

### Отзыв

официального оппонента доктора физико-математических наук Василяка Леонида Михайловича 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.

Диссертация Родионова А. А. «Жесткое рентгеновское излучение в мегавольтном атмосферном разряде» посвящена изучению основных параметров (интенсивности, энергии квантов, диаграммы направленности и др.) рентгеновского излучения, испускаемого в процессе мегавольтного атмосферного разряда в лабораторных условиях с разрешением по времени, координате вдоль оси разряда и по угловому направлению, а также анализу полученных данных. Исследования электрических разрядов при длинах разрядного промежутка порядка одного метра в лабораторных условиях необходимы для понимания механизмов атмосферных молний и для развития теории газовых разрядов, в том числе для изучения новых механизмов пробоя, таких как пробой на убегающих электронах. Выявление механизмов генерации высокоэнергетичного излучения в лабораторных электрических разрядах в атмосфере, а также установление связи между этими механизмами и процессами инициирования и развития натурной молнии, представляет в настоящее время значительный интерес. Результаты таких исследований могут привести к созданию более совершенных источников рентгеновского излучения с более высокими параметрами. Интересен поиск новых, неизвестных ранее механизмов генерации рентгеновского излучения, так как в этом случае открывается возможность создания новых типов устройств генерации рентгеновского излучения. На основе установленных свойств рентгеновского излучения возможна разработка новых методов диагностики плазменных и газоразрядных процессов с убегающими электронами.

Тема диссертационной работы Родионова А. А. безусловно **актуальна**. Рентгеновское излучение мегавольтного атмосферного разряда в настоящее время широко изучается и вызывает значительный интерес. В таких разрядах возникают новые эффекты, такие как генерация потоков электронов высоких энергий и реализуются новые механизмы пробоя и развития разряда, сопровождающиеся генерацией рентгеновского излучения. Тем не менее, до работ Родионова А. А. анизотропные и пространственные свойства рентгеновского излучения не были исследованы, несмотря на то, что их знание необходимо для понимания физики протяженных разрядов.

Диссертация Родионова А. А. состоит из введения, пяти глав и заключения, а также списка литературы, содержащего 50 ссылок на литературные источники.

Общий объём диссертации - 143 страницы, включая 58 рисунков, 1 таблицу и 1 приложение.

**Во введении** обосновывается актуальность исследований, формулируются цель работы, задачи и методы исследований, научная новизна и практическая значимость работы. Приведены положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, аргументируются достоверность и обоснованность результатов, приведены сведения об апробации работы и публикациях.

**В первой главе** диссертации приведен аналитический обзор научной литературы по ключевым механизмам электрического пробоя в газовых средах, включая таунсендовский пробой, стримерный пробой, пробой на убегающих электронах, и наносекундный диффузно-канальный разряд. Освещены последние достижения в изучении пробоя длинных атмосферных промежутков и механизмов генерации в них рентгеновского излучения. В заключении к обзору литературы поставлены цель и задачи работы.

**Во второй главе** подробно изложена техника и методика экспериментов, выполненных в диссертации. Описан генератор импульсного напряжения, системы диагностики импульсов тока и напряжения и разработанный автором диагностический комплекс измерения распределения рентгеновского излучения на основе многоканальной системы сцинтилляционных детекторов, с высокой точностью синхронизированных по времени с измерениями тока и напряжения в разных точках разрядного промежутка. Описана геометрия разрядного промежутка и обоснован выбор геометрии электродов для получения стабильного разряда и рентгеновского излучения высокой интенсивности. Обнаружено, что рентгеновское излучение атмосферного разряда с межэлектродным расстоянием порядка 1 м при максимальном приложенном напряжении 1 МВ и временем его нарастания 200 нс обладает наибольшей интенсивностью в конфигурации электродов «обратно-конический катод с остриём – сетчатый анод».

**В третьей главе** приведены результаты исследований анизотропии рентгеновского излучения в мегавольтном атмосферном разряде, выполненных при помощи десяти сцинтилляционных детекторов, размещенных на дуге окружности. Точность измерения угловых параметров рентгеновского излучения составляла  $10^\circ$ . Автор впервые определил, что излучение имеет стохастическую природу и обладает угловой анизотропией с многолепестковыми диаграммами направленности. Впервые обнаружены два типа рентгеновского излучения: с узким ( $\sim 10^\circ$ ) и широким ( $40^\circ - 150^\circ$ ) угловым распределением, связанные соответственно с энергиями фотонов выше и ниже 300 кэВ.

