

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 003.031.01, созданный на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, извещает о результатах состоявшейся 8 сентября 2022 года публичной защиты диссертации Нефедцева Евгения Валерьевича "Явления на катоде и в прикатодной плазме в начальных стадиях импульсного пробоя миллиметровых вакуумных промежутков", представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Время начала заседания: 15.00

Время окончания заседания: 19.35.

На заседании диссертационного совета присутствовали 20 человек из 24 членов диссертационного совета, из них 8 докторов наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника:

- |   |           |          |
|---|-----------|----------|
| 1. Ратахин Николай Александрович – председатель диссертационного совета | д.ф.-м.н. | 01.04.04 |
| 2. Королёв Юрий Дмитриевич – зам. председателя диссертационного совета  | д.ф.-м.н. | 05.27.02 |
| 3. Озур Григорий Евгеньевич – ученый секретарь диссертационного совета  | д.т.н.    | 05.27.02 |
| 4. Багров Владислав Гавриилович – член совета                           | д.ф.-м.н. | 01.04.04 |
| 5. Иванов Юрий Фёдорович – член совета                                  | д.ф.-м.н. | 01.04.04 |
| 6. Коваль Николай Николаевич – член совета                              | д.т.н.    | 05.27.02 |
| 7. Козырев Андрей Владимирович – член совета                            | д.ф.-м.н. | 05.27.02 |
| 8. Кошелев Владимир Ильич – член совета                                 | д.ф.-м.н. | 01.04.04 |
| 9. Ломаев Михаил Иванович – член совета                                 | д.ф.-м.н. | 01.04.04 |
| 10. Лосев Валерий Фёдорович – член совета                               | д.ф.-м.н. | 05.27.02 |
| 11. Окс Ефим Михайлович – член совета                                   | д.т.н.    | 05.27.02 |
| 12. Орешкин Владимир Иванович – член совета                             | д.ф.-м.н. | 05.27.02 |
| 14. Панченко Алексей Николаевич – член совета                           | д.ф.-м.н. | 05.27.02 |
| 14. Пегель Игорь Валериевич – член совета                               | д.ф.-м.н. | 01.04.04 |
| 15. Ремпе Николай Гербертович – член совета                             | д.т.н.    | 05.27.02 |
| 16. Ростов Владислав Владимирович – член совета                         | д.ф.-м.н. | 01.04.04 |
| 17. Соснин Эдуард Анатольевич – член совета                             | д.ф.-м.н. | 05.27.02 |
| 18. Тарасенко Виктор Федотович – член совета                            | д.ф.-м.н. | 05.27.02 |
| 19. Чернов Иван Петрович – член совета                                  | д.ф.-м.н. | 01.04.04 |
| 20. Юшков Георгий Юрьевич – член совета                                 | д.т.н.    | 05.27.02 |

**Заседание вел председатель диссертационного совета доктор физико-математических наук, академик РАН Ратахин Николай Александрович.**

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение **присудить** Нефедцеву Е.В. учёную степень доктора физико-математических наук.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**  
**ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.031.01, СОЗДАННОГО НА**  
**БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО**  
**УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ "ИНСТИТУТ СИЛЬНОТОЧНОЙ**  
**ЭЛЕКТРОНИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ**  
**АКАДЕМИИ НАУК", ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ**  
**СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК**

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 08.09.2022 г. № 3

**О присуждении** Нефедцеву Евгению Валерьевичу, гражданину Российской Федерации, **ученой степени доктора** физико-математических наук.

**Диссертация** "Явления на катоде и в прикатодной плазме в начальных стадиях импульсного пробоя миллиметровых вакуумных промежутков" **по специальности** 01.04.04 – физическая электроника **принята к защите** 25 марта 2022, **протокол заседания № 2, диссертационным советом** Д 003.031.01, **созданным на базе** Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук" (ИСЭ СО РАН), 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3, Приказ № 105-нк от 11.04.2012 г.

