

**УТВЕРЖДАЮ**

Первый заместитель директора по науке НИИ «Курчатовский институт», д.ф.м.н.

Ю.А. Дьякова

«29» февраля 2024

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"» на диссертационную работу Родионова Андрея Александровича «Жесткое рентгеновское излучение в мегавольтном атмосферном разряде», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. – Оптика

Диссертационная работа Родионова Андрея Александровича «Жесткое рентгеновское излучение в мегавольтном атмосферном разряде» посвящена экспериментальному исследованию энергетических, временных и пространственных характеристик рентгеновского излучения мегавольтного атмосферного разряда.

В настоящее время во многих научных центрах активно исследуются процессы генерации рентгеновского излучения в различных типах газовых и вакуумных разрядов. Эти исследования имеют высокую значимость как с точки зрения фундаментальных исследований, так и для ряда практических приложений. В частности, весьма актуальной задачей является поиск новых способов генерации рентгеновского излучения в газовых разрядах и создание источников рентгеновского излучения с оптимальными параметрами.

Фундаментальное значение проведенных исследований связано с тем, что в настоящее время механизмы генерации рентгеновского излучения протяженных разрядов не до конца ясны. Одновременно с этим, исследование рентгеновского излучения является эффективным методом диагностики газоразрядных процессов, на основе которого возможно определение различных параметров плазмы газового разряда.

Исследования механизмов протяженных разрядов, в частности, - разрядов в атмосфере, также являются в настоящий момент весьма

актуальными в связи с тем, что на сегодняшний день не существует законченной и экспериментально подтвержденной теории, описывающей процессы, происходящие в натуральных молниях. В частности, неизвестен механизм такого интересного явления, как формирование ступенчатого лидера. Также в настоящее время активно изучается роль убегающих электронов в инициировании протяженных разрядов, в частности молнии. Моделирование атмосферных разрядов на лабораторных установках с межэлектродным расстоянием порядка 1 м позволяет изучить свойства протяженных разрядов, которых нет у разрядов с малым (порядка  $\sim 1$  см и менее) межэлектродным расстоянием.

Основными параметрами рентгеновского излучения, испускаемого в ходе газового разряда, являются энергия его квантов, параметры его направленности (угловой анизотропии), а также распределение интенсивности его излучения по координате вдоль оси разряда и во времени. В работе А. А. Родионова впервые проведено комплексное исследование всей совокупности перечисленных параметров рентгеновского излучения атмосферного разряда при длине разрядного промежутка  $\sim 1$  м. Для этого им был разработан и создан ряд уникальных диагностик, использующих оригинальные методики измерений. Уникальность созданных систем состоит в том, что они обладают высоким временным разрешением ( $\sim 3$  нс), пространственным разрешением на уровне  $\sim 12$  см, и угловым разрешением  $\sim 10^\circ$ , а также эффективной защитой регистрирующей аппаратуры от мощных электромагнитных помех.

Несомненно, тема представленной диссертации актуальна для оптики рентгеновского излучения и физики газового разряда.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, Заключение и одного приложения. Список литературы содержит 50 наименования. Общий объем диссертации составляет 143 страницы, включая 58 рисунков, 1 таблицу и 1 приложение.

Во **введении** сформулированы актуальность, цель работы, задачи и методы исследований, научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, достоверность и обоснованность результатов, представлена информация о публикациях по теме диссертации и апробации работы.

**Первая глава** диссертации посвящена описанию современного состояния исследований процессов пробоя различных газовых промежутков: таунсендовскому, стримерному, пробоем на убегающих электронах и пробоем в наносекундном диффузно-канальном режиме. Представлен обзор результатов современных работ по исследованию физических механизмов



пробоя длинных (десятки см и более) атмосферных промежутков. Приведены результаты исследований рентгеновского излучения в таких разрядах, а также связи его параметров с электрофизическими характеристиками разряда. В заключении к главе сформулирована цель работы и поставлены решаемые задачи.

