

Отзыв официального оппонента
доктора физико-математических наук, профессора Лозы Олега Тимофеевича
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. посвящена экспериментальному изучению пространственных, временных и энергетических параметров рентгеновского излучения лабораторного атмосферного разряда.

Актуальность диссертационной работы Родионова А. А. обусловлена широким распространением атмосферных газовых разрядов при значительных межэлектродных расстояниях – молний, существенным образом влияющих на работу самой разнообразной аппаратуры. В настоящее время механизмы протяженных атмосферных разрядов изучены недостаточно. Понимание процессов, происходящих в таких разрядах, позволит повысить электромагнитную совместимость устройств и, т.о., повысить безопасность человека в различных климатических условиях, что подчеркивает практическую значимость работы.

Поскольку контактные методы физики плазмы, напр., зонды Ленгмюра, совершенно неприменимы при изучении мегавольтных процессов, наиболее информативным методом исследования выглядит анализ плазменных процессов по излучению. Рентгеновское излучение выглядит наиболее привлекательным для диагностики, поскольку несет информацию об энергии частиц, достигающих сотен кэВ, включая распределения по пространству и времени. В связи с этим, используемый в диссертации метод экспериментального исследования мегавольтных разрядов по рентгеновскому излучению представляется вполне обоснованным и наиболее оптимальным.

Диссертационная работа Родионова А. А. включает в себя введение, пять глав, и заключение. Список литературы состоит из 50 ссылок. В конце работы имеется одно Приложение. Общий объём диссертации - 143 страницы, включая 58 рисунков, 1 таблицу и 1 приложение.

Во **введении** описаны актуальность, цель работы, задачи и методы исследований, научная новизна и практическая значимость работы. Формулируются положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, достоверность и обоснованность результатов, описана апробация работы, и перечисляется список публикаций автора.

В 1-й главе автор демонстрирует свое знакомство (по литературным источникам) с объектом исследования — механизмами высоковольтного разряда (пробоя) в атмосфере, а также с рентгеновским излучением из таких разрядов и связи его характеристик с параметрами разряда. Обзор литературы завершается конкретизацией цели и задач работы.

Во 2-й главе описана экспериментальная установка, создающая протяженный мегавольтный разряд в атмосфере, а также описаны методы диагностики, защищенные от мощных электромагнитных наводок. Дано описание созданного автором комплекса диагностики рентгеновского излучения - многоканальной системы детекторов, обладающей высокими угловым ($\sim 10^\circ$), временным (~ 3 нс) и пространственным (~ 12 см) разрешением на основе ФЭУ-30 с пластиковыми сцинтилляторами. Описана форма электродов разрядного промежутка, при которой, согласно результатам автора, рентгеновское излучение наиболее стабильно и интенсивно.

В 3-й главе описаны эксперименты по исследованию углового распределения рентгеновского излучения из атмосферного разряда. Исследования проводились с помощью 10 детекторов, расположенных по дуге окружности с шагом 10 градусов и направленных в центр этой окружности. Автор установил, что рентгеновское излучение мегавольтного атмосферного разряда 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.

В 4-й главе показаны пространственные распределения источников рентгеновского излучения вдоль оси разряда с использованием фильтров, позволяющих оценивать энергию квантов излучения. Все измерения рентгеновского излучения сделаны синхронно с измерениями различных электрофизических параметров разряда. Впервые обнаружен источник в прикатодной области разряда, интенсивность которого выше, чем у источников излучения в области между электродами. Наиболее интенсивное излучение испускается в области анода.

В 5-й главе описаны зависимости интенсивности рентгеновского излучения из разных областей разряда от времени. Впервые установлено, что жесткое, с энергией квантов свыше 100 кэВ, излучение из областей катода и анода испускается в разные моменты времени. Так, излучение из прикатодной области следует через ~ 140 нс после прекращения излучения из прианодной области.

В Заключение приведены основные результаты и выводы работы.

Приложение к диссертационной работе содержит подробное описание калибровочных процедур измерительной системы.

Результаты диссертационной работы Родионова А. А. обладают научной новизной. Впервые обнаружена угловая анизотропия рентгеновского излучения мегавольтного атмосферного разряда. Автором обнаружено излучение двух типов: с узкой ($\leq 10^\circ$) и широкой (40° - 150°) диаграммами направленности. Впервые исследовано распределение основных параметров рентгеновского излучения – интенсивности и энергии квантов – в зависимости от местоположения его источника вдоль оси разряда. Измерения выполнены с высоким временным разрешением и синхронизированы с измерением электрофизических параметров разряда. Впервые обнаружен новый источник рентгеновского излучения, расположенный в прикатодной области. Интенсивность рентгеновского излучения этого источника выше излучения из газового промежутка. Испускание излучения из области катода начинается на ~ 140 нс позже начала испускания излучения из области анода.