**Соискатель** Нефедцев Евгений Валерьевич, 13.07.1960 года рождения, **диссертацию на соискание ученой степени кандидата** физико-математических наук "Деградационные процессы в кристаллах NaCl в сверхсильных электрических полях" **защитил в 1990 году в диссертационном совете, созданном на базе** Томского государственного университета (ныне Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»), **работает** старшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки "Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук" (ИСЭ СО РАН).

**Диссертация выполнена** в лаборатории вакуумной электроники



Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук" (ИСЭ СО РАН).

**Официальные оппоненты:**

Паперный Виктор Львович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение "Иркутский государственный университет", кафедра общей и космической физики, заведующий кафедрой;

Зуев Лев Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физики прочности, заведующий лабораторией;

Баренгольц Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт общей физики имени А. М. Прохорова Российской академии наук", лаборатория теоретической электрофизики, исполняющий обязанности заведующего лабораторией

**дали положительные отзывы на диссертацию.**

**Ведущая организация** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск **в своем положительном отзыве, подписанном** Ремневым Геннадием Ефимовичем, доктором технических наук, профессором, заведующим научно-производственной лабораторией "Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий", ведущим научным сотрудником Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов, **указала, что** диссертация Е.В. Нефедцева представляет собой логически законченную работу, содержащую новые результаты фундаментального и прикладного характера в области исследования инициирования и развития импульсного электрического вакуумного пробоя. Диссертация Е.В. Нефедцева соответствует установленным "Положением о присуждении ученых степеней" ВАК требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Нефедцев Евгений Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

**Соискатель имеет 75 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 35 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 14 работ.**

Личный вклад автора в публикации по теме диссертации составил оценочно 75%. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

**Наиболее значимые работы по теме диссертации:**

1. Нефедцев Е. В., Онищенко С. А., Батраков А. В. Места инициирования взрывоземиссионных процессов на поверхности монокристаллической и



крупнозернистой поликристаллической меди// Известия вузов. Физика.– 2019.– Т. 62, №7.– С. 31 – 38.

2. Nefyodtsev E.V., Onischenko S.A., Proskurovsky D.I. and Batrakov A.V. Observation of pre-breakdown emission sites and breakdowns of vacuum gaps under short-pulsed testing// IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation.– 2011.– V. 18, No. 3.– P. 929–936.

3. Nefyodtsev E.V. Features of spherical particle dynamics near a plane electrode of vacuum gap in an increasing electric field// IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.– 2014.– V. 21, No. 2.– P. 892–905.

4. Нефедцев Е. В., Батраков А. В. Численное моделирование устойчивого расширения плазмы взрывоэмиссионного центра в вакууме // ЖЭТФ.– 2015.– Т. 148.– № 4(10).– С. 806–818.

5. Нефедцев Е. В., Батраков А. В. Моделирование устойчивого расширения моноэлементной трехкомпонентной плазмы взрывоэмиссионного центра// ЖЭТФ.– 2017.– Т. 153, № 4.– С. 656–665.

6. Nefyodtsev E.V. and Ozur G. E. Field enhancement and ion flow focusing at the multiemitter cathode of a high-current plasma-filled diode// IEEE Trans. Plasma Sci.– 2009.– V. 37, No. 8.– P. 1367–1374.

**На диссертацию и автореферат** поступили **6 отзывов**, все отзывы положительные:

**1. Отзыв на автореферат** главного научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, члена-корреспондента РАН, доктора физико-математических наук Зубарева Николая Михайловича  
Отзыв положительный, имеются замечания:

По тексту автореферата возникло несколько формальных замечаний, которые не влияют на общую положительную оценку работы. Достаточно небрежно описываются результаты главы 6.

"1. Так, например, уравнение (2) не учитывает влияние гравитации. При этом гравитация появляется после формулы (5) как результат анализа (2).

2. Далее, не понятно, как может реализовываться предел  $z \rightarrow 0$  (стр. 22, строка 3): как я понял, значение величины  $z$  ограничено снизу радиусом частицы  $R$ , а нулевое значение возникнет, только если ее расплющить в блин.

3. По тексту сложно понять, в чем разница между величинами  $E_L$  и  $E_{AD}$ . Первое "напряженность поля отрыва частицы", второе - "напряженность поля", которым "частица была оторвана от электрода".

