написано металлическими частицами, но одно дело, когда просто это всё загрязняет динамическую трубу – это катастрофа, но это потом можно как-то всё-таки ликвидировать. А вот когда, как наш опыт показывает, это в плазме, здесь происходит какие-то почти необратимые процессы. У нас, например, разряд, тоже скользящий по поверхности диэлектрика, и после использования PIV был очень интересный результат. Но потом мы боролись с тем, что припекаются вот эти масляные капельки. Мы их не видим конечно, но они каким-то образом испортили стекло, и разряда начал бить у нас

там не столбиком, а просто по стеклу. Поэтому сейчас ещё раз вскроем и будем пытаться очистить. Поэтому вот здесь, когда изучаются электроды, может быть очень трудно вычленишь ту часть, которая влияет именно за счет конденсации этих масляных капель микронных на поверхности, а куда им осесть, как не на поверхности. Но, тем не менее, надо хотя бы это обговаривать. Ну, химический анализ тут трудно проводить, но, безусловно, они как-то воздействуют. Сегодня об этом уже говорили до меня, но у меня это здесь указывается как замечание.

(Замечание 2). А второе замечание, касается того, что обзор литературы весьма обширен, и 174 ссылки для кандидатской вполне и более чем достаточно. Но из них только 10 русскоязычных. Я конечно выгляжу наверное слишком... Но читают ведь не только люди, которые хорошо разбираются, иногда студентам даёшь почитать и так далее. Хотя бы вот это служит оправданием того, что надо бы побольше обращаться к русскоязычным источникам. Тем более у вас в институте есть прекрасный журнал с хорошим прошлым и, надеюсь, будущим – ТВТ. Плюс есть журнал Физика Плазмы. Там один из отзывов на автореферат дал Александров Николай Леонидович, так вот в журнале Физика Плазмы за 21 год есть отличный единственный обзор по барьерному разряду и быстрому нагреву. Да и в принципе люди выиграли грант «Экспансия» (с Андреем Юрьевичем Стариковским), который предполагал опубликовать обзор в русскоязычном журнале, что они и сделали. Да ещё в архив загрузили до этого за полгода. Здесь он не упомянут, хотя он непосредственно, на мой взгляд, по теме диссертации. Там есть в том числе про PIV в разряде, есть ссылки на работы. Ну плюс статья 17 года – обзор по теме диссертации. И масса других работ выполненных. Наверное, это связано с какими-то требованиями по грантам, но сейчас немножко этот вектор заколебался.

Ну в принципе, значит, хочу сказать что рассмотренная диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям установленным пунктом 9 положение о порядке присуждения ученых степеней, а её автор Селивонин Игорь Витальевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности физика плазмы.

Председатель

Спасибо, спасибо, Ирина Александровна. Игорь Витальевич, пожалуйста, вам слово для ответа оппоненту.

Селивонин И.В.

Ирина Александровна, большое спасибо за отзыв.

(Замечание 2). Сначала я хотел бы прокомментировать замечание насчёт литературы. С ними я могу только согласиться и пояснить, что с многими русскоязычными работами я знаком. Но достаточно часто выходило так, что с работой я знакомился уже после того, как, собственно, литературный обзор был написан.

(Замечание 1). Касательно замечания о границах применимости метода PIV. Действительно, при использовании метода PIV существует проблема загрязнения рабочего пространства, и характеристики разряда при этом меняются. Однако, в текущей работе в ряде предварительных экспериментов мы не замечали, что какие-то параметры разряда, то есть его структура или рассеиваемая мощность меняются. Следует отметить, что исследования, которые проводились методом PIV, проводились достаточно быстро, и того объема частиц было недостаточно для того, чтобы значительно загрязнить рабочую область. На основании этого можно утверждать, что метод PIV применим с этой точки

зрения.

Председатель

Спасибо, тогда перейдем ко второму оппоненту. Алексей Алексеевич Петров из ФИАНа, пожалуйста. К вам тоже просьба говорить не про содержание работы, которое нам уже знакомо, а про ваше мнение о ней.

Петров А.А.

Здравствуйте!

Я не буду зачитывать отзыв целиком, но остановлюсь на основных моментах диссертации.

