

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Нефёдцева Евгения Валерьевича на тему

### **«ЯВЛЕНИЯ НА КАТОДЕ И В ПРИКАТОДНОЙ ПЛАЗМЕ В НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ ИМПУЛЬСНОГО ПРОБОЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВАКУУМНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ»,**

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника

**Актуальность темы.** Исследования процессов, связанных с электрическим пробоем вакуумных промежутков проводятся в течение нескольких десятилетий. Это обусловлено, как сложным многофакторным характером данных процессов, протекающих в веществе, находящемся в различных фазовых состояниях, в широком временном диапазоне и на различных пространственных масштабах, так и большим прикладным значением подобных работ. Последнее обусловлено широким и все возрастающим объемом использования высоковольтных вакуумных систем (разрядников, ускорительных устройств, технологических установок и др.) в различных областях промышленности. Несмотря на огромный объем накопленных экспериментальных данных и многочисленные теоретические исследования, целый ряд существенных обстоятельств, ограничивающих электрическую прочность вакуумных промежутков, остается невыясненным. В первую очередь, это относится к возможности повышения электрической прочности путем воздействия не только на поверхность электрода, следуя традиционным подходам, но и на саму структуру приповерхностного слоя материала электрода. При этом отметим, что фиксация первичных предпробойных изменений этой структуры при наличии исходно чистой и гладкой поверхности материала электродов, представляет собой непростую задачу, поскольку эти изменения скрыты и скоротечны, а в ходе развития пробоя следы этих изменений уничтожаются искровыми процессами.

Еще одной важной проблемой, не имеющей до сих пор обоснованного решения, является самосогласованное описание поведения микрочастиц в сильном электрическом поле вблизи электрода, что также оказывает существенное влияние на изоляционные свойства вакуумного промежутка. Наконец, учитывая, что существующие в настоящее время модели катодного плазменного факела, формируемого в результате электрического пробоя, содержат ряд существенных ограничений (квазинейтральность плазмы, стационарность процесса расширения факела в вакуумный промежуток и

др.), создание более полной модели, свободной от этих ограничений, является весьма привлекательной задачей.

Учитывая вышеизложенное, тематика диссертации, связанная с решением указанных проблем, представляется **весьма актуальной**.

Диссертационная работа состоит из Введения, обзора литературы (Глава 1), двух больших разделов (Главы 2 – 6 и Главы 7,8, соответственно), Заключения и списка литературы..

Во **Введении** автором обосновывается актуальность данной тематики, кратко рассматриваются основные достижения в этой области, формулируются основные цели и задачи работы, определена научная новизна полученных в работе результатов, указана их научная и практическая значимость, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** приведен исторический обзор исследований пробойных явлений в вакуумных промежутках. Этот обстоятельный обзор дает весьма полную картину развития и современного состояния исследований по данной тематике и представляет самостоятельный интерес. Важным результатом анализа ранее выполненных работ является вывод о недостаточности совокупности полученных знаний, касающихся явлений, инициируемых импульсной пробой вакуумного промежутка с электродами, обладающими чистой и гладкой поверхностью. Это и определило важность и актуальность одного из направлений исследований в данной диссертации.

Первый раздел диссертации посвящен исследованиям процессов, ограничивающих импульсную электрическую прочность вакуумных промежутков. **Глава 2** посвящена описанию экспериментального оборудования для модификации поверхностного слоя электрода и исследований различных режимов импульсного вакуумного пробоя. В **Главе 3** представлены результаты изучения влияния материала электрода и различных способов его обработки, в т.ч. методом импульсного плавления и безыскровой тренировки, на импульсную электрическую прочность вакуумного промежутка. Исследования проведены для широкого набора материалов катода, отличающихся типом кристаллической структуры, микротвердостью и работой выхода.

В **главе 4** описаны экспериментальные исследования предпробойной короткоимпульсной электронной эмиссии в вакуумном промежутке, полученные на основе применения оригинальной методики регистрации эмиссионных карт. Исследования выполнены для различных материалов катода (титан, нержавеющая сталь). Выполненные в этой главе измерения предпробойных электронных токов потребовали разработки оригинальной

методики регистрации на уровне единиц микроампер с наносекундным временным разрешением.

