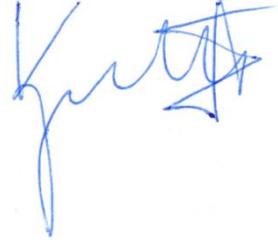


На правах рукописи



КОЗЛОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МИКРОФОКУСНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ
ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» на кафедре «Промышленная электроника».

Научный руководитель: **Трубицын Андрей Афанасьевич**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Промышленная электроника» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань

Официальные оппоненты: **Потрахов Николай Николаевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электронные приборы и устройства» ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург

Морев Сергей Павлович, доктор физико-математических наук, эксперт научно-технической сферы Акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» (Ioffe Institute), г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «16» мая 2023 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.375.02 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на официальном сайте <http://www.rsreu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

Автореферат разослан « ___ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.375.02, д.ф.-м.н., доцент

Литвинов Владимир Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современном мире нет отрасли науки и техники, которая не нуждается в средствах диагностики для структурного и количественного анализа. Одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля изделий и материалов является рентгенографический. Популярность данного метода связана с высокой проникающей способностью рентгеновского излучения и достаточным для большинства приложений пространственным разрешением. Рентгенографические методы диагностики применяются в медицине, биологии, физике, различных отраслях промышленности, таких как, электронная, нефтегазовая, пищевая и др. Особое место рентгеновский контроль занимает в задачах обнаружения внутренних трещин и изломов деталей несущих конструкций, валов и осей, подверженных действию как постоянной, так и повторно-периодической нагрузки. В криминалистике рентгеновские методы контроля используются для обнаружения взрывчатых и наркотических веществ, при исследовании деталей огнестрельного оружия на предмет изменения маркировки, при проведении судебно-медицинских заключений.

Любая установка для рентгеновского неразрушающего контроля включает в себя источник и детектор рентгеновского излучения (как правило цифровой), систему позиционирования, программно-аппаратный комплекс для обработки и вывода информации о структуре или количественном составе исследуемого объекта. Метод проекционной рентгенографии является мощным инструментом для получения информации о внутренней структуре исследуемого объекта. В проекционной рентгенографии применение микрофокусных трубок по сравнению с макрофокусными, обеспечивает ряд преимуществ, которые заключаются в следующем: возможность локальных исследований объекта; снижение дозы облучения областей смежных с исследуемой; более высокое качество изображений объекта при одинаковых дозах облучения; получение увеличенных изображений исследуемого объекта.

Наиболее заметны преимущества микрофокусных рентгеновских трубок становятся при использовании анодов прострельного типа, конструкция которых позволяет разместить исследуемый объект на минимальном расстоянии от излучателя по сравнению с отражательными.

Микрофокусные рентгеновские трубки являются средством получения уникальной информации о микро- и макроструктуре исследуемых объектов, в частности, в виде трехмерных изображений в методе компьютерной микротомографии. Данный метод диагностики выделился в отдельный раздел науки, считающийся в наши дни «золотым стандартом» неразрушающего контроля.

Качество томографических изображений зависит от целого ряда факторов, определяемые физическим процессом сбора данных, программно-аппаратным обеспечением, способом сканирования объекта, свойствами материалов исследуемого объекта, а также внешними условиями проведения эксперимента, к которым относятся температура окружающей среды, вибрации и т.д. Однако главными факторами, определяющими качество и объем извлекаемой информации, являются размер фокусного пятна и мощность излучения микрофокусной рентгеновской трубки.

Степень разработанности. С целью повышения качества регистрируемых данных микрофокусные рентгеновские трубки совершенствуются по двум основным направлениям, связанным с увеличением мощности рентгеновского излучения и уменьшением размера фокусного пятна. Большая мощность излучения является основным условием записи высококонтрастных изображений, что особенно важно в случае исследования объектов, смежные области которых имеют близкие коэффициенты поглощения рентгеновских лучей. Маленький размер области излучения является средством обеспечения высокой резкости изображений. Мощность рентгеновского излучения в рентгеновских трубках прямо пропорциональна мощности электронного луча. Однако попытки увеличения подводимой мощности или снижения размеров фокусного пятна вызывают рост плотности тепловой мощности, выделяемой на аноде, которая может стать причиной его значительного разогрева и выхода из строя рентгеновской трубки.

Неоценимый вклад в развитие и совершенствование конструкций микрофокусных рентгеновских трубок внесли известные отечественные ученые и специалисты – Быстров Ю.А., Блинов Н.Н. (ст), Блинов Н.Н. (мл), Иванов С.А., Бессонов В.Б., Шукин Г.А., Потрахов Н.Н., Потрахов Е.Н., Грязнов А.Ю., Новосельцева А.С., Куликов Н.А., Подымский А.А. и др. В их работах затрагивались проблемы оценки предельной мощности трубок. Тем не менее, конкретные вопросы, связанные с рассеянием энергии электронного пучка и образованием области тепловыделения в материале мишени не нашли в них должного отражения. Цель и задачи представляемой работы диктуются устойчивым прогрессом в теории и практике диагностики объектов различного происхождения рентгеновскими методами, в особенности с применением микрофокусных трубок, и ужесточением требований к качеству данных, извлекаемых в процессе исследований.

Цель диссертационной работы – разработка микрофокусной рентгеновской трубки повышенной мощности с использованием новых численно-аналитических моделей рассеяния энергии электронного пучка в материале мишени.

Объект исследования – тепловой режим анодного узла микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа.

Предмет исследования – механизм образования области локального тепловыделения в мишени и влияние геометрических параметров, свойств материалов и режимов конвективного охлаждения анодного узла микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа.

Задачи исследования.

1. Построение численной модели процессов рассеяния энергии электронного пучка в анодном узле микрофокусной рентгеновской трубки.

2. Численное исследование процессов рассеяния тепла в анодном узле и определение условий, обеспечивающих повышение мощности микрофокусных рентгеновских трубок.

3. Построение аналитической модели, устанавливающей взаимосвязь параметров конструкции анодного узла и диаметра фокусного пятна с мощностью микрофокусной рентгеновской трубки.

4. Разработка конструкторской документации и изготовление экспериментального образца микрофокусной рентгеновской трубки.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Впервые получено аналитическое описание усеченной сферой границ области взаимодействия электронного луча с материалом мишени анода микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа и найдена функция распределения объемных тепловых источников в мишени, позволяющие численным моделированием определить предельные рассеиваемые мощности микрофокусных рентгеновских трубок прострельного типа.