Вопрос эрозии электродов слаботочных разрядах и динамике разрядного факела на поверхности и генерации ионного ветра занимают уже около 100 лет. Это работа Капцова 20-х лет прошлого века, потом Вайслера, Беннета, обобщены они были в работах Лёба. И каждый раз поднимали одни и те же вопросы, и до сих пор на них не могут найти ответ. Вот в ИВТАНЕ например, подобные работы в коронном разряде проводились в двухтысячных годах в лаборатории Эрика Ивановича Асиновского. В распоряжении у них был осциллограф с полосой пропускания 200 МГц. Сейчас появились более хорошие технические возможности, и сразу появились новые результаты.

Вопросы о структуре переднего фронта импульса Тричела, например, давно возникали, и было большое количество объяснение структуры этого фронта. Вот Игорь провёл очень интересный эксперимент. Он сначала очистил поверхность электрода от оксидной пленки, а потом смотрел как горит в кислородной атмосфере разряд на чистом электроде. И оказалось, что меняется структура переднего фронта. И вот на мой взгляд, это главный результат, который ставит эту работу в истории в ряд с теми работами, которые сейчас вспоминают и цитируют. Ну вот на мой взгляд это – основной результат работы.

Это работа очень большая, экспериментальная. Как любая большая экспериментальная работа... можно несколько замечаний привести. Я привел 3 замечания в этой диссертационной работе.

(Замечание 1). Большая часть литературного обзора посвящена коронному разряду. Но не хватает как бы критерия аналогии, я вот не могу выразиться, как это лучше объяснить. Почему мы применяем аналогию с коронным разрядом и барьерного, почему нужно их сравнивать? Вот, например, в коронном разряде межимпульсный интервал определяется релаксацией потенциала в промежутке, в дрейфовой области. В барьерном разряде добавляются процессы стекания заряда по поверхности диэлектрика и добавляется изменение потенциала электрода. Вот, например, это один из факторов. И по многим другим факторам тоже можно было бы более детально написать. Это было первое замечание, которое относится к литобзору.

(Замечание 2). Второе замечание – автор связывает энергию связи оксида, оксида алюминия, оксида меди с эрозионной картиной. Вот на мой взгляд это положение 1 и вывод 2 немножко преждевременны, как мне лично кажется потому что автор упустил, то есть не упустил, а не принял во внимание, что эти оксиды совершенно разные по структуре, разной толщины, они по-разному заряжаются, по-разному стекает с них заряд. Другие факторы тоже различны, не только теплопроводности, которая уже там рассматривались, или проводимость. И даже разная толщина всегда приводит к разной зарядке оксида. Это влияет на разряд. Разная структура генерационной области, разные энергия ионов, все по-разному расплывается. В общем-то энергия связи оксида не может однозначно напрямую влиять на эрозионную картину. Стоит отметить, что этот вывод

опубликован. Но тем не менее, такое замечание было.

(Замечание 3). Третье замечание было по PIV, но здесь уже на него отвечали по несколько раз, я тогда просто озвучу, что недостаточно обоснована применимость этого метода вообще к микроразрядам в барьерном разряде, потому что эти микроразряды очень эффективно заряжают поверхности. И на мой взгляд в литобзоре недостаточно обоснована применимость этого метода.

Ну, вот такие три замечания. Я уже разобрался с ними на самом деле. Скажу, что в диссертации все нормально с PIV, научный руководитель объяснил.

Я формальную часть зачитаю, что на мой взгляд диссертация полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК, автореферат диссертации хорошо оформлен, полно опубликован, и работа соответствует критериям установленным пунктом 9 «Положения о присуждении ученых степеней» № 842. И ее автор Селивонин Игорь Витальевич безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени по специальности 1.3.9. – физика плазмы.

Спасибо.

Председатель

Спасибо, Алексей Алексеевич, спасибо. Пожалуйста, Игорь Витальевич, вам слово.

Селивонин И.В.

Большое спасибо за ваш отзыв.

(Замечание 1). Сначала я хотел бы прокомментировать аналогию коронного разряда и поверхностного барьерного разряда.

