

МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный
исследовательский ядерный
университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)»**

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409
Тел. (499) 324-87-66, факс (499) 324-21-11

28.03.2025 № 0157/1-529
<http://www.mephi.ru>

На № _____ от _____



«УТВЕРЖДАЮ»

Врио ректора Национального
исследовательского

ядерного университета «МИФИ»
доктор физ.-мат. наук, профессор

Нагорнов Олег Викторович

«28» марта 2025 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертацию Байдина Ивана Сергеевича

«Генерация высокочастотного радиоизлучения в начальной фазе
высоковольтного протяженного искрового разряда в воздухе»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Актуальность темы диссертационной работы

Радиоизлучение сверхвысокой частоты (СВЧ) высоковольтного атмосферного разряда в настоящее время широко изучается и вызывает значительный интерес. В таких разрядах возникают новые, ранее не описанные эффекты, такие как, например, генерация потоков электронов высоких энергий и реализуются новые механизмы пробоя и развития разряда, сопровождающиеся генерацией всплеск СВЧ излучения. Представляют значительный интерес результаты исследования спектральных и пространственных свойств СВЧ-излучения, которые дают возможность проанализировать свойства протяженных разрядов. Исследование процессов в атмосферном разряде, приводящих к генерации различных типов излучений (рентгеновское, СВЧ, нейтронное и др.), представляет большой интерес для фундаментальной и прикладной физики газового разряда. Особый интерес представляет генерация СВЧ излучения. Комплексное исследование этого явления позволит лучше понять процессы, протекающие на начальной стадии разряда, в первые наносекунды после подачи высокого напряжения на электроды. Разработка методов анализа этого излучения позволит создать, в частности, грозопеленгаторы нового типа, работающие в диапазоне от сотен МГц до десяти ГГц в отличие от современных образцов (10–60 кГц). Это позволит точнее определять области

грозовой активности, что имеет важное значение, например, в безопасности авиасообщений.

Структура и основное содержание диссертации

Структурно диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 92 страницы, включая 39 рисунков.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, описана научная новизна и практическая значимость работы, а также описаны применяемые методы, аргументируются достоверность и обоснованность результатов. Приведены положения, выносимые на защиту и список публикаций диссертанта, отражен его личный вклад и апробация полученных результатов.

В первой главе диссертации приведен краткий обзор научной литературы последних достижений и результатов экспериментальных и теоретических работ, направленных на изучение пробоя длинных атмосферных промежутков и механизмов генерации в них СВЧ излучения.

Во второй главе изложен подход и методика разработки сверхширокополосной антенны для лабораторных исследований параметров СВЧ излучения широкого частотного диапазона, генерируемого высоковольтным искровым разрядом. Продемонстрированные параметры антенны дают понять, что изготовленные экземпляры подходят для регистрации и исследования характеристик высокочастотного радиоизлучения, наблюдаемого на начальной стадии развития лабораторного искрового разряда. Экспериментально показано, что исследуемое высокочастотное излучение наблюдается до протекания основного тока разряда и приходится на ту стадию развития пробоя когда достигается максимум напряжения в разрядном промежутке. Обнаружено, что на различных стадиях развития пробоя газового промежутка, наблюдаемые вспышки СВЧ излучения имеют различные характеристики и, вероятно, различные методы генерации.

В третьей главе диссертации представлена техника и методика проводимых экспериментов. Описан генератор импульсного напряжения (ГИН), системы диагностики импульсного тока и напряжения. Отдельно описывается метод калибровки разработанного автором диагностического комплекса для пространственной локализации источников вспышек СВЧ излучения. В основе комплекса лежит система многоканальной регистрации СВЧ сигналов, с высокой точностью синхронизированных по времени с измерениями импульсного тока и напряжения. Обнаружено, что вспышки СВЧ излучения

атмосферного разряда с межэлектродным расстоянием порядка 1 м при максимальном приложенном напряжении 1 МВ и временем его нарастания 200 нс локализируются в различных областях разрядного промежутка на различных стадиях развития электрического пробоя. Приведены результаты локализации вспышек СВЧ излучения в мегавольтном атмосферном разряде. Впервые показано, что СВЧ излучение имеет стохастическую природу и локализуется в прикатанной области разрядного промежутка. Погрешность измерения пространственных параметров источников вспышек СВЧ излучения составляла не более 12 см, что для межэлектродных расстояний порядка 1 м достигнуто впервые.