2. Найдено значение коэффициента теплоотдачи, фиксирующее нижнюю границу области насыщения предельной мощности микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа.

3. Впервые обнаружен диапазон толщин подложки анода микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа, в границах которого наблюдается максимум мощности рентгеновского излучения.

4. Впервые установлена аналитическая зависимость предела рассеиваемой мощности от теплофизических свойств материала подложки, геометрических размеров анодного узла и условий конвективного охлаждения в микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа.

5. Предложена конструкция анода «Тепловая труба» микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа как способ существенного повышения рассеиваемой тепловой мощности.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Результаты работы, полученные в ходе аналитических и численных исследований процессов рассеяния мощности на аноде микрофокусной трубки, выделяемой при бомбардировке потоком электронов, являются теоретической базой разработки конструкций микрофокусных рентгеновских трубок прострельного типа в обеспечении максимальной мощности при заданных размерах области излучения. Как практически полезный инструмент проектирования микрофокусных трубок в диссертации представляется формула расчета максимальной мощности на мишени, функционально связывающая ее с характеристиками электронного луча, а также геометрическими параметрами мишени, условиями теплоотдачи на поверхности мишени и свойствами материалов мишени. Разработанная в диссертации микрофокусная трубка стала результатом развития принципов конструирования и изготовления такого рода устройств по металлокерамической технологии, уточнения процесса подготовки электровакуумного устройства к экспериментальным исследованиям и обновления методики экспериментальных исследований высоковольтных приборов с использованием цифровых технологий управления и регистрации данных. Результаты работы могут быть использованы при создании мощных микрофокусных трубок, в том числе, на предприятиях электровакуумного профиля г. Рязани.

Реализация и внедрение.

Результаты кандидатской диссертации «Разработка микрофокусной рентгеновской трубки повышенной мощности» использованы в учебном процессе при

подготовке бакалавров по направлению 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника» профиль «Промышленная электроника» в курсе лекций, практических и лабораторных работ «Аналитические приборы и методы в электронике» в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина (Акт об использовании результатов кандидатской диссертации Козлова Е.А. «Разработка микрофокусной рентгеновской трубки повышенной мощности» в учебном процессе).

Полученные результаты диссертационной работы использовались при выполнении научно-исследовательских работ НИР 16-18Г «Развитие средств и методов рентгеновской компьютерной микротомографии высокого качества» Грант РФФИ №18-79-10168 и НИР 5-19Г «Рассеивание тепловых потоков сверхвысокой плотности» Грант РФФИ №19-38-90231/19 (Акт о реализации научных результатов диссертационной работы «Разработка микрофокусной рентгеновской трубки повышенной мощности» Козлова Е.А.)

Результаты диссертации использовались в ООО «Импульсные технологии» при создании микрофокусных рентгеновских трубок с оптимизированной конструкцией анода (Акт использования результатов диссертационной работы на тему «Разработка микрофокусной рентгеновской трубки повышенной мощности» Козлова Е.А.)

Методология и методы исследования.

Для определения формы и размеров области тепловыделения в прострельной мишени микрофокусной рентгеновской трубки применялся численный метод Монте-Карло, реализованный в комплексе программ EISS и Win X-Ray. Вид функции распределения тепловых потерь в области взаимодействия определялся численно-аналитическим методом по результатам анализа распределения энергетических потерь электронов по глубине и уширению электронного пучка на поверхности мишени.

Для исследования тепловых режимов в анодном узле микрофокусной рентгеновской трубки использовались методы численного моделирования тепловых процессов, реализованные в пакете программного обеспечения COMSOL Multyphysics 5.4.

Исследование фокусирующих свойств магнитной линзы проводилось на экспериментальной установке рентгеновского неразрушающего контроля в составе рентгенозащитной камеры, микрофокусной рентгеновской трубки BC16 (ЗАО «Светлана-Рентген»), плоско-панельного детектора цифровых изображений МАРК1215 (ООО «ПРОДИС.ндт»), лабораторного источника питания Mastech NY3010 и высоковольтного источника питания XRF160 фирмы SPELMAN.

Для измерения токов утечки использовался мультиметр Fluke 15B+ и встроенный микроамперметр в высоковольтный блок XRF160. Контроль уровня дозы рентгеновского излучения осуществлялся с использованием дозиметра ДКР-4М и дозиметр «Белла».

Научные положения, выносимые на защиту.

1. В микрофокусных рентгеновских трубках прострельного типа не менее 90% области взаимодействия ускоренных электронов с материалом мишени при

диаметре электронного пучка от 1 до 100 мкм локализуется в пространстве, описываемом усеченной сферой, размеры которой ограничены глубиной пробега электронов и диаметром электронного пучка, а функция распределения тепловых потерь определяется соотношением

$$q_v(r, z) = \frac{2.892P}{\left(\frac{d_e}{2} + \frac{\delta_{\max}}{1.4}\right)^2 \delta_{\max}} \exp \left[- \left(\frac{4.5r^2}{\left(\frac{d_e}{2} + \frac{\delta_{\max}}{1.4}\right)^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{3.5z}{\delta_{\max}} - \frac{1}{2} \right)^2 \right) \right],$$

где δ_{\max} – полный пробег электронов в твердом теле, определяемый по формуле Х.-И. Фиттинга, d_e – диаметр электронного пучка, P – мощность электронного пучка.

2. Насыщение предельной рассеиваемой мощности на аноде микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа достигается при значении коэффициента теплоотдачи порядка 100 Вт/м²К.

3. Максимальная мощность рентгеновского излучения составного вольфрам-бериллиевого анода микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа достигается в диапазоне толщин бериллиевой подложки от 300 мкм до 500 мкм при ускоряющем напряжении порядка 100 кВ.

Достоверность результатов диссертационного исследования, полученных численно-аналитическими методами, подтверждается их совпадением с характеристиками серийно выпускаемых микрофокусных рентгеновских трубок отечественных и зарубежных производителей.

Соответствие паспорту специальности. Тема и содержание диссертации отвечает паспорту специальности 2.2.1. «Вакуумная и плазменная электроника» в части пункта 4 «Создание новых и совершенствование существующих методов и устройств для генерирования и преобразования электромагнитной энергии с помощью свободных электронов и ионов, включая вопросы разработки научных основ, физических и технических принципов реализации и совершенствования указанных приборов и их основных компонентов», и в части пункта б «Теоретические и экспериментальные исследования и разработка методов расчета различных типов вакуумных и газоразрядных приборов и устройств или отдельных их узлов и устройств с целью улучшения характеристик приборов».