Детальные исследования морфологических и скрытых изменений на катоде при воздействии импульсов напряжения проведены в **Главе 5**. Здесь автором рассмотрены особенности инициирования вакуумной искры на участках катода, лишенных микроскопических неоднородностей на поверхности, и предложены различные механизмы пробоя вакуумных промежутков с электродами, не содержащими подобных неоднородностей. Роль свободных микроскопических частиц в инициации пробоя с учетом их движения в сильном нестационарном электрическом поле межэлектродного промежутка рассмотрена в **Главе 6**.

Во втором разделе диссертации рассмотрены процессы, протекающие в результате развития пробоя в прикатодной плазме. **Глава 7** посвящена модельным расчетам процесса расширения плазмы эмиссионного центра в вакуумный промежуток. Автором решалась нестационарная задача о сферически-симметричном расширении в вакуум двухкомпонентной и трехкомпонентной (электроны и одно- и двухзарядные ионы) моноэлементной плазменной струи. Наконец, в **Главе 8** рассмотрены вопросы инициирования импульсного пробоя между катодом и внешним нестационарным плазменным слоем. Модельные расчеты пробоя плоского и многопроволочного катода на нестационарный ионный слой поддержаны соответствующими экспериментами.

В **заключении** кратко перечислены основные результаты диссертационной работы.

**Достоверность и обоснованность** научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием автором широкого набора современных методов экспериментального исследования, а также внутренней непротиворечивостью полученных результатов, которые хорошо согласуются с выводами работ, выполненных другими исследователями. Существенным обстоятельством также является удовлетворительное не только качественное, но и количественное согласие результатов эксперимента с приведенными модельными расчетами.

Отметим **научную новизну и практическую значимость** наиболее существенных результатов, полученных автором диссертации.

- Автором предложены и экспериментально реализованы методы модификации приповерхностного слоя путем обработки сильноточными пучками низкоэнергичных электронов, что позволило существенно увеличить электрическую прочность вакуумных промежутков.

- В работе представлены убедительные доказательства ключевой роли так называемой "холодной" стадии импульсного вакуумного пробоя, связанной не с исходной предпробойной эмиссионной активностью, а со скоростными изменениями в структуре приповерхностных слоев материала электродов, приводящими к появлению эмиссии непосредственно перед пробоем. Это заключение **выводит исследования предпробойных явлений в вакуумных промежутках на качественно новый уровень**, открывая возможности дальнейшего повышения электрической прочности вакуумных промежутков путем воздействия не только на поверхностные, но и на объемные характеристики материала электрода.
- Очень интересным и даже несколько неожиданным выглядит заключение об отсутствии положительной корреляционной связи между импульсной электрической прочностью вакуумного промежутка и работой выхода электрона из материала катода, а также механической прочностью материала электродов (рис. 3.4).
- Расчеты процесса расширения в вакуумный промежуток катодного плазменного факела в рамках выполненные в гл.7 в рамках модели нестационарной многожидкостной гидродинамики показали, что ускорение ионной компоненты *в основном* определяется силой электрон-ионного трения диссипативной природы, которая лишь *дополняется* макрополевой электрической силой (концепция т.н. «горба потенциала»).
- Новым принципиальным результатом расчетов в рамках нестационарной модели представляется вывод о возможности и условиях зарождения неустойчивости в расширяющейся токонесущей плазме катодного факела, а также факт возникновения особенности на профиле потенциала, что свидетельствует о возможности формирования здесь двойного электрического слоя. Следует отметить, что проведенные автором результаты расчета процесса расширения в вакуум бестоковой плазменной струи выходят за рамки тематики диссертации и представляют несомненный интерес для физики лазерной плазмы.

Автором использовались весьма тонкие методы исследования приповерхностной структуры электрода в сильных электрических полях. При этом автор не только продемонстрировал свободное владение широким спектром экспериментальных методов исследования процессов, протекающих на- и вблизи поверхности твердого тела в сильных электрических полях, но и провел весьма красивые модельные расчеты параметров токонесущей расширяющейся плазмы взрывоэмиссионного

центра (катодного факела) в рамках нестационарной многожидкостной гидродинамики. Кроме того, в других разделах диссертации автором выполнены также достаточно серьезные модельные расчеты для описания различных явлений, наблюдаемых экспериментально, например, при изучении движения заряженной микрочастицы в электрическом поле (пп.6.2 – 6.5). Эти результаты характеризуют автора, и как специалиста широкого профиля в области физического эксперимента, и как квалифицированного теоретика.