Достоверность и обоснованность результатов, научных положений и выводов диссертации обеспечена высокой тщательностью и аккуратностью автора при выполнении огромного числа (тысяч) экспериментов, обработке данных и анализе полученных результатов. Измерения были выполнены на современном сертифицированном научном оборудовании, которое прошло все необходимые процедуры калибровок. Были проанализированы результаты диагностики более чем тысячи высоковольтных разрядов, на основе которых автором сделан вывод, что полученные результаты устойчиво воспроизводятся.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 6 отечественных и зарубежных научных рецензируемых журналах, входящих в Перечень ВАК или индексированных МБД Web of Science, в двух главах в коллективных монографиях. Результаты работы многократно докладывались на ведущих международных и российских научных конференциях по оптике, физике плазмы и физике газового разряда и опубликованы в 13 сборниках трудов конференций.

Общий недостаток - англоязычные надписи на десятках рисунков, что не свидетельствует о следовании автора русскоязычного труда общепринятым нормам.

По описанию экспериментальной установки и методов диагностики электрофизических параметров возникает несколько вопросов. Во-первых, если жидкостный активный делитель (с.37) напряжения регулярно перед каждой серией выстрелов, калибруется по емкостному делителю, а

емкостной делитель, в свою очередь, после сборки калибруется по активному, то зачем вообще нужен активный делитель при работе? Почему не пользоваться всегда только емкостным, не теряя время на его калибровки, даже если его постоянная времени мала? Полвека тому назад при подобных измерениях в условиях сильных электромагнитных помех сигнал с амплитудой сотни вольт заводился в экранированное помещение и только там интегрировался (со значительным снижением амплитуды) RC-цепочкой. В наш цифровой век проинтегрировать сигнал не проблема, а необоснованно терять точность измерений на взаимных калибровках – неоправданная роскошь. На сопоставлении осциллограммы напряжения и ее производной (т.е. того самого сигнала с емкостного делителя) с сигналами ФЭУ основана значительная часть выводов диссертации.

Для измерения тока (с.38) на одном из двух поясов Роговского установлен шунт из 1 резистора, на другом -- из 10 последовательных резисторов. Зачем нужно было увеличивать индуктивность шунта, применяя 10 резисторов? Если для развития поверхности и предотвращения пробоя, то следовало бы это указать прямо, но тогда непонятно, как работал другой пояс Роговского с 1 резистором. Индуктивность резистора ТВО-0.25, составляющая доли нГн, имеет мало значения при микросекундных длительностях импульса. Но при наносекундной периодичности осцилляций тока, видимых на рис. 5.1 и 5.2, реактивный импеданс резистора становится сравнимым с его активным сопротивлением 1 Ом, и тогда амплитуда осцилляций на рис. 5.1 и 5.2 оказывается преувеличенной. А ведь именно эти осцилляции сравниваются по времени с появлением РИ.

На с.80 указано, что «все детекторы в виде сочлененных ФЭУ и сцинтилляторов для подавления сильной электромагнитной наводки были помещены в цельные корпуса из дюралюминия». Понятно, что корпуса не были цельными, т.к. поместить что-то в «цельный» корпус невозможно. Но поскольку в корпусе были отверстия для длинных соединительных проводов, то акцент при рассмотрении проблемы ЭМ наводок, если уж им уделяется такое большое внимание в работе, следовало бы переместить с «цельности» корпусов именно на них и на контакты их экранов с корпусами.

Вообще, если уровень сигналов с токовых и прочих датчиков от сотен вольт до кВ (с последующим ослаблением аттенюаторами) был обусловлен сравнимо высоким уровнем ЭМ помех от разряда, то, во-первых, следовало бы прямо указать амплитуду и частотный спектр этой помехи (напр., зарегистрированной с разомкнутого и короткозамкнутого кабеля), а во-вторых, пояснить, как при таком уровне помехи могли работать цифровые фотокамеры (с.41).

По методике проведения измерений РИ также есть замечания. В работе проведены исследования зависимости параметров РИ от угла и от координаты вдоль оси. Следовало бы четко указать, как и почему фиксировался один параметр при изменении другого. Напр., при описании измерений угловой зависимости в п. 3.3 (а также в п.3.4) не указано, на какую область вдоль оси были направлены датчики, на прикатодную, прианодную или на сам анод, и почему именно так. Судя по рис. 3.1 на с.49 можно предположить, что измеряемое ГИ исходит от металлического анода, как наиболее мощного источника, но это нигде не оговаривается прямо.