**Вторая глава** посвящена описанию экспериментальной техники и методики экспериментов, использовавшихся при выполнении диссертационной работы. Дано подробное описание генератора импульсного напряжения – установки ЭРГ (Электронный релятивистский генератор), а также уникальных диагностических систем, разработанных и сконструированных автором.

**Третья глава** посвящена описанию исследований угловой анизотропии рентгеновского излучения изучаемого разряда. Описана оригинальная измерительная система на основе 10 сцинтилляционных датчиков, расположенных по дуге окружности, обладающая угловым разрешением  $\sim 10^\circ$  и временным разрешением  $\sim 3$  нс. Автором впервые обнаружено, что рентгеновское излучение исследуемого атмосферного разряда анизотропно. В ходе измерений обнаружено, что индикатрисы рентгеновского излучения обладают многолепестковой диаграммой направленности. Наблюдается рентгеновское излучение двух типов: с широким ( $40^\circ - 150^\circ$ ) и узким ( $\sim 10^\circ$ ) угловым раствором. В каждом отдельном импульсе рентгеновского излучения могут наблюдаться узкие индикатрисы, широкие индикатрисы, а также может регистрироваться их наложение. Узкие диаграммы направленности соответствуют излучению с энергией более 300 кэВ, широкие – менее 300 кэВ. Отмечено, что наличие двух типов индикатрис свидетельствует о существовании двух различных источников рентгеновского излучения.

**Четвертая глава** посвящена исследованию параметров рентгеновского излучения в зависимости от положения его источника вдоль оси разряда. Применялись шесть сцинтилляционных детекторов, установленных в ряд перпендикулярно оси разряда, и помещенных в свинцовые трубы-коллиматоры. Оценки энергии квантов рентгеновского излучения выполнены методом фильтров ступенчатого ослабления в виде свинцовых крышек разных толщин, надеваемых на коллиматоры. Пространственное разрешение системы  $\sim 12$  см, временное  $\sim 3$  нс.

Установлено, что наиболее интенсивное излучение наблюдается из прианодной области. Одновременно с этим впервые обнаружено, что в разряде существует источник рентгеновского излучения, расположенный в области катода. Установлено, что интенсивность излучения из прикатодной



области ниже, чем из прианодной, но выше, чем из области межэлектродного промежутка. Продемонстрировано, что из прикатодной области излучаются главным образом кванты с энергией  $\sim 100$  кэВ, а вероятность испускания квантов меньшей энергии мала.

**Пятая глава** посвящена исследованиям временных параметров рентгеновского излучения, источником которого являются разные пространственные области изучаемого разряда. Впервые обнаружено, что излучение из прикатодной и прианодной области испускается в разные моменты времени. При этом излучение из прианодной области соответствует по своим признакам тормозному излучению, в то время как излучение из прикатодной области, судя по всему, имеет иную природу. Установлено, что из области катода излучение испускается через  $\sim 140$  нс после прекращения излучения из прианодной области. Установлено, что энергии квантов характеристических рентгеновских линий материала катода значительно ниже, чем зарегистрированные автором энергии квантов, излучаемые из прикатодной области. Следовательно, обнаруженное излучение из области катода не может быть связано с характеристическим излучением атомов катода. Приводится оценка разогрева поверхности катода, показывающая возможность участия термоэлектронной эмиссии в механизме обнаруженного излучения.