4. На рисунке 14 имеется целый ряд обозначений ( $\mu$ ,  $\mu_0$ ,  $\psi$ ), не расшифрованных в тексте."

**2. Отзыв на автореферат** заведующего кафедрой естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», доктора физико-математических наук, Громова Виктора Евгеньевича и доцента этой же кафедры, кандидата технических наук, Невского Сергея Андреевича.

Отзыв положительный, имеются замечания:



"1. Из автореферата не понятна возможная роль электропластических эффектов (указано во множественном числе!) в вакуумном пробое. По-видимому, здесь используется несколько вольная и широкая трактовка термина "электропластический эффект", который для металлов означает эффект изменения предела текучести при пропускании импульсных токов высокой плотности.

2. Указывая на важную роль дислокаций в развитии вакуумного пробоя, автор во многих местах избегает использования слова "дислокация", часто заменяя его более широким понятием "линейный дефект".

3. Моделирование токонесущей плазмы проведено исключительно для миллиметрового вакуумного промежутка. Отсутствует информация о возможностях применения многожидкостной модели плазмы для больших масштабов, например, для моделирования плазменных струй в установках электровзрывного легирования."

**3. Отзыв на автореферат** старшего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, доцента, кандидата физико-математических наук Уйманова Игоря Владимировича.

Отзыв положительный, имеются замечания:

Автореферат оставляет хорошее впечатление, написан достаточно подробно, четко структурирован, небольшое количество неточностей редакторского характера не мешает восприятию материала.

"Основное замечание к автореферату заключается в отсутствии даже беглого перечисления основных численных методов, которые использовались при решении систем уравнений (6)–(9) в одномерном сферическом и двумерном осесимметричном случаях (глава 7). Ситуация аналогична и для системы уравнений (10)–(12) главы 8.

Непосредственно по работе наибольшее количество вопросов возникло к экспериментальному исследованию морфологических изменений поверхности электродов в безискровом режиме (глава 5):

1. Из текста автореферата не удастся понять, происходит ли вообще какое-то плазмообразование в этом режиме? Можно ли назвать его беспробойным?

2. Происходит ли рост новообразования при последующих воздействиях, т.е. зависит ли размер новообразования в ширину и глубину от количества импульсов или возникают новообразования на других участках электрода?

3. Является ли этот эффект пороговым по отношению к напряженности макрополя, которое в эксперименте можно варьировать межэлектродным расстоянием, либо при меньших полях требуется большее количество импульсов?"

**4. Отзыв на автореферат** директора ООО "Импульсные технологии" (г. Рязань), кандидата технических наук Бочкова Виктора Дмитриевича.

Отзыв положительный, имеются замечания:



"К автору имеются вопросы, перемежающиеся с замечаниями.

1. Следуя современным концепциям в вопросе об инициировании вакуумного пробоя, автор предполагает, что одной из основных причин низкого уровня электрической прочности вакуумного промежутка является возникновение локальных пластических явлений, вызванных действием электрического поля. В таком случае, очевидным шагом к достижению предельно высоких электрических полей в вакуумном промежутке является создание слоя аморфного материала на поверхности электрода, в котором отсутствует атомный порядок и, соответственно, системы скольжения дислокаций. В автореферате об экспериментах с такими электродами не упоминается. Однако полагаю, такую работу можно запланировать при проведении дальнейших исследований с целью расширения данного направления.

2. Проведение электростатической и токовой тренировки электродов через вакуумный промежуток при использовании высокоомного катода можно считать оригинальным приемом выявления и удаления микровключений в приповерхностном слое. С другой стороны, такая тренировка – это возможность затормозить предпробойные явления в металле на различных этапах развития и исследовать их динамику «покадрово», более детально, например, с помощью электронного микроскопа. Однако в автореферате лишь констатируется малое влияние токовой тренировки уровня  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  А на импульсную электрическую прочность вакуумных промежутков. А что мешает усилить эффект путем повышения силы тренировочного тока до уровня  $10^{-3}$  А и выше?"

**5. Отзыв на автореферат** старшего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, кандидата физико-математических наук Шмелева Дмитрия Леонидовича.