В четвертой главе проведено исследование эволюции спектральных характеристик радиоизлучения на различных стадиях развития лабораторного искрового разряда. Для детального исследования частотно-временных характеристик СВЧ излучения использовались различные техники диагностики радиоизлучения в МГц и ГГц диапазонах частот наряду с быстрой съёмкой собственного свечения разряда на наносекундных масштабах времени. Демонстрируется, что радиоизлучение в разрядном промежутке наиболее вероятно связано с процессом столкновения стримерных корон противоположных направленностей. Обнаружена корреляция во времени особенностей генерации вспышек радиоизлучения различных частотных диапазонов. При этом показано, что максимальная интенсивность СВЧ излучения достигается на частотах 1-2.5 ГГц при наблюдаемой полосе частот до 6 ГГц, наблюдаемые вспышки СВЧ носят затухающий характер и длятся на временах от долей до нескольких наносекунд.

В Заключение кратко сформулированы основные выводы и результаты диссертации.

Научная новизна диссертационной работы

1. Вспышки СВЧ излучения, испускаемые натурными и лабораторными искровыми разрядами, наблюдались и ранее, но регистрировались узкополосными антеннами и за времена порядка единиц микросекунд. Автором впервые проведено исследование СВЧ излучения на предпробойной стадии развития разряда, длящееся от единиц до сотен наносекунд в различных условиях протекания искрового разряда.
2. Для калибровки системы локализации был использован нестандартный, но наглядный и практичный метод калибровки и исправления систематических ошибок локализации источника вспышек СВЧ излучения.
3. Впервые проведена локализация источника радиоизлучения, наблюдаемого в высоковольтном протяженном искровом разряде в воздухе, в полосе частот до 6 ГГц.

4. Впервые определены пространственные и временные характеристики источников СВЧ излучения искрового разряда в воздухе с точностями, реализованными в работе.

Практическая значимость

Практическая значимость диссертационной работы выражается в следующем:

1. Определение параметров СВЧ излучения протяженных атмосферных разрядов, позволяет использовать полученные данные для диагностики такого типа разрядов. Описанные методы анализа СВЧ сигналов могут быть использованы для создания новых методов защиты от грозových явлений.

2. Понимание процесса плазмообразования, приводящего к генерации вспышек СВЧ позволит в будущем учитывать эти эффекты в других мощных электрофизических устройствах и системах, востребованных во многих практических приложениях.

3. Регистрация и локализация источника высокочастотного радиоизлучения сверхширокополосными антеннами является новым и эффективным методом, дополняющим комплексную диагностику в связке с другими методами регистрации излучений газового разряда.

Достоверность основных результатов и выводов

Достоверность результатов, обоснованность научных положений и выводов обеспечивается высоким уровнем проводимых экспериментов, воспроизводимость результатов которых подтверждена обширной статистикой (серии из сотен разрядов). Полученные результаты соответствуют современным представлениям о пробое газовых промежутков и наблюдаемыми в процессе излучениями, а так же качественно и количественно согласуются с результатами, полученными другими методами на других системах диагностирования. Все результаты, приведенные в диссертации, опубликованы в научных журналах, прошли апробацию на различных международных и внутрироссийских конференциях.

Замечания по диссертации

К числу замечаний по диссертации можно отнести следующие:

1. Поскольку разряд обладает достаточно большой длиной (65 см), то он не является точечным источником радиоизлучения, поэтому в схеме на рис. 3.9 в главе 3 разные антенны, направленные в центр разрядного промежутка, будут измерять

излучение из разных частей электрического разряда с различной эффективностью. Оценивался ли этот эффект и какое влияние он оказывает на представленные результаты?

2. Из текста диссертации неясно, какая доля от запасённой энергии преобразуется в СВЧ излучение разряда. Какая энергетика изучаемых явлений?

3. На рисунке 3.16 в третьей главе, демонстрирующем расположение источников СВЧ вспышек в разрядном промежутке, некоторые из областей локализации явно находятся позади конического катода и не на его поверхности. Как объясняется такое местоположение областей генерации излучения и не ошибка ли это?

Приведенные замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы.

Общая оценка диссертации

Диссертация Байдина Ивана Сергеевича «Генерация высокочастотного радиоизлучения в начальной фазе высоковольтного протяженного искрового разряда в воздухе» является законченным научным исследованием. По тематике она соответствует заявленной специальности и удовлетворяет требованиям, изложенным в Положении о присуждении ученых степеней № 842, утвержденным Правительством Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики».

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и корректно представляет достигнутые результаты.