**В заключении** кратко сформулированы основные выводы диссертационной работы

**В приложении** описана техника и методика калибровки чувствительности сцинтилляционных детекторов.

В качестве основных результатов диссертационной работы выделим следующее:

1. Показано, что конфигурация электродов «обратно-конический катод с остриём – сетчатый анод» с межэлектродным расстоянием  $\sim 1$  м позволяет максимально стабилизировать параметры разряда, что дает возможность исследовать пространственные свойства излучения разряда с наибольшей точностью, а также соответствует генерации рентгеновского излучения наибольшей интенсивности.
2. Доработана и модернизирована экспериментальная установка и создан современный диагностический комплекс для исследования зависимости энергетических и временных параметров рентгеновского излучения атмосферного мегавольтного разряда от угла по отношению к оси разряда и пространственного расположения источника излучения с пространственным разрешением  $\sim 12$  см, угловым разрешением  $\sim 10^\circ$  и

временным разрешением  $\sim 3$  нс, стойкая к действию мощных электромагнитных помех.

3. Впервые измерены угловые (по отношению к оси разряда) зависимости интенсивности рентгеновского излучения мегавольтового атмосферного разряда. Установлено, что рентгеновское излучение обладает угловой анизотропией со стохастическим распределением интенсивности. В общем случае оно характеризуется многолепестковой диаграммой направленности, состоящей из излучения с узким ( $\Delta\theta \leq 10^\circ$ ) и широким ( $\Delta\theta > 40^\circ$ ) угловым раствором. Излучение с широкой диаграммой направленности характеризуется энергией квантов менее 300 кэВ, а узкой – более 300 кэВ.

4. Впервые измерено пространственное распределение интенсивности рентгеновского излучения вдоль оси разряда. Установлено, что наиболее интенсивное рентгеновское излучение испускается из прианодной области, когда приложенное напряжение достигает максимума. Интенсивность рентгеновского излучения из области газового промежутка в 5-8 раз меньше. Впервые обнаружено испускание рентгеновского излучения из прикатодной области, интенсивность которого превышает интенсивность излучения из газового промежутка.

5. Показано, что излучение из прикатодной области испускается на  $\sim 140$  нс позже, чем из анода и прианодной области. Установлено, что импульсы рентгеновского излучения совпадают с точностью  $\sim 10$  нс с экстремумами временной зависимости производной  $dU/dt$  по времени напряжения на разрядном промежутке. Появление импульсов рентгеновского излучения из прианодной области также совпадает по времени с формированием сверхвысокочастотных колебаний тока разряда. При этом временное разрешение диагностической аппаратуры не всегда позволяет определить одному или нескольким импульсам рентгеновского излучения соответствует экстремум на производной напряжения. В ряде случаев наблюдается несколько импульсов рентгеновского излучения на промежутке времени  $\sim 10$  нс.

6. Показано, что излучение из прианодной области обусловлено торможением электронов в газовом промежутке и материале анода. Энергетические характеристики излучения, определенные с помощью фильтров ступенчатого ослабления и по параметрам его угловой анизотропии, свидетельствуют о том, что оно вызвано убегающими электронами с максимальными энергиями не менее  $\sim 300$  кэВ.



Несмотря на общий высокий уровень диссертационной работы Родионова А. А., отметим следующие замечания, возникшие в ходе ознакомления с работой:

- 1) При измерении анизотропии рентгеновского излучения (Гл. 3) автором не были использованы трубы-коллиматоры для детекторов. В таком случае каждый детектор детектировал не только излучение, направленное по направлению, вдоль которого был расположен детектор, но также распространяющееся в иных направлениях. Как это влияет на полученные результаты – не обсуждается.
- 2) При анализе зависимостей интенсивности рентгеновского излучения от времени, испускаемого разными участками разряда (рис. 5.3 и рис. 5.4, с. 100-103), не обсуждается, почему кривые, полученные без свинцовых ослабителей (рис. 5.3) и с их использованием (рис. 5.4) существенно различаются.

Отмеченные замечания носят частный характер и не влияют на общую высокую положительную оценку работы и не снижают ценность полученных результатов.

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений и выводов обеспечиваются высоким уровнем проведенных экспериментов, воспроизводимость результатов которых подтверждена обширной статистикой (проведена серия из более тысячи разрядов) и согласованностью результатов измерений, проведенных разными методами. Результаты работы прошли серьёзную апробацию на российских и международных научных конференциях и опубликованы в высокорейтинговых рецензируемых журналах.