Отзыв положительный, имеются замечания:

"1) На стр. 14 сказано, что вакуумный пробой иницируется "в месте пересечения пучком силовых линий поверхности катода". Это очень неудачная формулировка, под это определение подходит вся поверхность катода.

2) На стр. 18 про различные следы эрозии сказано следующее: одни типы кратеров "преимущественно совпадают с местами маркеров", другие типы кратеров субмикронных размеров "не совпадают с исходными положениями предварительно выявленных выходов линейных дефектов". Здесь нужны количественные оценки среднего расстояния между центрами кратеров и маркерами с соответствующей статистической обработкой. Без этого статистическая достоверность одного из основных результатов диссертации выглядит несколько легковесной.

3) Главы 7 и 8 диссертации посвящены численному моделированию разлета плазмы и коротко-импульсного пробоя соответственно. Автор, видимо (явно это в тексте не сказано), использовал для расчетов



самостоятельно написанные компьютерные программы. Однако, ни в реферате, ни в тексте диссертации не сказано ни слова об использованных при этом численных методах и схемах. Это существенный недостаток диссертации.

4) В главе 7 много внимания уделяется тонким деталям решения вблизи внешней границы плазменного факела. При этом нужно было упомянуть, что в этой области гидродинамическое приближение находится особенно далеко за границами физически обоснованного применения. Тонкие детали решения - лишь любопытное свойство данной математической модели. Похожее замечание относится и к расчету второго этапа развития неустойчивости (п. 7.3.7). В рамках гидродинамической модели с приемлемой достоверностью можно определить место возникновения неустойчивости в начальный момент ее развития. Это то, что в диссертации называется первым этапом развития неустойчивости, дальнейшие расчеты в рамках данной модели физического смысла не имеют."

**6. Отзыв на автореферат** главного научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН", доктора физико-математических наук Аржанникова Андрея Васильевича.

Отзыв положительный, замечаний нет.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается** их компетентностью, достижениями в теоретических и экспериментальных исследованиях в областях физической электроники, вакуумного пробоя, электропластических явлений, взрывной эмиссии, физики плазмы, наличием публикаций в областях науки, непосредственно связанных с диссертацией, способностью определить научную и практическую ценность диссертации в целом и отдельных ее разделов, а также дать рекомендации по использованию полученных в диссертации результатов.

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

**разработан** комплекс экспериментальных методик, позволивший экспериментально подтвердить современную научную концепцию инициирования вакуумного пробоя линейными дефектами кристаллической структуры электродов, в том числе, генерируемыми под воздействием электрического поля;

**предложены** научные гипотезы о механизмах инициирования вакуумного пробоя при изначальном отсутствии на электродах явно выраженных концентраторов электрического поля и связанных с ними центров предпробойной электронной эмиссии, что соответствует нетрадиционному подходу к объяснению нарушения вакуумной изоляции вследствие пластических деформаций на электродах, активируемых сильным электрическим полем;

**доказана** перспективность использования новых идей о предельных



возможностях вакуумной изоляции и поиска новых подходов в практике повышения эксплуатационных характеристик электрофизических устройств; **введены понятия** "импульсная эмиссионная активность" и "импульсная эмиссионная карта", связанные с разработанной методикой одновременного фиксирования множества эмиссионных центров различного уровня интенсивности в условиях импульсного перенапряжения.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**  
**доказана** возможность возвращения сферической проводящей частицы на электрод после преодоления ею сил адгезии под действием нарастающего электрического поля и определен оценочный критерий возвратного движения, зависимый от параметров частицы и поля, что вносит вклад в расширение представлений о природе инициирования частицами пробоя вакуумных и промежутков;

**применительно к проблематике диссертации результативно, с получением обладающих новизной результатов**

**использована** базовая неупрощенная модель многожидкостной гидродинамики, позволившая провести детальный численный расчет характеристик плазменного облака взрывоэмиссионного центра, расширяющегося в миллиметровый вакуумный промежуток в искровой стадии вакуумного пробоя;