В диссертации было оценено время дрейфа облака отрицательного объемного заряда. Здесь следует сказать, что в поверхностном барьерном разряда кромка электрода может обладать очень малым радиусом кривизны. Вследствие этого экранировка внешнего приложенного электрического поля может быть обусловлена не только поверхностными эффектами, то есть зарядкой поверхности барьера, но также эффектами объёмными, обусловленными возникновением облака ионного отрицательного заряда. По нашим оценкам время стекания заряда с поверхности диэлектрика составляет порядка единиц и десятков секунд. То есть на временных масштабах порядка полупериода питающего напряжение стекания заряда практически не происходит. Если говорить про объёмные эффекты, то при длине микрозаряда около 3 миллиметров характерное время покидания разрядной области объёмным зарядом является составляет около 4 мкс. Соответственно это время должно быть порядка характерного межимпульсного интервала, чтобы объёмные эффекты оказывали влияние.

Такому межимпульсному интервалу в 4 мкс соответствует развитие разряда при параметрах питающего напряжения с амплитудой 3 кВ и частоте 5 кГц. И эти параметры заметно ниже, чем те которые используются в работе. С увеличением напряжения или частоты объёмные эффекты оказываются доминирующими над эффектами поверхностными.

(Замечание 2). Второй вопрос касается связи топографии эрозионной поверхности на медном и алюминиевом электроде с энергией связи оксида. В работе сравнивается развитие разряда на медном электроде без оксида, который удаляется в результате эрозионной очистки в катодном слое отрицательных микрозарядов, и на алюминиевом электроде, на котором как раз и образуются оксид со сложной структурой. На алюминии такая структура возникает потому, что ионы кислорода внедряется в материал электрода, об этом свидетельствует тот факт, что увеличение высоты электрода при образовании оксида не происходит. При этом энергии бомбардирующих кромку ионов в данном случае недостаточно, чтобы этот слой разрушить. Я снова покажу этот слайд, что в начале

работать исследовалось несколько типов электродов из большего количества материалов. И была явно выявлена корреляция между поведением электрода, структурой разряда, который организуется на электродах из различных материалов, также динамикой мощности – и энергией связи оксида. На основании полученных результатов можно сделать однозначный вывод о связи энергии связи оксида материал электрода и поведением электродов из различных материалов.

(Замечание 3). Последний вопрос касается PIV, на него я ранее уже ответил.

Председатель

Спасибо, Игорь Витальевич. Вы присаживайтесь, у нас сейчас будет дискуссия. Кто хочет высказаться? Да, Леонид Михайлович.

Василяк Л.М.

Мы знакомимся с этой диссертацией на семинаре, подробно обсуждали результаты. Я как член экспертного совета знакомимся с диссертацией ещё дополнительно. С моей точки зрения диссертация хорошо написана, соответствует всем правилам и критериям, поэтому здесь нет никаких сомнений, что это законченная научная работа, а что касается уровня диссертанта, то мы видели его в ответах на вопросы. Я считаю что это высокий уровень, несомненно, кандидата наук. Я предлагаю уважаемым членам ученого совета проголосовать «за».

Председатель

Спасибо, спасибо, Леонид Михайлович. Еще, какие есть мнения по представленному материалу? Если нет, тогда давайте я попробую просуммировать вот мнение, которое Леонид Михайлович сказал, которое мы слышали в оценках оппонентов.

На мой взгляд работа вполне отвечает всем требованиям, и мы можем перейти, по-видимому, к голосованию.

Ученый секретарь

Заседание проходит в комбинированном дистанционном режиме, поэтому голосование проводится с использованием телекоммуникационных систем с помощью нашего сайта. Прошу всех присутствующих членов диссовета очных и дистанционных, войти под своим логином и паролем на сайт ОИВТ РАН с мобильного телефона или с компьютера доступного вам, вот, например, у нас в зале, и проголосовать. Голосование в разделе научная деятельность- диссертационный совет -голосование за текущую защиту.

Председатель

Извините, пожалуйста, мы до голосования должны дать последнее слово соискателю. Игорь Витальевич, пожалуйста, ваше заключительное слово.

Селивонин И.В.

Я хочу поблагодарить уважаемых членов совета за уделённое внимание, поблагодарить оппонентов за проделанную работу и проявленный интерес к работе.