Апробация работы. Представление результатов проводилось на международных, всероссийских и региональных конференциях, съездах и научных форумах, в том числе, VII-VIII Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники (Санкт-Петербург, 2020-2021), 9-10 TH MEDITERRANEAN CONFERENCE ON EMBEDDED COMPUTING, MECO 2020, 2021 (Budva, 2020-2021), 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODERN NANOTECHNOLOGIES AND NANOPHOTONICS FOR SCIENCE AND INDUSTRY, MNNSI 2018 (Суздаль, 2018), и другие.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, включая статьи и тезисы докладов внутривузовских, всероссийских и международных конференций, из них 2 статьи в журнале из перечня ВАК, 3 статьи включены в

реферативные базы данных Scopus и Web of Science, 6 работ в сборниках трудов конференций проиндексированы в Scopus, 1 патент на полезную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Автором внесен определяющий вклад в получение основных результатов диссертационной работы. Автором самостоятельно получена модель, описывающая пространственное распределение тепловых потерь в объеме материала мишени составного анода микрофокусной рентгеновской трубки, проведено численное исследование процессов рассеивания мощности составным анодом микрофокусной рентгеновской трубки. Результаты исследования обсуждались совместно с научным руководителем А.А. Трубицыным, а также с А.А. Фефеловым и Е.Ю. Грачевым. Совместно с научным руководителем автором развита идея замены прострельного анода микрофокусной трубки и на анод, выполненный по типу тепловой трубы. Совместно с А.А. Фефеловым автором предложены конструкция и алгоритм расчета прострельного анода, выполненного по типу плоской высокотемпературной тепловой трубы. Лично автором разработана конструкция экспериментального образца микрофокусной рентгеновской трубки повышенной мощности. Совместно с Е.Ю. Грачевым автором проведено экспериментальное исследование работы системы магнитной фокусировки, а также измерение токов утечки экспериментального образца микрофокусной рентгеновской трубки.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, списка литературы и приложений. Основной текст работы содержит 176 страниц, 85 рисунков и 14 таблицы. Список литературы на 9 страницах включает 83 наименования. В приложении на 4 страницах приведены акты о внедрении результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность диссертационной работы и степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, изложены научные положения, выносимые на защиту, приведены сведения о методологии исследования, внедрении и апробации результатов, публикациях, структуре и объеме работы.

В первой главе приводится обзор современного состояния исследований в области создания микрофокусных рентгеновских трубок с актуальными для основных приложений параметрами.

Анализ литературных источников позволяет сделать вывод о том, что основные направления развития микрофокусных рентгеновских трубок (МФРТ) прострельного типа связаны с попытками увеличения подводимой к мишени мощности и уменьшения размеров фокусного пятна в обеспечение растущих требований к качеству и информативности рентгеновских теневых изображений. При этом оба направления совершенствования конструкций трубок требуют решения проблемы снижения физических ограничений на максимальную плотность мощности, рассеиваемой прострельной мишенью.

Основным путем решения выделенной проблемы является интенсификация процессов теплопередачи в анодном узле МФРТ прострельного типа, которая обеспечивается применением новых материалов с уникальными теплофизическими свойствами, эффективных систем охлаждения, работающих по замкнутому испарительно-конденсационному циклу, и продуктивных теплоносителей на основе нано- и сверхкритических флюидов.

По результатам аналитического обзора установлено, что все исследования по повышению мощности рентгеновских трубок с микронными размерами области излучения базируются на упрощенных численных моделях процессов рассеяния энергии электронов в прострельной мишени без учета специфики образования зоны взаимодействия электронов с атомами материала мишени и области тепловыделения, вне связи с конвективной теплоотдачей и теплоотдачей излучением с поверхности анода.

Во второй главе выполняется построение численной модели тепловых процессов в составном аноде микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа; определяются предельные рабочие температуры материалов анода и уточняются представления о специфике образования локальной области тепловыделения в мишени; выполняется численное моделирование тепловых режимов в составном аноде, по результатам которого определяются условия достижения максимальной мощности МФРТ прострельного типа.

Мощность излучения МФРТ прострельного типа лимитируется предельной тепловой мощностью рассеиваемой анодным узлом трубки, которая, в свою очередь, ограничена допустимой температурой в области фокусного пятна, в местах соединения материалов, а также в объеме и на внешней поверхности анода. На поверхности мишени, в области фокусного пятна и в объеме анода предельно допустимыми температурами материалов являются их температуры плавления. Следует учитывать, что в рентгеновских трубках внутренняя поверхность анода, в частности область фокусного пятна на мишени, обращена к вакууму, т.е. находится под давлением остаточных газов величиной 10^{-5} – 10^{-6} Па. При таких малых давлениях стандартная температура фазового перехода (плавление, кипение) значительно снижается. В вакууме, вследствие испарения под действием высоких температур может наблюдаться значительное снижение толщины мишени в течение срока службы микрофокусной трубки, который определяется сроком службы катода, что необходимо учитывать при оценке допустимой температуры мишени.

На внешней поверхности анода ограничения по температуре связываются с возникновением окислительных реакций (коррозия) приводящих к ее деградации. В местах вакуумно-плотного соединения материалов анодного узла допустимые температуры определяются конкретной технологией изготовления. Наиболее распространенными материалами анода являются вольфрам W (мишень), бериллий Be (подложка) и медь Cu (тело анода). Основными способами соединения Be и Cu являются диффузионная сварка и вакуумная пайка с использованием пленочного титанового Ti покрытия. В таблице 1 приведены значения предельно допустимых рабочих температур материалов анодного узла с указанием физических причин их ограничения.

Таблица 1 – Предельные рабочие температуры материалов анодного узла с W-Be мишенью и Cu телом анода и факторы их ограничения

Материал	Факторы ограничения				
	Физические			Технологические	
	Испарение в вакуум	Плавление	Окисление	Вакуумная пайка Be-Cu	Диффузионная сварка Be-Cu
W	2000-2200 К	–	–	–	–
Be	–	1551 К	1000 К	–	–
Cu	–	1356 К	550 К	–	1356 К
ПСр72+Ti	–	–	–	1052 К	–

При моделировании установленные допустимые температуры в конструкции анодного узла, ограничивающие мощность микрофокусной трубки, сравниваются с соответствующими температурами на распределении температурного поля, которое, что вполне очевидно, зависит от геометрии анодного узла и условий теплоотдачи на его внешних границах, теплофизических свойств материалов конструкции и действия источников тепла в объеме мишени.