**В четвертой главе** впервые проведено исследование распределения интенсивности рентгеновского излучения по координате его источника вдоль оси разряда с разрешением по времени и по энергии квантов излучения. Для этого автор разработал и создал многоканальную систему из шести

сцинтилляционных детекторов, вложенных в свинцовые трубы-коллиматоры. Пространственное разрешение системы составляло 12 см при длине разрядного промежутка 60,5 см. Была проанализирована значительная экспериментальная статистика – более 1200 разрядов. Автор впервые установил, что рентгеновское излучение испускается из всех участков разряда – как из прикатодной, так и из прианодной и межэлектродной областей. Установлено, что наиболее интенсивное излучение испускается в области анода в момент максимума приложенного напряжения, которое соответствуют тормозному излучению быстрых электронов в материале анода. Автором впервые обнаружено излучение из прикатодной области. Все это свидетельствует о высоком экспериментальном уровне диссертанта.

**В пятой главе** диссертации изложены результаты экспериментальных исследований временных характеристик рентгеновского излучения, генерируемого в разных зонах электрического разряда. Временное разрешение измерений было достаточно высоким и составляло 3 нс. Появление максимумов интенсивности рентгеновского излучения из прианодной области, возникающих одновременно со сверхвысокочастотными осцилляциями тока длительностью не более 1 нс, совпадает с экстремумами зависимости производной напряжения на разрядном промежутке от времени. Один экстремум зависимости производной напряжения от времени соответствует серии импульсов рентгеновского излучения. Автор обнаружил, что излучение из катодных и анодных областей происходит в разные моменты времени, излучение из катодной зоны возникает примерно через 140 нс после прекращения излучения из анодной зоны. В диссертации отмечается, что излучение из анодной зоны связано с тормозным излучением из анода, в то время как механизм возникновения тормозного излучения из катодной зоны остаётся неизвестным, представляя собой задачу для будущих исследований.

**В Заключение** приведены основные научные результаты и выводы.

**В Приложении** к диссертации подробно описана процедура калибровок системы сцинтилляционных детекторов.

Результаты диссертационной работы Родионова А. А. обладают существенной **научной новизной**. Ниже приведены наиболее значимые из них:

1. Разработана и создана экспериментальная установка для исследования рентгеновского излучения длинного (0,65 метра) импульсного разряда (амплитуда напряжения около 1 МВ) при атмосферном давлении с пространственным разрешением 12 см, угловым -  $10^\circ$  и временным - 3 нс и энергии квантов излучения в условиях сильных электромагнитных помех.

2. Обнаружены и изучены анизотропные свойства рентгеновского излучения мегавольтного атмосферного разряда. При этом выделено излучение двух типов: с узкой (менее  $10^\circ$ ) и широкой ( $40^\circ$ - $150^\circ$ ) диаграммой направленности.

3. Впервые изучено распределение интенсивности рентгеновского излучения по координате источника вдоль оси разряда. Установлено, что наиболее интенсивное рентгеновское излучение испускается из области анода в момент, когда приложенное к разрядному промежутку напряжение достигает максимума. Зарегистрированные характеристики излучения из прианодной области подтверждают его тормозную природу.

4. Обнаружено, что в начальный момент развития разряда при достижении амплитудного значения напряжения возникает рентгеновское излучение около анода и в промежутке, а затем с временной задержкой около 140 нс возникает еще одна область рентгеновского излучения с энергией квантов более 100 кэВ около катода. Интенсивность рентгеновского излучения этого источника превышает таковую из газового промежутка.

5. Обнаружено, что при спаде напряжения и росте разрядного тока при временах 1-2,5 мкс источник рентгеновского излучения с энергией квантов более 100 кэВ остается только около катода.