Очень большую благодарность я хочу выразить своему научному руководителю Ивану Александровичу. Потому что этот человек оказал очень большое влияние, определяющее влияние на становление меня как исследователя. Еще я обращаюсь с благодарностью к своим товарищам по лаборатории, которая помогли создать дружескую и располагающую к плодотворной работе атмосферу. Спасибо!

Председатель

Спасибо, Игорь Витальевич. Я думаю, что мы можем приступить к голосованию. Как только оно будет закончено, мы должны будем вернуться к проекту заключения.

(Проводится процедура тайного голосования).

Ученый секретарь

Дорогие коллеги! Голосование у нас закончилось. Поэтому, если позволите, расскажу о результатах. На защите у нас сегодня присутствуют **22** члена диссертационного совета. **12** членов диссертационного совета присутствует очно, **10** дистанционно. По профилю - **10**, очно присутствует по профилю **4** члена диссертационного совета. Получено **22** «за», **0** «против», **0** воздержались.

Председатель

Теперь мы должны утвердить результаты голосования, если нет никаких возражений. Все присутствующие «за», как у нас удалённая аудитория отнеслась? Публика безмолвствует – будем считать, что это знак согласия. Тогда, значит, поздравляю вас!

Переходим к заключительному акту. Мы должны рассмотреть заключение нашего совета. Есть замечания, пожелания?

(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).

Если больше нет желающих обсуждать проект, если нет тогда прошу со сделанными замечательных принять наше заключение. Воздержавшиеся, «против»? Никого? Кто-нибудь дистанционно хочет кто-нибудь, кроме как согласиться с тем заключением которые мы обсудили? Если нет, тогда всем спасибо, мы закончили наше заседание.

(Проект заключения принят единогласно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.193.01

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 14.12.2022 г. № 32

О присуждении Селивонину Игорю Витальевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Влияние деградации коронирующего электрода на характеристики поверхностного барьерного разряда» по специальности 1.3.9 – физика плазмы; принята к защите 03.10.2022 г., (протокол заседания № 21) 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 науки и высшего образования Российской Федерации № 86/нк от 26.01.2022 г.

Соискатель Селивонин Игорь Витальевич 1993 года рождения, в 2016 году окончил

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Работает в должности научного сотрудника лаборатории № 21.3. – плазменной аэродинамики и стимулированного горения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

В 2020 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Диссертация выполнена в лаборатории № 21.3. – плазменной аэродинамики и стимулированного горения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией № 21.3. – плазменной аэродинамики и стимулированного горения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук Моралев Иван Александрович

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, профессор отделения экспериментальной и теоретической физики Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова **Знаменская Ирина Александровна;**

- кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный старший научный сотрудник лаборатории вакуумной и плазменной электроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им.П.Н. Лебедева Российской академии наук **Петров Алексей Алексеевич**

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация **Акционерное общество "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований"** в своем положительном заключении, составленном профессором, доктором физико-математических наук (01.04.08 - физика плазмы) Акишевым Юрием Семёновичем (утвержденном 29.11.2022 г. и.о. генерального директора Петуниным А.А.) указала, что научная значимость работы определяется, в первую очередь, новизной полученных результатов практически по всем направлениям работы. Воздействие барьерного разряда на электроды представляет интерес как для физики приэлектродных процессов, так и для физики взаимодействия низкотемпературной плазмы с поверхностью. Изменение формы токовых импульсов микрозарядов свидетельствует об изменении в процессах развития микрозаряда на начальной стадии и на стадии их распада. Эти эффекты представляет большой интерес при исследовании развития разряда на электродных кромках с различной структурой и составом.

С практической точки зрения, полученные результаты могут быть полезны при разработке различных устройств на основе барьерного разряда, когда существует необходимость длительной работы электродных систем при стабильных параметрах разряда и/или их предсказуемых изменениях. Использование представленных в работе данных позволит оценивать срок службы разрабатываемых устройств и учесть особенности изменения характеристик разряда при деградации кромок. Полученные данные могут представлять интерес и быть использованными в таких учреждениях как физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет Санкт-Петербургского государственного университета, Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Центральный Аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, КНИТУ КАИ им. А.Н. Туполева.