Объемным источником тепла является область взаимодействия электронного пучка с материалом мишени, в которой рассеиваемая мощность определяется пространственным распределением потерь энергии электронов при их движении в твердом теле. Размер и форма области взаимодействия зависят от материала мишени, энергии электронного пучка и его диаметра. Стандартно и практически без обоснований при проведении тепловых расчетов область взаимодействия аппроксимируют сферой или полусферой, задавая по объему равномерное распределение выделяемой мощности. В некоторых случаях исключают механизм рассеяния энергии в объеме мишени и задают распределение мощности по ее поверхности.

Для определения и уточнения вида аппроксимации области взаимодействия было проведено моделирование процесса рассеяния электронов в материале мишени методом Монте-Карло. В ходе моделирования получены картины распределения траекторий электронов в объеме W мишени, задающие размер и форму области взаимодействия (см. рисунок 1). Результаты моделирования показали, что в диапазоне энергий электронного пучка 100-180 кэВ и диаметра d_e 1-100 мкм форма области взаимодействия приближена к усеченной сфере радиусом R_s со смещенным на величину Z_s центром, размеры которой ограничены глубиной пробега электронов δ_e и уширением пучка $a_r = 0.5d_e + \delta_e$ на поверхности мишени

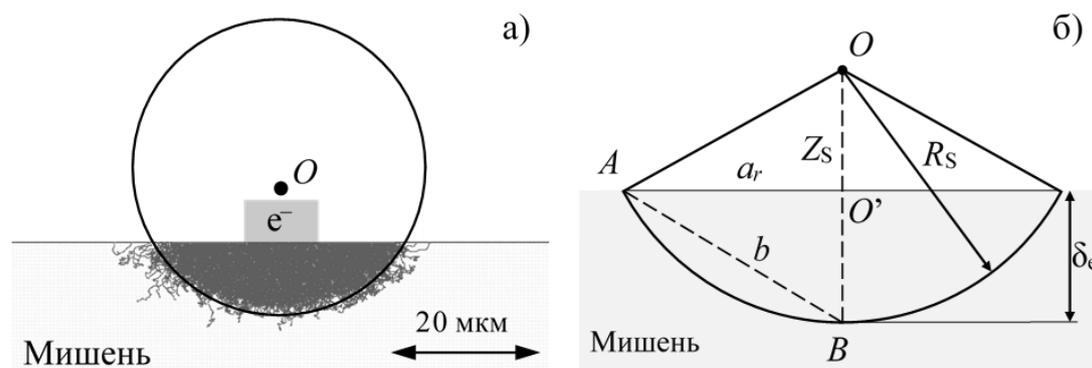


Рисунок 1 – Результаты моделирования и аппроксимация области взаимодействия (а) с геометрическим представлением области взаимодействия (б)

$$Z_s = \frac{\delta_{\max}}{2} \left[\left(\frac{d_e}{2\delta_{\max}} + \frac{5}{7} \right)^2 - 1 \right], \quad (1)$$

$$R_s = \frac{\delta_{\max}}{2} \left[\left(\frac{d_e}{2\delta_{\max}} + \frac{5}{7} \right)^2 + 1 \right]. \quad (2)$$

Для моделирования тепловых процессов в аноде необходимо знать функцию распределения тепловых потерь в области взаимодействия электронов с мишенью. Согласно механизму генерации рентгеновских квантов, практически вся кинетическая энергия электронного пучка преобразуется в тепловую. Следовательно, вся подводимая мощность P к мишени рассеивается только в объеме области взаимодействия. Результаты моделирования процесса взаимодействия электронов с материалом мишени свидетельствуют о Гауссовском распределении энергетических, а значит и тепловых потерь в объеме усеченной сферы. Установлено, что в объеме области взаимодействия, аппроксимируемой усеченной сферой, при осесимметричной постановке задачи, функция распределения тепловых потерь $q_v(r, z)$ описывается уравнением

$$q_v(r, z) = \frac{2.892P}{\left(\frac{d_e}{2} + \frac{\delta_{\max}}{1.4} \right)^2 \delta_{\max}} \exp \left[- \left(\frac{4.5r^2}{\left(\frac{d_e}{2} + \frac{\delta_{\max}}{1.4} \right)^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{3.5z}{\delta_{\max}} - \frac{1}{2} \right)^2 \right) \right]. \quad (3)$$

Для оценки выделяемой мощности $P_{\text{обл.вз}}$ в области взаимодействия, аппроксимируемой усеченной сферой, проинтегрируем по объему функцию распределения тепловых потерь (3). Результаты интегрирования показывают некоторое отличие между мощностью P и $P_{\text{обл.вз}}$. Отношение выделяемой мощности $P_{\text{обл.вз}}$ к подводимой P по физическому смыслу интерпретируется как доля электронов от общего количества, локализуемых в объеме усеченной сферы, и определяется как $\phi = (P_{\text{обл.вз}}/P) \cdot 100\%$. На рисунке 2 представлены зависимости параметра ϕ от диаметра фокусного пятна при ускоряющих напряжениях 120-180 кВ.

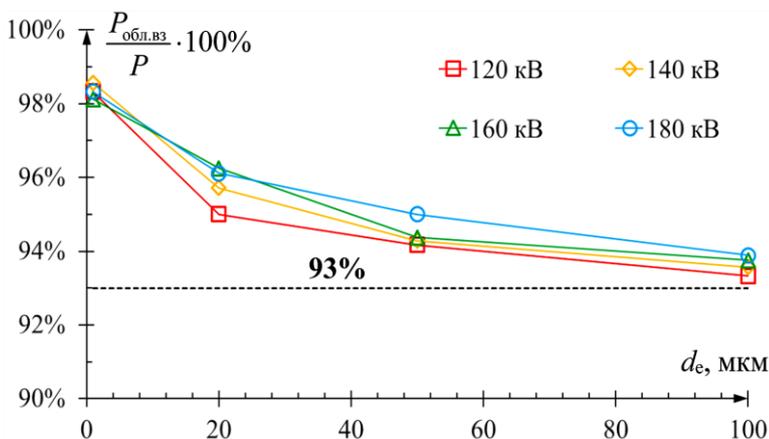


Рисунок 2 – Выделяемая мощность в объеме усеченной сферы в процентах от подводимой мощности

Графики зависимостей наглядно показывают, что более 93% подводимой мощности рассеивается в объеме усеченной сферы. Следовательно, более 93% электронных траекторий локализуется в данной области, что подтверждает выбранную модель аппроксимации.