Важным достоинством работы являются систематические исследования физических явлений, протекающих в начальной стадии пробоя «по обе стороны» поверхности электрода, т.е. с одной стороны, непосредственно в кристаллической матрице электрода, а с другой стороны – в плазменной струе, эмитированной с поверхности электрода в вакуумный промежуток вследствие развития пробоя. При этом автором проведен последовательный анализ совокупности физических процессов, приводящих к развитию пробоя, начиная от предпробойной стадии зарождения эмиссионных микротоков до стадии расширения в межэлектродный промежуток сформировавшейся катодной плазменной струи. Кроме того, автором проделан большой объем работ по созданию современных, порой оригинальных, методов обработки поверхности и модификации приповерхностного слоя материала электрода, а также исследования морфологических и структурных характеристик этих объектов.

Диссертационная работа не свободна от некоторых недостатков.

#### **Общие замечания.**

1. Прежде всего, следует отметить, что название диссертации выглядит как неоправданно сужающее область исследований, кроме того, остается неясным, чем обусловлен выбор именно данного (миллиметрового) масштаба исследуемых вакуумных промежутков.
2. Диссертация явно перегружена, как собственно экспериментальным материалом, так и, на мой взгляд, излишне детальным, с многочисленными отсылками к литературным источникам, обсуждением результатов. Это существенно затрудняет оценку уровня исследований. Автору следовало сосредоточиться на основных результатах, выделив их оригинальность, научное и практическое значение.

#### **Конкретные замечания**

3. При исследовании расширения в вакуум многокомпонентной по зарядовому составу катодной плазменной струи на с. 193 автор справедливо отмечает «Предметом дискуссий в литературе является (важный) вопрос о возможном разделении ионов различных зарядов по скоростям в

расширяющейся плазме». На основе модельных расчетов автором сформулирован вывод о выравнивании скоростей ионных компонент в токонесущей катодной плазменной струе. Однако при этом следовало все же проанализировать возможные причины наблюдаемого в ряде экспериментов существенного различия скоростей ионных компонент.

4. Из рис. 7. 7, где изображены силы, действующие на пробный ион расширяющейся в вакуумный промежуток плазменной струи, следует, что основной является ускоряющая сила электрон-ионного трения. В то же время, как известно, в рамках одножидкостных МГД моделей квазинейтральной плазмы динамика расширения плазмы определяется силой (электронного) давления. Автору следовало пояснить связь этих эффектов.

5. Результаты весьма обстоятельных расчетов, выполненных в главе 7, не подкреплены сопоставлением с данными эксперимента.

6. В п. 3.3 описано исследование влияния магнитного поля на электрическую прочность вакуумного промежутка. Остается непонятным смысл этих исследований, показавших существенное уменьшение электрической прочности промежутка при наложении магнитного поля разной ориентации.

7. Подобное замечание относится и к исследованиям влияния магнитного поля на характер пробоя катодного ионного слоя, описанным в п.8.4.2. В частности, требуют пояснений результаты экспериментов, приведенные на рис. 8.1 5. и 8.1 7.

Отмеченные замечания носят, в основном, характер рекомендаций и не снижают, в целом, высокой оценки диссертационной работы.

#### **Соответствие содержания диссертации указанной специальности**

В диссертационной работе представлены результаты исследований процессов, происходящих на поверхности электрода в процессе развития высоковольтного пробоя, а также в сформированной в результате пробоя взрывоэмиссионной плазменной струе. В соответствии с паспортом специальности такие работы относятся к специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

#### **Заключение**

Диссертационная работа Е.В. Нефёдзева выполнена на высоком научном уровне, является законченным исследованием, результаты работы представляют существенный вклад в развитие фундаментальных представлений и прикладных аспектов физики пробойных явлений. Научная ценность, практическая значимость, новизна и достоверность представленных в диссертации результатов несомненны. Совокупность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных автором

диссертации, является вполне обоснованной. Таким образом, диссертационная работа «Явления на катоде и в прикатодной плазме в начальных стадиях импульсного пробоя миллиметровых вакуумных промежутков», отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, изложенным в п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ, а ее автор Е.В. Нефёдцев заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Заведующий кафедрой общей и космической физики ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», доктор физико-математических наук, профессор Паперный Виктор Львович.

664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, д. 1

Телефон: 8- (3952)-521-254; e-mail: paperny@math.isu.runnet.ru

21.07.2022 года, г.Иркутск

 Паперный В.Л.