Результаты диссертации интересны для практических приложений, так как в ходе работы были разработаны и созданы новые измерительные системы с рекордными параметрами, стойкие к сильным электромагнитным помехам. Также, автором получены новые данные о рентгеновском излучении атмосферного мегавольтного разряда. Это позволит создать полезные приборы для диагностики атмосферного электричества на основе рентгеновского излучения. На основе впервые обнаруженного в работе источника рентгеновского излучения из области катода возможно создание источников рентгеновского излучения новых типов.

Результаты работы могут быть рекомендованы к использованию в научных организациях, занимающихся исследованиями и применениями импульсных высоковольтных разрядов и рентгеновского излучения: Институте сильноточной электроники СО РАН, Томском политехническом университете, Институте электрофизики УРО РАН, Объединенном институте



высоких температур РАН, Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Государственном научном центре Российской Федерации Троицком институте инновационных и термоядерных исследований, Российском федеральном ядерном центре Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики, Национальном исследовательском центре "Курчатовский институт", Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, Российском федеральном ядерном центре - Всероссийском научно-исследовательском институте технической физики и др.

Материал диссертации внятно изложен и наглядно проиллюстрирован. Полученные результаты опубликованы в 6 работах в отечественных и зарубежных научных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, и входящих в перечень ВАК РФ. Результаты работы неоднократно докладывались на ведущих международных и российских научных конференциях по тематике взаимодействия ионизирующего излучения с веществом и оптике рентгеновского излучения.

Содержание диссертационной работы Родионова А. А. «Жесткое рентгеновское излучение в мегавольтном атмосферном разряде» соответствует указанной специальности. Автореферат полно и правильно отражает основные результаты и выводы работы и соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Родионова Андрея Александровича «Жесткое рентгеновское излучение в мегавольтном атмосферном разряде» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Родионов Андрей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 - Оптика.

Доклад А.А. Родионова по материалам диссертации был представлен на заседании НТС Курчатовского комплекса ядерных транспортных энергетических технологий 27.02.2024 (Протокол № 2 от 27.02.2024). Отзыв на диссертацию подготовлен заместителем руководителя Отделения плазменных технологий Курчатовского комплекса ядерных транспортных энергетических технологий кандидатом физико-математических наук Казаковым Евгением Давидовичем и начальником лаборатории быстрых процессов Отдела Т-15 Отделения токамаков Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий, кандидатом физико-математических наук Краузом Вячеславом Ивановичем и утвержден на

заседании НТС Курчатовского комплекса ядерных транспортных энергетических технологий 27.02.2024 (Протокол № 2 от 27.02.2024).


**Отзыв составили**

Заместитель руководителя Отделения плазменных технологий  
Курчатовского комплекса ядерных транспортных  
энергетических технологий, к.ф.-м.н.

 Е.Д. Казаков


тел.: +7-499-196-79-78  
e-mail: Kazakov\_ED@nrcki.ru

Начальник лаборатории быстрых процессов  
Отдела Т-15 Отделения токамаков  
Курчатовского комплекса термоядерной  
энергетики и плазменных технологий, к.ф.-м.н.

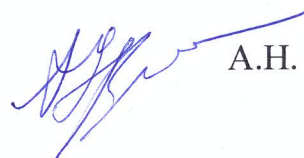
 В. И. Крауз

тел.: +7-499-196-76-22  
e-mail: Krauz\_VI@nrcki.ru

Заместитель председателя НТС Курчатовского  
комплекса ядерных транспортных  
энергетических технологий  
НИЦ «Курчатовский институт», к.т.н.

 В.С. Устинов

Заместитель руководителя – ученый секретарь  
Курчатовского комплекса ядерных транспортных  
энергетических технологий  
НИЦ «Курчатовский институт», к.т.н.