Для достижения максимальной интенсивности рентгеновского излучения толщина

мишени будет иметь некоторое оптимальное значение h_0 в зависимости от энергии электронного пучка. Для W мишени в диапазоне энергий 80-150 кэВ значение h_0 составляет 3-8 мкм, а полный пробег электронов δ_{\max} соответствует диапазону 5.4-15.7 мкм. Указанные значения h_0 с высокой точностью согласуются с данными о пробеге электронов в твердом теле, определяемый по формуле Косллета-Томаса $h_0 [\text{мкм}] = 0.074 E_0^{1.55} / \rho$, где E_0 [кэВ] – первичная энергия пучка, а ρ [г/см³] – плотность материала мишени. Установлено, что в W мишени толщиной h_0 , с учетом полного пробега электронов δ_{\max} для диапазона ускоряющих напряжений 120-180 кВ и диаметров фокусного пятна 1-100 мкм, выделяется порядка 90% подводимой мощности P . Если толщина мишени будет меньше оптимального значения h_0 , то происходит снижение мощности, рассеиваемой в мишени, и, как следствие, мощности рентгеновского излучения.

Полученные предельные температуры материалов анода, данные о форме и размерах области тепловыделения в мишени, значения ее толщины и вид функции распределения тепловых потерь являются теоретической базой для построения численной модели процессов теплопередачи в анодном узле МФРТ прострельного типа.

В ходе численного эксперимента получены зависимости максимальной рассеиваемой мощности от геометрических параметров анодного узла и условий конвективной теплоотдачи на его поверхности при различных значениях диаметра фокусного пятна, для W-Be мишени с Cu телом анода. Установлено, что максимальная мощность, рассеиваемая анодом, ограничивается предельной температурой подложки. Основным вклад в рост мощности вносит увеличение толщины H подложки и повышение коэффициента теплоотдачи α_1 на поверхности анодного узла. При этом для эффективного рассеивания тепла достаточно охладить только внешнюю цилиндрическую поверхность тела анода, длина которой стандартно не менее 20 мм, а диаметр – порядка 10 мм. При малых размерах фокусного пятна (1-10 мкм) условия конвективного теплообмена не оказывают заметного влияния на максимальную мощность, и тепловой режим определяется теплопроводностью материалов анода. На рисунке 3 представлены зависимости $P_{\max}(\alpha_1)$ которые показывают, что при достижении α_1 порядка 100 Вт/м²К максимальная мощность приближается к предельному значению, а с дальнейшим увеличением α_1 (1000 Вт/м²К) плавно выходит на участок насыщения. Это обусловлено термическим сопротивлением материалов анода.

На рисунках 4 и 5 представлены зависимости максимальной рассеиваемой мощности анодом и мощности рентгеновского излучения от толщины подложки. Представленные графики зависимостей показывают, что для заданных значений d_e основное увеличение P_{\max} наблюдается в диапазоне изменения H от 100 до 300 мкм. Вследствие этого эффекта мощность рентгеновского излучения также увеличивается, компенсируя эффект его поглощения в Be подложке.

Представленные данные позволяют сделать вывод о том, что максимальная мощность рентгеновского излучения составного W-Be анода микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа достигается в диапазоне толщин Be подложки от 300 мкм до 500 мкм при ускоряющем напряжении порядка 100 кВ.

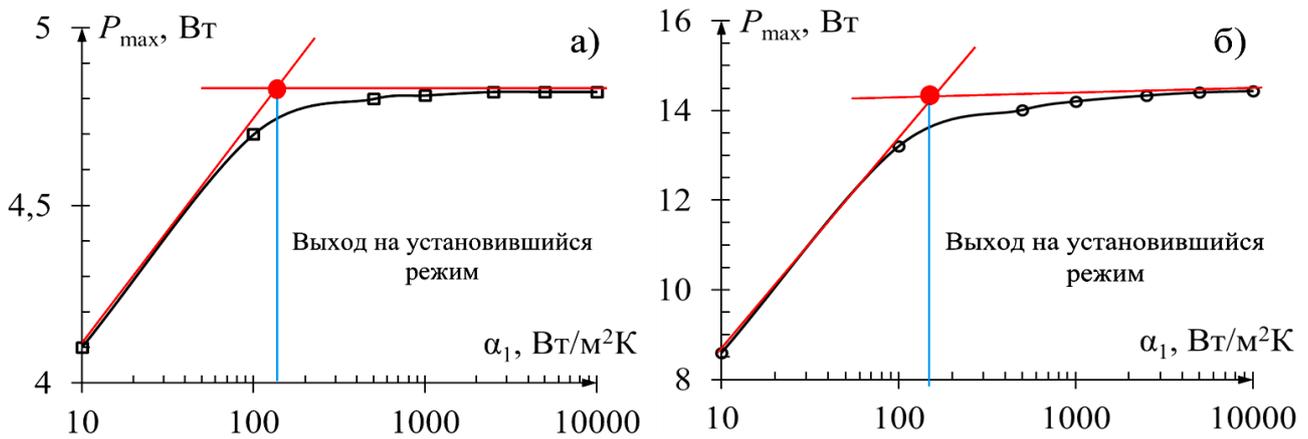


Рисунок 3 – Достижение предельной мощности (насыщение) рассеиваемой анодом при диаметре фокусного пятна 1 мкм (а) и 100 мкм (б)

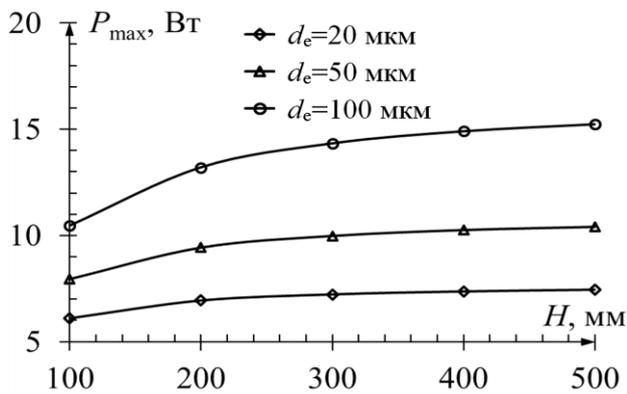


Рисунок 4 – Зависимости P_{\max} от толщины H подложки при различных значениях параметров d_e