**изложены** подтвержденные численными расчетами и результатами модельных экспериментов аргументы в пользу совместного вклада двух значимых факторов в процесс инициирования короткоимпульсного пробоя катодного ионного слоя в плазмонаполненных источниках низкоэнергетических сильноточных электронных пучков, а именно, всплесками величин прикатодной напряженности электрического поля амплитудой свыше 1 МВ/см и плотности ионного тока амплитудой свыше 1 А/см<sup>2</sup>;

**раскрыта** возможность спонтанного зарождения неустойчивости в расширяющемся плазменном облаке взрывоэмиссионного центра, что не соответствует распространенному мнению о возникновении такого рода неустойчивости лишь за счет изменения внешних условий, в частности, за счет ограничения и/или нестационарности поставки материала катода в плазменное облако;

**изучена** связь времени и места зарождения неустойчивости с моментом появления на некотором участке взрывоэмиссионной плазмы области преобладания силы электрического поля над остальными силами, действующими на ионы;

**проведена модернизация** математической модели плазмы, связанная с поправкой, которая уточняет выражение для эффективной частоты кулоновских столкновений между заряженными частицами и которая расширяет возможности применения модели к описанию ансамблей заряженных частиц.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для**



**практики подтверждается тем, что:**

**разработаны и внедрены** методика электрохимического выявления скрытых дефектов и локальных изменений материала электродов для применения в исследованиях инициирования и развития вакуумного пробоя; методика фиксации полной предпробойной эмиссионной картины катода в условиях импульсного перенапряжения, совмещенная с определением места последующего пробоя;

**определены** пределы импульсной электрической прочности миллиметровых плоских вакуумных промежутков, зависимые от состава и состояния материала электродов, что привносит уточнения в выбор материалов электродов и их покрытий для снижения массогабаритных характеристик и повышения надежности высоковольтных электрофизических установок и приборов;

**создана** система практических рекомендаций, позволяющих оценить критические условия пробоя вакуумных промежутков, иницированного микрочастицами при воздействии переменного или импульсного напряжения.

**представлены** рекомендации:

- 1) по внедрению новых принципов электростатического сепарирования частиц по размерам и/или массе и использования микрочастиц в микро- и наномеханике, основанные на переходе от возвратного движения частиц, стартующих с электрода к их безвозвратному движению при варьировании параметрами изменяющегося во времени внешнего электрического поля;
- 2) по управлению процессом инициирования пробоя на поверхности взрывоэмиссионного катода с помощью внедрения в тело катода постоянных магнитов малых размеров.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ** продемонстрирована воспроизводимость результатов измерений, которые проводились на сертифицированном оборудовании;

**теория** построена на основе классических законов и широко известных математических моделей с использованием интерполяционных и предельных выражений полученных с применением известных приемов и теорем; результаты согласуются с известными теоретическими и экспериментальными данными;

**идеи базируются** на анализе и обобщении передового опыта применения численных методов моделирования физических процессов;

**использованы** сравнения данных, полученных автором диссертации с данными более ранних исследований со ссылками на эти исследования;

**установлено** качественное согласие результатов диссертационной работы с результатами, представленными в независимых источниках по данным тематикам;

**использованы** современные методики математической обработки больших массивов осциллограмм и выходных данных численных экспериментов;



**Личный вклад соискателя состоит** в его основной роли в определении цели работы, в постановке задач исследований и выборе методов их решения, в подготовке и проведении экспериментов, в обработке экспериментальных результатов, в осуществлении теоретических исследований, в опубликовании результатов исследований.

**В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания**, отраженные в отзывах, замечаниях оппонентов и общей дискуссии.

**Соискатель Нефедцев Е.В. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и замечания и привел собственную аргументацию**, что отражено в стенограмме.

На заседании **8 сентября 2022 года** диссертационный совет принял решение:

**за разработку теоретических положений и получение новых экспериментальных результатов, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, присудить Нефедцеву Е. В. ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.**

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 20 человек, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель

диссертационного совета

д.ф.-м.н., академик РАН

Ратахин Николай Александрович

Ученый секретарь

диссертационного совета,

д.т.н.



Озур Григорий Евгеньевич

8 сентября 2022 года.