Доклад по материалам диссертации был сделан Байдиным Иваном Сергеевичем на научном семинаре кафедры электротехники НИЯУ МИФИ (протокол семинара №0011 от 20.03.2025). Отзыв на диссертацию И.С. Байдина обсужден и одобрен на научном семинаре кафедры электротехники НИЯУ МИФИ, протокол №0011 от 20.03.2025. Отзыв составлен заведующим кафедрой электротехники НИЯУ МИФИ Школьниковым Эдуардом Яковлевичем.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ);

115409, Россия, Москва,

Каширское шоссе, 31

+7 (495) 788 56 99, доб. 9388

Заведующий кафедрой электротехники

НИЯУ МИФИ,

доктор физико-математических наук,

профессор

EYShkolnikov@mephi.ru



Школьников Э. Я.

Заместитель директора института

общей профессиональной

подготовки, кандидат

физ.-мат. наук, доцент



Самарченко Д.А.

Председатель совета по аттестации и подготовке

научно-педагогических кадров НИЯУ МИФИ

доктор физ.-мат. наук, профессор



Кудряшов Н.А.

Список основных публикаций составителя отзыва Школьников Э.Я. по теме диссертации Байдина Ивана Сергеевича в рецензируемых научных изданиях за последние 3 года:

1. Stepanov D.S., Skripnik A.P., Shkolnikov E.Y. *et al.* Heating of Elements of the Discharge Node in a Vacuum Neutron Tube of a Portable Neutron Generator with an Increased Neutron Yield. *Phys. Atom. Nuclei* **87**, 1878–1883 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1063778824090412>

2. Stepanov D.S., Kozlovsky K.I., Skripnik A.P. *et al.* Portable Neutron Generator Based on Laser-Plasma Ion Diode with Magnetic Isolation. *Tech. Phys.* **69**, 1421–1426 (2024). <https://doi.org/10.1134/S106378422404042X>

3. Stepanov D.S., Kozlowski K.I., Skripnik A.P. *et al.* Magnetic insulation system for a laser-plasma ion diode of a portable neutron generator. *At Energy* **134**, 346–351 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10512-024-01064-0>

4. Grabovskij E.V., Gribov A.N., Krylov M.K. *et al.* Dynamics of the Current Sheath in a Self-Compressible Plasma Discharge with an Additional Gas Injection. *Phys. Atom. Nuclei* **86**, 1688–1701 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063778823070062>

5. Магнитная система лазерно-плазменного ионного диода с магнитной изоляцией портативного генератора нейтронов // Атомная энергия, 2023г. Т. 134, Выпуск 5-6 Стр. 255-259

6. Скрипник А. П., Степанов Д. С., Козловский К. И. & Школьников Э. Я. (2024). Физические процессы в портативном генераторе нейтронов с лазерным источником плазмы. *Ядерная физика и инжиниринг*, 14(3), 258-263. DOI: 10.56304/S2079562922050499

7. Портативный нейтронный генератор на лазерно-плазменном ионном диоде с магнитной изоляцией // Журнал технической физики, 2023г. Т. 93, Вып. 6 Стр. 817-822 DOI: 10.21883/JTF.2023.06.55607.22-23

8. Горбунов, М. А., Ильинский, А. В., Плешакова, Р. П., Цейтлин, В. Г., Шиканов, А. Е., Школьников, Э. Я., & Яковлев, О. В. (2024).

О статистическом анализе формирования вторичных радиационных полей в устройствах дистанционного контроля на базе импульсных нейтронных генераторов. *Ядерная физика и инжиниринг*, 13(3), 290-294.

DOI: 10.56304/S2079562922010146

9. Modeling of the Dynamics of Plasma Flows and Neutron Generation in a Portable Generator with a Laser-Plasma Ion Diode // Atomic Energy, 2022, DOI: 10.1007/s10512-023-00971-y

10. Physical Processes in a Portable Neutron Generator with a Laser Plasma Source // Physics of Atomic Nuclei, 2022 Vol. 85, No. 10, pp. 1710-1714, DOI: 10.1134/S1063778822100593

11. Effect of Electron-Cyclotron Resonance Conditions in a Microwave Discharge of an Ion Source on the Extracted Current // High Temperature, 2022 Vol. 60, No. 2, pp. 159-164 DOI: 10.1134/S0018151X22020079

12. Влияние условий электронно-циклотронного резонанса в свч-разряде ионного источника на извлекаемый ток // Теплофизика высоких температур, 2022г. Т. 60, Вып. 2 Стр. 184-190.

13. DYNAMICS OF THE CURRENT SHELL IN A SELF-COMPRESSIBLE PLASMA DISCHARGE WITH ADDITIONAL GAS INJECTION // Problems of Atomic Science and Technology, Series Thermonuclear Fusion, 2022 Vol. 45, No. 1, pp. 119-134