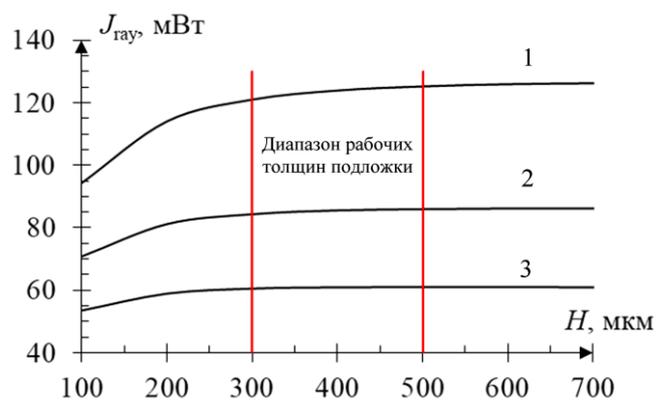


Рисунок 5 – Зависимости мощности рентгеновского излучения от толщины H подложки при диаметрах фокусного пятна 100 (1), 50 (2) 20 (3) мкм

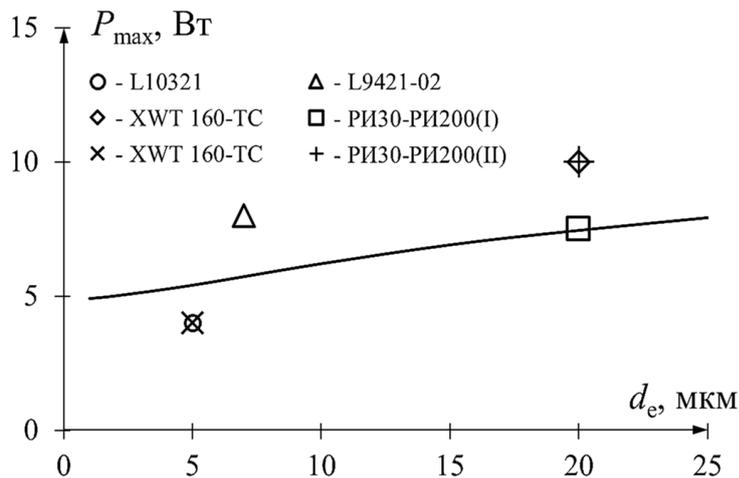


Рисунок 6 – Зависимость P_{\max} от d_e в сравнении с характеристиками серийно выпускаемых микрофокусных рентгеновских трубок прострельного типа

На рисунке 6 представлена зависимость максимальной мощности, рассеиваемой анодом, от диаметра фокусного пятна в сравнении с характеристиками промышленно выпускаемых МФРТ прострельного типа. Результаты численного эксперимента, представленные зависимостью $P_{\max}(d_e)$, хорошо согласуются с известными данными о диаметре фокусного пятна и максимальной

мощности микрофокусных трубок, а отклонение составляет не более 25%. Корреляция результатов численного эксперимента с характеристиками промышленно выпускаемых МФРТ прострельного типа служит прямым экспериментальным доказательством корректности разработанной модели процесса теплопередачи и рассеивания мощности анодным узлом трубки.

В третьей главе выстраивается аналитическая модель процесса рассеяния энергии электронов в составном аноде микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа, а также предлагается технический способ повышения ее мощности.

Показано, что для поиска аналитического решения задачи теплопередачи в составном аноде МФРТ механизм переноса тепла можно представить как последовательное прохождение тепловым потоком нескольких участков с характерным термическим сопротивлением от источника тепловыделения в мишени до внешней поверхности анодного узла. Основанием для такого подхода являются результаты анализа распределения температурного поля и линий тока теплового потока в анодном узле. Установлено, что для расчета температурного поля в подложке можно решать систему уравнений Лапласа и Пуассона в одномерной постановке задачи. В этом случае получаемое соотношение для расчета максимальной рассеиваемой анодом мощности, ограниченной предельной температурой подложки, имеет вид

$$P_{\max} = \frac{T_{\max}^{\text{Be}} - T_{\text{ext}}}{\frac{1}{2\pi\lambda_{\text{Be}}R_0} + \frac{\ln\left(\frac{D}{2H}\right)}{2\pi\lambda_{\text{Be}}H} + \frac{1}{\alpha_1\pi DL + 0.25\alpha_2\pi D^2}}, \quad (4)$$

где $R_0 \approx 0.63\sqrt[3]{h\left(3(h + 0.5d_e)^2 + h^3\right)}$ – радиус эквивалентного источника тепла в мишени, D и H – диаметр и толщина подложки, L – длина участка теплообмена тела анода, λ_{Be} – теплопроводность подложки (Be), α_1 и α_2 – коэффициента теплоотдачи на внешней поверхности тела анода и подложки, T_{\max}^{Be} и T_{ext} – предельная температура подложки (Be) и температура внешней среды, контактируемой с телом анода.

Представленное соотношение устанавливает функциональную связь максимальной рассеиваемой мощности с теплофизическими свойствами материалов и геометрическими параметрами анодного узла, условиями конвективной теплоотдачи на его внешней поверхности, а также с диаметром фокусного пятна и толщиной мишени, значение которой соответствует оптимальному h_0 .

Для повышения мощности микрофокусных рентгеновских трубок прострельного типа предложена идея, которая заключается в замене классического анода с прострельной мишенью на так называемую «тепловую трубу», реализующая следующие функции: мишень, выходное окно рентгеновского излучения, рассеивание тепловой мощности из области локального нагрева (см. рисунок 7).

Для работы такой конструкции в качестве прострельного анода толщина мишени должна быть достаточно малой для эффективной передачи тепла теплоносителю, но не меньше эффективной длины пробега электрона в металле по модели Косслета-Томаса, из которой она сделана. Материал крышки должен иметь хорошую теплопроводность для эффективного стока тепла и низкий коэффициент ослабления рентгеновских лучей. В таблице 2 представлены результаты расчета максимальной рассеиваемой мощности анодом «Тепловая труба».