Соискатель имеет 23 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации

опубликовано 6 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 6 работ, 16 тезисов в сборниках:

1. **Selivonin I. V.**, Lazukin A.V., Moralev I.A., Krivov S.A. Effect of electrode degradation on the electrical characteristics of surface dielectric barrier discharge // Plasma Sources Sci. Technol. 2018, Vol. 27, № 8, P. 085003.
2. **Selivonin I.** and Moralev I. Microdischarges properties in sDBD: the role of the exposed electrode oxidation // Plasma Sources Sci. Technol. 2021, Vol. 30, № 3, P. 035005.
3. Moralev I., Sherbakova V., **Selivonin I.**, Bityurin V., Ustinov M. Effect of the discharge constriction in DBD plasma actuator on the laminar boundary layer // Int. J. Heat Mass Transf. 2018, Vol. 116, P. 1326–1340.
4. Lazukin A.V., Selivonin I.V., Moralev I.A., Krivov S.A. Modification of an aluminum electrode in a surface dielectric barrier discharge plasma // J. Phys. Conf. Ser. 2017, Vol. 927, P. 012028.
5. **Selivonin I.**, Lazukin A., Moralev I., Krivov S., Roslyakov I. Erosion of the sputtered electrodes in the surface barrier discharge // J. Phys. Conf. Ser. 2019, Vol. 1394, P. 012027.
6. **Selivonin I.** and Moralev I. Influence of the Condition of the Exposed Edge in the SDBD on the Discharge Operation Mode in Argon // J. Phys. Conf. Ser. 2021, Vol. 2100, P. 012014.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»** (кафедра прикладной физики, д.ф.-м.н., профессор Александров Н.Л.) – отзыв положительный, без замечаний.

2. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»** (и.о. ведущего научного сотрудника, д.ф.-м.н. Баренгольц С.А.) – отзыв положительный, без замечаний.

3. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук** (с.н.с., к.ф.-м.н., Поливанов П.А.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- На рис. 6 (справа) наблюдается отличие мощности разряда, при околонулевом времени разрядной экспозиции, для случая алюминиевого электрода и частоты питающего напряжения 25 кГц от остальных случаев. Чем это можно объяснить?

- Из автореферата следует, что исследования проводилось в широком диапазоне давлений от 0.2 до 10 бар, но конкретных данных о влиянии давления на деградацию электрода и характеристики пДБР не приводится. С чем это связано?

- В работе отмечается, что из-за роста концентрации отрицательных ионов в течение активной фазы разряда происходит удлинение токовых импульсов (рис. 8). Стоит ли ожидать, что для случая высокоскоростного внешнего течения и/или низких частот напряжения питания этот эффект не будет наблюдаться?

- В автореферате ничего не сказано по поводу значения влажности воздуха, при котором проводились исследования. Контролировалось ли это значение? Проводились ли исследования влияния влажности среды на процесс деградации электрода пДБР?

4. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук** (с.н.с., к.ф.-м.н.

Степанова О.М.) - отзыв положительный, с замечаниями:

– Автор использует некорректный термин «диэлектрический барьерный разряд», который, по-видимому, является прямым и неграмотным калькированием с английского словосочетания «dielectric-barrier discharge». Правильное написание английского термина со сложным определением (через дефис) передаёт смысл как «разряд с диэлектрическим барьером», то есть диэлектрическим является барьер, а не разряд. Это небрежное заимствование, к сожалению, часто встречается у молодого поколения исследователей, которые активно используют зарубежную литературу на английском языке, но часто пренебрегают монографиями и статьями, изданными ранее на русском языке (например, Самойлович В.Г. и др. Физическая химия барьерного разряда, 1989; Автаева С.В. Барьерный разряд // Исследование и применение, 2009). Открыв эти источники, мы встретим уже давно введённый и устоявшийся в речи термин «барьерный разряд».

– На рисунках 1 и 2 представлены две схемы подключения разрядной ячейки с коронирующим электродом - высоковольтным и заземлённым - соответственно. Первую схему автор использовал для измерения мощности разряда, вторую — для регистрации тока. Однако в тексте автореферата ничего не сказано о том, какая схема подключения разрядной ячейки использовалась при проведении экспериментов. Влияет ли схема подключения на режим горения разряда, формирование токовых событий и, соответственно, на эволюцию морфологии поверхности коронирующего электрода? Или при длительной эксплуатации разрядной системы процессы, происходящие на поверхности электрода, для обеих схем подключения оказываются идентичными и приводят к одинаковым закономерностям развития исследуемых разрядных процессов?