**Практическая значимость** результатов диссертации состоит в определении параметров рентгеновского излучения протяженных атмосферных разрядов. Это позволяет использовать полученные данные для диагностики такого типа разрядов. Обнаруженный новый источник рентгеновского излучения из прикатодной области может быть использован для создания источников рентгеновского излучения новых типов, востребованных во многих практических приложениях.

**Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, достоверны и обоснованы.** Экспериментальные данные были получены с использованием проверенных средств диагностики и современного сертифицированного научного оборудования, обеспечивающих высокую надежность и необходимую точность измерений. Измерительное оборудование, использованное в работе, в том числе системы сцинтилляционных детекторов, прошло все необходимые процедуры калибровок, основная часть которых подробно описана в Приложении к диссертации. Достоверность результатов анализа обеспечивается проверкой работы всех систем на ранее изученных системах, взаимной согласованностью экспериментальных данных, получаемых при помощи различных диагностических методик, их воспроизводимостью, а также согласованностью с имеющимися данными других авторов. В работе представлено большое количество экспериментальных данных, согласующихся с предлагаемыми моделями. Также достоверность научных положений и выводов подтверждена их обсуждением на научных отечественных и международных конференциях и публикациями в ведущих рецензируемых журналах, в том числе из первого квартала.

**По тексту диссертации есть замечания:**

1. Поскольку разряд обладает достаточно большой длиной (65 см), то он не является точечным источником рентгеновского излучения, поэтому в схеме измерения углового распределения на рис. 3.1 в главе 3 разные детекторы, расположенные по дуге окружности, будут измерять излучение из разных частей электрического разряда.

2. Из текста диссертации неясно, учитывается ли в главе 3 в разделе 3.2 в калибровочных расчетах вклад излучения с углами более  $90^\circ$ .

3. При измерениях параметров рентгеновского излучения с пространственным разрешением система сцинтилляционных детекторов, помещенных в свинцовые коллимационные трубы, регистрировала только излучение, направленное главным образом перпендикулярно оси разряда, и не регистрировала составляющую, излучаемую вдоль его оси. Это может влиять на точность определения координат источников и максимальных энергий излучаемых в разряде квантов рентгеновского излучения.

4. На угловое распределение рентгеновского излучения могут влиять изгибы канала разряда. Это вопрос в диссертации не обсуждается и не приведены фотографии канала разряда, хотя в главе 2 указано, что такие фотографии были сделаны.

Сделанные замечания не влияют на основные результаты и выводы диссертации и не снижают высокого научного уровня исследований.

Результаты, полученные автором, хорошо и подробно изложены и наглядно проиллюстрированы. Каждое положение диссертационной работы сопровождается подробным и исчерпывающим подтверждающим материалом. Полученные результаты опубликованы в 6 отечественных и зарубежных научных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ и базу данных Web of Science, в двух главах в коллективных монографиях и в 13 трудах конференций - результаты работы многократно докладывались на ведущих международных и российских научных конференциях по оптике, рентгеновскому излучению плазмы и физике газового разряда.

**Заключение**

На основании полученных диссертантом результатов, сделанных выводов и выдвинутых научных положений следует считать, что поставленная цель исследований успешно достигнута. Диссертационная работа Родионова Андрея Александровича выполнена на высоком научном уровне, в ней получены новые результаты, имеющие научную и практическую значимость. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Полученные результаты опубликованы в научных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ и базу данных Web of Science. Текст диссертации оформлен в соответствии с

требованиями ВАК. Автореферат правильно отражает основные результаты 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.

Отзыв составил:

Доктор физико-математических наук,  
Василяк Леонид Михайлович,  
профессор, главный научный сотрудник лаборатории № 2.3 - плазмы отдела № 2 - электрофизических и плазменных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

*Ваше*  
28 февраля 2024 г.

/Василяк Леонид Михайлович/

Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2. ОИВТ РАН  
тел: +7 (495) 484-18-10. e-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Подпись главного научного сотрудника ОИВТ РАН, д.ф.-м.н., профессора  
Василяка Леонида Михайловича заверяю:

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(ОИВТ РАН), д.ф.-м.н.



*[Signature]*  
/Киверин Алексей Дмитриевич/

Адрес: 125412 г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2. ОИВТ РАН  
тел: +7 (495) 485-90-09