То же замечание следует отнести к измерениям РИ вдоль оси. На рис. 4.2, с.79, показано, что регистрация РИ проходила датчиками, установленными под прямым углом к оси диода. Если диаграмма излучения была существенно анизотропна, как это было показано в главе 3, то почему был выбран угол 90 градусов и только он один -- осталось без объяснений.

На с.81, рис.4.3 делается утверждение о том, что «наибольшее число импульсов РИ наблюдается в момент 90-350 нс, который соответствует достижению приложенным напряжением своего максимального значения, достигаемого в момент времени 160 - 200 нс. Далее напряжение на промежутке снижается, и интенсивность ионизирующего излучения падает.» Во-первых, число импульсов и интенсивность -- это далеко не одно и то же. Во-вторых, представленные положения максимумов РИ относящиеся к каждому детектору, находятся на одном уровне интенсивности, а уменьшается со временем частота их появления. Если излучение состоит из коротких импульсов одинаковой длительности, то их число в единицу времени действительно соответствует их средней интенсивности. Если же излучение периодическое с уменьшающейся частотой изменения, то средние интенсивности за большой промежуток времени не меняются. Можно легко представить растущую во времени зависимость интенсивность с уменьшающейся частотой появления локальных максимумов. Поскольку автор почему-то не показал полные временные зависимости интенсивности РИ (т.е. сигналы ФЭУ) ни для одного детектора, а привел только положения и амплитуды максимумов, то указанное выше утверждение не обосновано.

На с.83, рис 4.5. показана зависимость энергии излучения в "rel.un.", и делается утверждения о соотношении энергии излучения в разных областях: в 1.7 раз, которое потом становится защищаемым положением «Из прикатодной области излучение несколько интенсивнее, чем из межэлектродного промежутка...». Однако на графике отсутствуют маркеры погрешностей, поэтому даже осторожное утверждение «несколько интенсивнее» выглядит недоказанным.

На с.85 рис 4.6 показана зависимость «числа сцинтилляций» или «распределение числа сцинтилляционных отсчетов по их амплитудам», однако при отсутствии объяснения понятия «сцинтилляционный отсчет» понять ее невозможно. Положение могла бы исправить зависимость сигнала с ФЭУ от времени с указанием методики ее обработки, но таковые отсутствуют.

На с.87 рис.4.7. иллюстрирует зависимость максимальной энергии квантов РИ от координаты вдоль оси разряда. На графике никак не обозначены положения катода и анода, но из текста можно догадаться, что анод соответствует датчику на координате 23 см («...из области анода, и составляет ~ 300 кэВ ...»), а катод – на 76 см («Из области катода испускается излучение с энергией кванта до ~ 250 кэВ»). Т.о., диодный промежуток равен 53 см, что с точностью до интервала между измерителями соответствует информации на с.52 «Длина разрядного промежутка 0,6 м». Необъясненными остаются два источника излучения за пределами диодного промежутка, а именно, на координате 10 см, т.е. дальше анода, и на координате 96 см, т.е. ближе к ускорителю, чем катод. Полностью противоречит этому рисунку и фраза на последней строке с.88 о том, что «из области катода излучение обладает большей энергией кванта, чем из области анода.»

На с.96, рис.5.1 показано, что ток на анод имеет максимум 250-300 А, а полный обратный ток превышает 3 кА. При этом ниже на с.96 написано, что исследуются только разряды, в которых «основной токовый канал соединяет анод и катод и не замыкается на боковые стенки разрядного промежутка.» Но если так, то токи катод-анод и полный обратный должны быть близки по величине, что противоречит рис.5.1.

На с. 98, рис. 5.2 показано то же самое, но для отдельного разряда: полный ток на порядок превосходит ток на анод. Т.о., название «осевой разряд» в подписи к рисунку не соответствует наблюдаемым экспериментальным фактам, в соответствии с которыми только незначительная часть тока с катода доходит до анода. Но если так, то корректное сравнение интенсивностей РИ из областей катода и анода применительно к предполагаемым механизмам его генерации должно учитывать такую разницу протекающих там токов – на порядок.

На с.100 рис. 5.3 показаны зависимости интенсивности РИ от времени по 312 импульсам, при этом вычислялось «стандартное среднеквадратичное отклонение», но на графике оно не показано, и даже в тексте о его величине упоминаний нет, поэтому оценить степень достоверности полученных

результатов невозможно. То же самое относится к рис. 5.4 на с.102 и пояснений к нему.