– Из собственного опыта работы нам известно, насколько существенным является фактор влажности при наработке химически активных частиц в плазмохимическом реакторе на основе барьерного разряда в воздухе. В тексте автореферата отсутствуют сведения о контроле влажности воздуха во время экспериментов. Оказывает ли она влияние на деградацию коронирующего электрода?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н., профессор **Знаменская Ирина Александровна** является ведущим ученым в области физики газовых разрядов постоянного и переменного тока при атмосферном давлении, а также крупным специалистом по применению плазмы для задач плазменной аэродинамики. Публикации по теме диссертации:

1. Koroteeva E., Doroshchenko I., Znamenskaya I. Experimental and numerical investigation of a flow induced by a pulsed plasma column // Phys. Fluids. 2018, 30(8), P. 086103;

2. Mursenkova I.V., Znamenskaya I.A., Lutsky A.E. Influence of shock waves from plasma actuators on transonic and supersonic airflow // J. Phys. D. 2018, 51(10), P. 105201;

3. Znamenskaya I., Koroteeva E., Mursenkova I., Liao Yu. Simulating particle inertia for velocimetry measurements of a flow behind an expanding shock wave // Phys. Fluids. 2018, 30(1), P. 011702.

- к.ф.-м.н., с.н.с. **Петров Алексей Алексеевич** является признанным специалистом в области физики низкочастотных электрических разрядов, а также экспертом в области эрозии электродов в коронном разряде. Публикации по теме работы:

1. Amirov R.K., Barenhol'ts S.A., Korostelev E.V., Pestovskii N.V., Petrov A.A., Savinov S.Y., Samoilov I.S. The airflow effect on a negative corona discharge // Tech. Phys. Lett. 2016, 42 (9), P. 912-914;

2. Amirov R.K., Barenhol'ts S.A., Korostelev E.V., Pestovskii N.V., Petrov A.A., Savinov S.Y., Samoilov I.S. Erosion cell formation in the pulseless negative corona discharge // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2015, 42 (3), P. 71-76;

3. Mesyats G.A., Bochkarev M.B., Petrov A.A., Barenhol'ts S.A. On the mechanism of operation of a cathode spot cell in a vacuum arc // Appl. Phys. Lett. 2014, 104 (18), P. 184101.

- **Акционерное общество "Государственный научный центр Российской**

Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" является профильной организацией, специализирующейся на проведении исследований в области физики плазмы, включая физику низкотемпературной плазмы и основы ее применения в технологических процессах. В лаборатории кинетики слабоионизованной плазмы проводятся исследования механизмов развития разрядов и элементарных процессов в низкотемпературной плазме. Публикации научных групп АО ГНЦ «ТРИНИТИ»:

1. Akishev, Y; Alekseeva, T; Karalnik, V; Petryakov, A. On constriction and striation of a diffuse DBD in large gap filled with moderate pressure helium diluted by the air and easily ionized impurity // Plasma Sources Sci Technol. 2022, 31(8), P. 084001;

2. Akishev, Y; Alekseeva, T; Karalnik, V; Petryakov, A. On the slow ionization waves forming the breakdown in a long capillary tube with helium at low pressure // J. Phys. D. 2022, 55(14), P. 145202;

3. Akishev, Y; Karalnik, V; Medvedev, M; Alekseeva, T; Petryakov, A; Shao, T; Zhang, C; Huang, B. About the possible source of seed electrons initiating the very first breakdown in a DBD operating with the air at atmospheric pressure // Plasma Sources Sci Technol. 2021, 30(2), P. 025008.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– было обнаружено, что деградация электрода является важным фактором, определяющим структуру поверхностного разряда и динамику мощности, рассеиваемой в разряде при длительной экспозиции электрода;

– экспериментально показано, что направление протекания процессов деградации определяется конкурирующими процессами накопления продуктов эрозии на электроде и эрозионной очисткой кромки. Соотношение скорости этих процессов, в свою очередь, определяется энергией связи оксида электрода;

– разработан метод регистрации и обработки токовых осциллограмм, позволяющий анализировать статистические характеристики токовых импульсов в барьерном разряде и форму токовых импульсов с наносекундным разрешением;