 А.Н. Волков

Подписи Волкова А.Н., Казакова Е.Д., Крауза В.И., Устинова В.С.  
подтверждаю

Главный ученый секретарь  
НИЦ «Курчатовский институт», к.ф.-м.н.

 К.Е. Борисов

Адрес: Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"»,  
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, дом 1



Список основных работ сотрудников ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"» по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет

1. Воронин Ф.Н., Казаков Е.Д., Косарев О.С., Марков М.Б., Тараканов И.А. Моделирование тока разряда конденсатора в потоке тормозного излучения ускорителя электронов. Математическое моделирование. 2021. Т. 33. № 12. С. 33-48.
2. Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Крутиков Д.И., Курило А.А., Орлов М.Ю., Стрижаков М.Г., Ткаченко С.И., Шашков А.Ю. Методы лазерной теневой фотографии с электронно-оптической регистрацией в хронографическом режиме для исследования динамики плазмы в диоде генератора РЭП. Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 8. С. 716-727.
3. Bobyr N.P., Kazakov E.D., Krutikov D.I., Kurilo A.A., Orlov M.Y., Spitsyn A.V., Strizhakov M.G. Study of properties of structural materials of powerful pulsed plasma facilities under extreme loads. Physics of Atomic Nuclei. 2021. V. 84. № 10. P. 1672-1675.
4. Крауз В.И., Виноградов В.П., Харрасов А.М., Мялтон В.В., Митрофанов К.Н., Бескин В.С., Виноградова Ю.В., Ильичев И.В. Влияние полоидального магнитного поля на параметры и динамику плазменного потока, генерируемого в плазмофокусном разряде, при лабораторном моделировании струйных выбросов молодых звездных объектов. Астрономический журнал. 2023. Т. 100. № 1. С. 19-31.
5. Крауз В.И., Митрофанов К.Н., Мялтон В.В., Ильичев И.В., Харрасов А.М., Виноградова Ю.В. Особенности радиального и аксиального распределений тороидального магнитного поля в осевом струйном выбросе на установке ПФ-3. Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 9. С. 829-855.
6. Krauz V.I., Mitrofanov K.N., Paduch M., Szymaszek A., Zielinska E., Tomaszewski K., Pariev V.I., Beskin V.S., Istomin Y.N. Properties of toroidal magnetic fields in axial plasma flow on the PF-1000U plasma focus facility. Journal of Plasma Physics. 2020. P. 905860607.
7. Белозеров О.С., Данько С.А., Ананьев С.С. Методика наблюдения за динамикой фокусировки электронного пучка в эксперименте по ускорению ионов на генераторе РЭП. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2020. Т. 43. № 2. С. 80-86.

8. Barykov I.A., Gritsuk A.N., Dan'ko S.A., Zaitsev V.I., Kartashov A.V., Meshchaninov S.A., Rodionov N.B., Terent'ev O.V. Dielectric detector of intense x-ray radiation fluxes. *Physics of Atomic Nuclei*. 2019. Т. 82. № 7. P. 1072-1075.
9. Долгачев Г.И., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Масленников Д.Д., Шведов А.А. Генератор сильноточного релятивистского электронного пучка РС-20МР на основе плазменного прерывателя тока и его применения. *Физика плазмы*. 2019. Т. 45. № 4. С. 303-312.
10. Садовничий Д.Н., Милёхин Ю.М., Калинин Ю.Г., Казаков Е.Д., Лавров Г.С., Шереметьев К.Ю. Особенности воздействия пучка релятивистских электронов на алюминизированные литьевые энергетические конденсированные системы. *Физика горения и взрыва*. 2022. Т. 58. № 2. С. 88-99.
11. Данько С.А., Белозеров О.С., Бакшаев Ю.Л., Хромов С.А. Регистрация сверхэнергичных электронов и ионов в сильноточном импульсном генераторе релятивистского электронного пучка. *Физика плазмы*. 2022. Т. 48. № 6. С. 499-505.