Рис. 5.2. и 5.3. показывают, что из района катода всё излучение с энергией более 20 кэВ (измерялось без Pb ослабителей) имело максимальную интенсивность не более 0.15, а излучение с энергией более 100 кэВ имело максимальную интенсивность 0.25. Т.о., интенсивность части излучения оказалась больше интенсивности всего. Как соотносятся “rel.un.”, которые использовались на рисунках 5.1. и 5.2 и их отдельных частях, указаний нет. Обратим внимание, что защищаемое положение «РИ из прикатодной области состоит, главным образом, из квантов с энергией $\hbar\omega > 100$ кэВ» основано именно на этих результатах.

Следует признать не вполне корректным и формулировку п.4 Заключения на с.106: «Показано, что излучение из прикатодной области испускается на ~ 140 нс позже, чем из прианодной области и самого анода.» Этот вывод относится к излучению с энергией квантов свыше 100 кэВ, но не к всему излучению, как это видно на рис. 5.2.

В диссертации иногда употребляются некорректные словесные обороты, напр., на с. 80: «Экспериментальная статистика состояла из ~ 1200 осевых разрядов». На стр. 79 при описании диагностики употребляются термины «энергия сцинтилляции» и «энергия ионизирующего излучения». Можно предположить, что речь идет о полной энергии потока излучения, интегральной за импульс, которая соответствует мощностям излучений, но прямо это не оговаривается.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертационное исследование Родионова Андрея Александровича «Жесткое рентгеновское излучение в мегавольтном атмосферном разряде» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей большое значение для рентгеновской оптики. Изучение закономерностей и характеристик явлений и процессов соответствуют паспорту специальности 1.3.6. «Оптика» (п. 12 и п. 16). Все основные положения и выводы диссертации опубликованы в изданиях, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий ...» ВАК. Автореферат соискателя полностью отражает положения, выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертации.

Диссертационное исследование Родионова А. А. выполнено на высоком уровне, полностью соответствует критериям, установленным для

кандидатских диссертаций Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842, а его автор, Родионов Андрей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. «Оптика».

Отзыв составил:

Доктор физико-математических наук, профессор,
научный сотрудник
Лоза Олег Тимофеевич
26.02.2024

Акционерное общество Научно-технологический центр "ПЛАЗМАИОФАН"
119261, г. Москва, ул. Панфёрова, д. 16, к. 1, пом. ком. оф. III.2.40
тел. +7 (916) 381-03-01, e-mail: oleg.loza@list.ru

Подпись Лозы О.Т. заверяю:

Заместитель генерального директора
"АО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН"



А.А. Дорофеев

Список основных публикаций официального оппонента О. Т. Лозы по тематике диссертации А. А. Родионова в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Булейко А.Б., Бахтин В.П., Лоза О.Т., Раваев А.А., Быков А.Г., Коновальцева Л.В., Плазменный мазер с магнитной самоизоляцией // Прикладная физика. – 2023. № 1. С.72-77.
2. Belov, A. A., Loza, O. T., Lovetskiy, K. P., Karnilovich, S. P., & Sevastianov, L. A., Numerical simulation of cold emission in coaxial diode with magnetic isolation //Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science. – 2022. – Т. 30. – №. 3. – С. 217-230.
3. Buleyko, A. B., Ponomarev, A. V., Loza, O. T., Ulyanov, D. K., Andreev, S. E., Experimental plasma maser as a broadband noise amplifier. I. Long pulse //Physics of Plasmas. – 2021. – Т. 28. – №. 2. - P. 023303
4. Buleyko, A. B., Ponomarev, A. V., Loza, O. T., Ulyanov, D. K., Sharypov, K. A., Shunailov, S. A., & Yalandin, M. I., Experimental plasma maser as a broadband noise amplifier. II. Short pulse //Physics of Plasmas. – 2021. – Т. 28. – №. 2. P. 023304
5. Андреев С. Е., Богданкевич И. Л., Гусейн-заде Н. Г., Лоза О. Т., Влияние эрозии поверхности коллектора на работу импульсно-периодического плазменного релятивистского СВЧ-генератора //Физика плазмы. – 2021. – Т. 47. – №. 3. – С. 244-256.
6. Buleyko A. B., Ponomarev A. V., Loza O. T., & Ul'yanov D. K., Feedback in plasma maser //Physics of Wave Phenomena. – 2019. – Т. 27. – С. 257-260.