

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.193.01  
(Д 002.110.02), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 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](http://jiht.ru)), утвержденного Приказом Министерства образования и науки 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 микроразрядов, о чем свидетельствует искажение формы токовых импульсов, ассоциированных с одиночными микроразрядами. 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 микроразрядов, 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 ГНЦ «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 Селивонин 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.