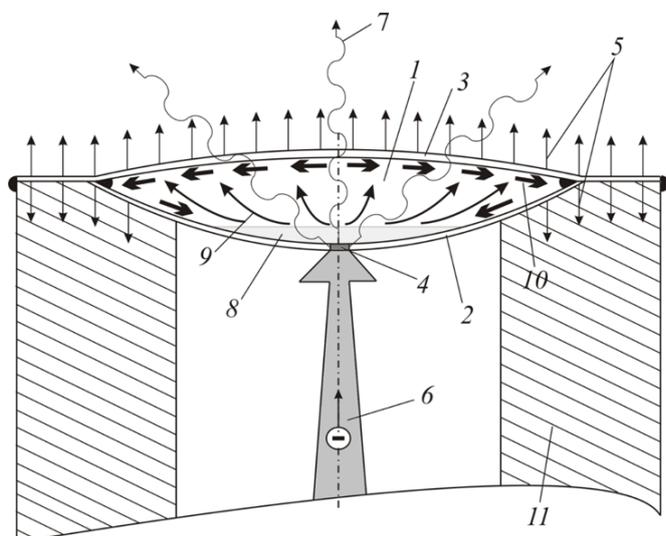


Рисунок 7 – Анодный узел, выполненный в виде тепловой трубы: 1 – тепловая труба (анод), 2 – дно тепловой трубы (мишень анода), 3 – крышка тепловой трубы (выходное окно анода), 4 – зона тепловыделения (область эмиссии рентгеновских лучей), 5 – сток тепла, 6 – поток электронов, 7 – рентгеновское излучение, 8 – теплоноситель, 9 – пар, 10 – конденсат, 11 – корпус анода

Таблица 2 – Максимальная рассеиваемая мощность P_{\max} в мишени анода «Тепловая труба»

Диаметр фокусного пятна d_e	Толщина W мишени h для анода «Тепловая труба»			
	100 мкм	10 мкм	1 мкм	100 нм
2 мкм	0.464 Вт	0.48 Вт	0.68 Вт	4.64 Вт
10 мкм	2.35 Вт	2.78 Вт	11.56 Вт	115 Вт
30 мкм	7.31 Вт	12.51 Вт	103.9 Вт	1.04 кВт
100 мкм	27.82 Вт	115.6 Вт	1.16 кВт	11.6 кВт

Выполненная аналитическая оценка максимальной мощности анода «Тепловая труба» демонстрирует увеличение максимальной мощности в 3-5 раз по сравнению с классической W - W_e мишенью прострельного типа.

В четвертой главе описывается процесс разработки конструкции и изготовление экспериментального образца микрофокусной рентгеновской трубки повышенной мощности. На основании результатов анализа распределения электрического поля в трубке, расчетов поля и конструктивных параметров магнитной системы фокусировки, вычислений траекторий электронов в электромагнитном поле, моделирования тепловых процессов в анодном узле разработана конструкция и изготовлен по металлокерамической технологии экспериментальный образец микрофокусной рентгеновской трубки повышенной мощности с рабочим напряжением до 120 кВ и током электронного пучка до 1 мА. Расчетное значение максимальной мощности, рассеиваемой на аноде, составляет 36 Вт. На рисунках 8 и 9 представлена конструкция рентгеновской трубки и внешний вид изготовленного экспериментального образца.

Экспериментальное исследование фокусирующих свойств магнитной линзы проводилось на базе микрофокусной рентгеновской трубки БС-16 производства АО «СВЕТЛАНА-РЕНТГЕН». Экспериментальные данные получены при 44-х кратном увеличении для двух положений соленоида: на расстоянии 5 мм и 10 мм от плоскости мишени рентгеновской трубки. Из анализа результатов можно сделать вывод, что минимальный размер фокусного пятна для расстояния 5 мм составил 25 мкм, для 10 мм – 47 мкм, что находится в соответствии с основными законами электронной оптики.

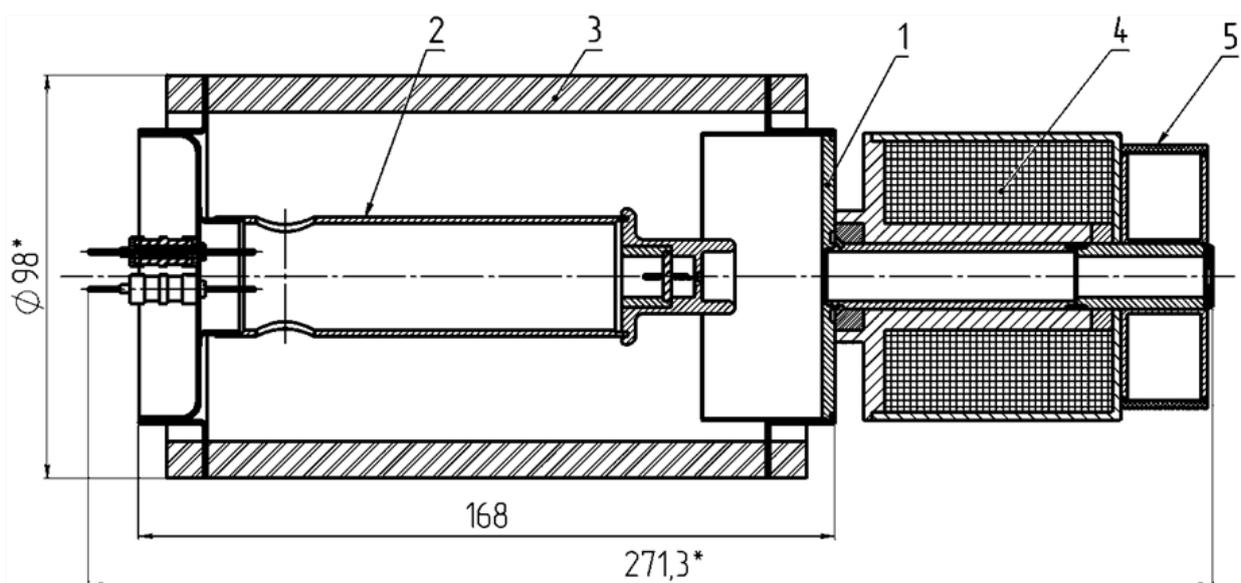


Рисунок 8 – Чертеж конструкции экспериментального образца микрофокусной рентгеновской трубки повышенной мощности: 1 – анодный узел; 2 – электронная пушка; 3 – корпус; 4 – магнитная линза; 5 – система охлаждения



Рисунок 9 – Фотография экспериментального образца микрофокусной рентгеновской трубки повышенной мощности

Изготовленный образец рентгеновской трубки прошел этапы тренировки в «холодном» режиме с целью снижения токов утечки. Процесс сопровождался периодическими скачками с плавным снижением среднего значения тока утечки до нуля. В ходе эксперимента проведено 5 циклов «холодной» тренировки, общее время длительности которых составило порядка 6 часов. Достигнутое значение тока утечки составляет менее 1 мкА при рабочем напряжении 50 кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана численная модель процессов рассеяния энергии электронного луча в материале мишени анода микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа, которая позволяет рассчитать температурное поле в аноде с объемным источником тепловыделения в мишени при заданных условиях теплоотдачи на поверхности анода за счет конвекции, теплопроводности и излучения с учетом температурной зависимости теплофизических свойств материалов конструкции анодного узла.