– обнаружено, что изменение режима горения разряда и состояния коронирующей кромки влияет на длительность существования микрозарядов, о чем свидетельствует искажение формы токовых импульсов, ассоциированных с одиночными микрозарядами. Физическим механизмом, ответственным за искажение формы токовых импульсов, являются особенности наработки отрицательных ионов кислорода в разрядной области;

– экспериментально показано, что деградация электродов приводит к существенным искажениям структуры индуцированного разрядом ионного ветра.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– наблюдаемому различию в поведении электродов из различных материалов дано физическое объяснение, основанное на оценке вклада различных механизмов деградации коронирующих кромок;

– выявлена определяющая роль структуры и состояния кромок в организации различных режимов горения разряда, а также в динамике рассеиваемой в барьерном разряде мощности;

– дано физическое объяснение искажения формы токовых импульсов индивидуальных микрозарядов, основанное на оценке динамики отрицательных ионов кислорода.

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

– сформулированные представления о поведении коронирующих электродов из различных материалов позволяют прогнозировать изменения характеристик

поверхностного барьерного разряда при длительной работе электродной системы;

– полученные результаты о динамике мощности разряда при деградации кромок позволяют оценивать изменения эксплуатационных характеристик устройств на основе барьерного разряда, таких, как выход озона в озонаторах, тягу актуаторов на основе барьерного разряда;

– полученные результаты об искажениях структуры поля течения, индуцированного разрядом, позволяют сформулировать рекомендации по выбору материала электрода для применения различных задач в области плазменной аэродинамики.

Полученные результаты могут быть полезны при разработке различных устройств на основе барьерного разряда, когда существует необходимость длительной работы электродных систем при стабильных параметрах разряда и/или их предсказуемых изменениях. Использование представленных в работе данных позволит оценивать срок службы разрабатываемых устройств и учесть особенности изменения характеристик разряда при деградации кромок. Полученные данные могут представлять интерес и использоваться в таких учреждениях, как МГУ им. М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургский государственный университет, Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Центральный Аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, КНИТУ КАИ им. А.Н. Туполева, Объединенный институт высоких температур РАН, АО ГИЦ «ТРИНИТИ».

Оценка достоверности результатов выявила, что основные выводы работы получены с использованием проверенных диагностических методик, применяемых для измерения и контроля различных параметров плазмы барьерного разряда, доработанных применительно к описанным в работе экспериментам. Апробация методик проводилась на модельных объектах.

Достоверность полученных экспериментальных результатов подтверждается их сравнением с результатами экспериментальных и теоретических исследований, проводимых другими научными коллективами.

Личный вклад соискателя в получение результатов, вошедших в диссертацию, является определяющим.

Соискателем созданы экспериментальные стенды для исследования поверхностного барьерного разряда в конфигурации кромка-плоскость в воздухе при напряжениях 1-10 кВ и частотах 10 и 100 кГц питающего напряжения, диапазоне давлений от 0.1 до 4 бар. Созданы разрядные ячейки, доработаны или созданы измерительные схемы и методики, требуемые для измерения интересующих параметров разряда.

Автором выполнены экспериментальные работы по исследованию деградации электродов в барьерном разряде в неподвижном воздухе и в потоке. Выполнены измерения интегральных электрических характеристик разряда и проведена оптическая регистрация разряда при коротких и длительных экспозициях. Разработан и применен алгоритм обработки токовых осциллограмм, в результате чего были получены данные по характеристикам и статистике токовых импульсов в барьерном разряде. Проведены исследования трехмерных гидродинамических течений, генерируемых актуаторами с алюминиевыми и медными электродами с различным состоянием коронирующих кромок.

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

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Селивинин Игорь Витальевич ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, согласился с замечаниями и привел собственную аргументацию.

На заседании от 14.12.2022 г. диссертационный совет принял решение:

за решение научной задачи, имеющей значение для развития физики низкотемпературной плазмы присудить Селивонину Игорю Витальевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 22 человек, из них очно: 4 доктора наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 6 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 6 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 3 доктора 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 22, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

Зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)
д.ф.-м.н., профессор

Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)
к.ф.-м.н.

Тимофеев А.В.



14.12.2022 г.