Численным моделированием определено влияние параметров конвективного теплообмена, а также толщины и материала подложки на предельно допустимую мощность микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа. Рассчитаны границы диапазонов изменения указанных величин в обеспечение максимальной мощности.

Получены аналитические зависимости максимальной мощности от теплофизических свойств подложки, геометрических параметров анодного узла и условий конвективного рассеивания тепловой мощности на его поверхности, позволяющие оценить максимальную анодную мощность по допустимой температуре подложки или по температуре мишени составного анода. Таким образом, заложены теоретические основы проектирования микрофокусных рентгеновских трубок.

Разработана конструкция и изготовлен экспериментальный образец микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа: конструкция анодного узла обеспечивает расчетное значение максимальной рассеиваемой мощности 13-36 Вт при диаметре фокусного пятна 15-100 мкм и рабочем напряжении 120 кВ с применением активной системы жидкостного охлаждения.

Разработана конструкция и изготовлен экспериментальный образец электромагнитной фокусирующей системы и продемонстрирована его работоспособность. Подготовлена экспериментальная база комплексных исследований и оценки параметров микрофокусных рентгеновских трубок.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах

1. Model of Volumetric Heat Sources in Anode of Microfocus X-Ray Tube / E. A. Kozlov, A. A. Trubitsyn, A. A. Fefelov, E. Y. Grachev // Eurasian Physical Technical Journal. – 2021. – Vol. 18, No. 3. – P. 88-92. (SCOPUS)

2. Development of high power microfocus X-ray tube / A. A. Trubitsyn, E. Y. Grachev, E. A. Kozlov, T. Z. Shugayeva // Eurasian Physical Technical Journal. – 2021. – Vol. 18, No. 1. – P. 43-50. (SCOPUS)

3. High-power x-ray tube for micro computed tomography / A.A. Trubitsyn, E. Yu. Grachev, E.A. Kozlov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. No. 1164. P. 012022. (SCOPUS, Web of Science)

4. Козлов, Е. А. Аналитический расчет спектра рентгеновского излучения микрофокусной рентгеновской трубки с анодом «Тепловая труба» / Е. А. Козлов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2019. – № 69. – С. 202-210. (ВАК РФ)

5. Средства и методы компьютерной микротомографии / А. А. Трубицын, Е. Ю. Грачев, Д. А. Морозов [и др.] // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 66-2. – С. 55-62. (ВАК РФ)

Патенты и свидетельства

6. Патент на полезную модель № 199029 U1 Российская Федерация, Микрофокусная рентгеновская трубка с анодом «тепловая труба» прострельного типа: № 2020114115: заявл. 03.04.2020: опубл. 07.08.2020.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611719 Российская Федерация. Программа расчета высокотемпературной тепловой трубы «HighT Heat Pipe»: № 2022610662: заявл. 21.01.2022: опубл. 01.02.2022 / А. А. Фефелов, Е. А. Козлов.

Статьи в сборниках трудов конференций

8. Computer Simulation of Influence the Interaction Region Electrons at the Maximum Temperature in the Target / E. Kozlov, A. Trubitsyn, A. Fefelov, D. Kirushin // 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2020. – Budva, Montenegro, 2020. – P. 1-4. (SCOPUS, Web of Science)

9. High-power microfocus X-ray installation / A. Trubitsyn, E. Grachev, D. Morozov [et al.] // 2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2018 – Including ECYPS 2018, Proceedings. – Budva, 2018. – P. 1-4. (SCOPUS)

10. Грачев, Е. Ю. Исследование тепловых режимов анодов прострельного типа в микрофокусных рентгеновских трубках / Е. Ю. Грачев, М. А. Демидов, Е. А. Козлов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022: Сб. тр. V Междунар. науч.-техн. форума / Под общей редакцией О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2022. – Т. 2. – С. 158-162.

11. Грачев, Е. Ю. Разработка программного приложения для расчета магнитных линз электронно-оптической системы рентгеновских трубок / Е. Ю. Грачев, И. А. Куланхин, Е. А. Козлов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022: Сб. тр. V Междунар. науч.-техн. форума / Под общей редакцией О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотех. ун-т, 2022. – Т. 2. – С. 154-157.

12. Козлов, Е. А. Разработка микрофокусной рентгеновской трубки с комбинированным анодом «тепловая труба» / Е. А. Козлов // Диагностика наноматериалов и наноструктур: Сборник трудов X Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению. – Рязань: Рязан. гос. радиотех. ун-т, 2018. – Т. 2. – С. 7-12.

13. Козлов, Е. А. Оценка величины рассеиваемой тепловой мощности анодом «Тепловая труба» / Е. А. Козлов, А. А. Трубицын // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2018: Сб. тр. междунар. науч.-техн. форума / Под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотех. ун-т, 2018. – Т. 5. – С. 115-118.

Публикации в других изданиях

14. Козлов, Е.А. Модель объемных источников тепла в мишенях микрофокусных рентгеновских трубок прострельного типа / Е.А. Козлов, А.А. Трубицын, А.А. Фефелов, Е.Ю. Грачев // VII Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники. Программа и материалы конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. 135 с.

15. Численное исследование тепловых процессов в аноде микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа / Е.А. Козлов, А.А. Трубицын, А.А. Фефелов, Е.Ю. Грачев // VIII Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники. Программа и материалы конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. 146 с.

КОЗЛОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МИКРОФОКУСНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ
ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 2.2.1 Вакуумная и плазменная электроника

Подписано в печать 03.03.2023.

Формат бумаги 60 x 84 1/16

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,0

Тираж 80 экз. Заказ 5962

Отпечатано в типографии BookJet (ИП Коняхин А.В.)

Тел.: +7 (4912) 46-61-51,

Почта: info@bookjet.ru.

Адрес: 390046, г. Рязань, ул. Пушкина, д. 18