

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
электрофизики Уральского отделения Российской академии наук.
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина».

На правах рукописи

Комарский Александр Александрович

ОСТРОФОКУСНАЯ ВЗРЫВОЭМИССИОННАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ТРУБКА С
КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Специальность: 01.04. 13 – Электрофизика, электрофизические установки

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор физико-математических наук, профессор Чолах С.О.

Научный консультант –
кандидат технических наук Корженевский С.Р.

Екатеринбург – 2017

Список сокращений и условных обозначений

ВЭЭ – взрывная электронная эмиссия

ГМЗ – графит малозольный

ГЭ – графит электродный

МГ – мелкозернистый графит

МК – магнитный компрессор

МПП – малопористый графит

ОС – обратная связь

РФЭС – рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

РТ – рентгеновская трубка

ТЗУ – тиристорное зарядное устройство

УНТ – углеродные нанотрубки

SOS – semiconductor opening switch

Оглавление

Список сокращений и условных обозначений	2
Введение.....	5
Глава 1. Обзор научных исследований и разработок импульсных рентгеновских источников, в основе работы которых лежит явление ВЭЭ.....	10
1.1 Явления автоэлектронной и взрывной эмиссии электронов.....	10
1.2 Импульсные высоковольтные питающие устройства РТ с различными типами накопителей энергии.....	18
1.3 Конструкции импульсных рентгеновских трубок.....	26
1.4 Выводы по главе.....	31
Глава 2. Разработка графитокерамического катода для импульсной наносекундной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки.....	33
2.1 Исследование эмиссионных характеристик конструкционных марок графита.....	34
2.2 Исследование электронной структуры холодных катодов, изготовленных из конструкционных графитов.....	43
2.3 Разработка графитокерамического катодного узла импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки.....	46
2.4 Выводы по главе.....	55
Глава 3 Разработка комбинированного вольфрамографитового анода.....	57
3.1 Вольфрамографитовый анод для импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки.....	58
3.2 Оценка тепловых процессов на аноде импульсной взрывоэмиссионной наносекундной рентгеновской трубки.....	62
3.3 Экспериментальное исследование характеристик вольфрамографитового анода: эффективное фокусное пятно, радиационный выход, ресурс работы.....	69
3.4 Определение предельных эксплуатационных характеристик комбинированного вольфрамографитового анода при работе в повторно-кратковременном режиме.....	73
3.5 Выводы по главе.....	76
Глава 4 Компактный импульсный рентгеновский генератор с регулировкой эффективной энергии рентгеновского излучения мощностью до 3 кВт при частоте следования импульсов до 5 кГц.....	78
4.1 Генератор высоковольтных импульсов наносекундной длительности с частотой следования до 5 кГц.....	79
4.2 Регулировка напряжения включения двухэлектродной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки в зависимости от скорости нарастания напряжения.....	85
4.3 Особенности работы импульсных рентгеновских аппаратов с цифровыми приемниками излучения в рентгенографическом режиме.....	88

4.4. Импульсные аппараты при работе с цифровыми приемниками рентгеновского излучения, работающими в видеорежиме.	93
4.5 Выводы по главе.	94
Заключение	96
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	98

Введение.

Актуальность темы исследования. Во второй половине 1990-х годов в ИЭФ УрО РАН разработан новый класс рентгеновских аппаратов – импульсные рентгеновские аппараты с индуктивным накопителем энергии и твердотельной системой коммутации [1, 2]. Непосредственно генерация рентгеновского излучения осуществляется с помощью специально созданных для данных аппаратов отпаянных импульсных рентгеновских трубок с металлодиэлектрическим катодом типа РИА-1 [3]. Данные трубки характеризуются средней выходной мощностью рассеивания до 1,6 кВт при работе в повторно-кратковременном режиме с частотой следования импульсов до 4 кГц и стабильной эмиссией электронов при скоростях нарастания импульса напряжения более 10^{13} В/с и амплитуде импульса напряжения от 80 кВ и выше.

Эксплуатация трубок серии РИА-1 при мощности рассеивания выше 1,6 кВт не возможна из-за особенностей конструкции электродного узла. В то же время, все более широкое внедрение цифровых приемников рентгеновского излучения, характеризующихся ограниченным временем накопления доз, часто не превышающем единицы секунд, требует повышения средней выходной мощности генераторов рентгеновского излучения при сохранении диаметра фокусного пятна менее 2 мм. При этом необходимо сохранять частоту следования импульсов излучения на уровне сотен Герц для возможности работы системы в видеорежиме. Кроме того, при напряжении менее 80 кВ наблюдается разброс дозы излучения на уровне 20%, что затрудняет проведение дефектоскопии промышленных изделий из легких сплавов и композитов, например, в области авиационной техники. Такая нестабильность генерации излучения возникает из того, что при сохранении длительности импульса на уровне 20-50 нс происходит снижение скорости нарастания напряжения до значения менее 10^{13} В/с, что ниже порога стабильной эмиссии электронов металлодиэлектрическим катодом трубок серии РИА-1. Кроме этого, широкому внедрению импульсных рентгеновских аппаратов в промышленную дефектоскопию, медицинскую диагностику, в сравнении с аппаратами постоянного тока, препятствует отсутствие возможности оперативной регулировки выходного напряжения и как следствие эффективной энергии рентгеновского излучения. Таким образом, разработка катодов со стабильной взрывной электронной эмиссией из множества эмиссионных центров при скорости нарастания импульса напряжения менее 10^{13} В/с является актуальной задачей.

Возможным решением данной задачи является создание взрывоэмиссионного катода с использованием конструкционных графитов, которые являются перспективными для создания автоэмиссионных катодов [4]. В исследованиях, проведенных к настоящему времени,

обнаружено, что для некоторых образцов, наблюдается не только стабильная автоэмиссия электронов, но и рост эмиссионного тока во время работы. Предполагается, что это связано с явлениями, происходящими на поверхности катода, возможным изменением электронной структуры и перестройкой кристаллической решетки [5, 6]. Поскольку наиболее часто инициирование взрывной электронной эмиссии происходит за счет автоэмиссионного тока большой плотности, то объяснение причин роста эмиссионного тока является актуальной задачей, решение которой должно помочь в создании эмиссионно-стабильного взрывоэмиссионного катода из искусственных углеродных материалов.

В импульсных рентгеновских аппаратах, используемых в целях интроскопии, для достижения минимальных размеров фокусного пятна используется острый анод, выполненный в виде заостренного вольфрамового стержня диаметром несколько миллиметров. Такая конструкция обеспечивает небольшой размер фокусного пятна, что в свою очередь позволяет получить рентгеновский снимок с высокой геометрической резкостью, но затрудняет обеспечение эффективного теплоотвода от рабочей поверхности анода. Для повышения допустимой тепловой нагрузки на анод рентгеновской трубки используют радиатор, чаще всего изготовленный из меди, который всегда выводят из зоны, подвергающейся бомбардировке электронным пучком [7]. Нарушение этого условия приводит к резкому увеличению фокусного пятна, поскольку интенсивность рентгеновского излучения с медной части анода сопоставима с интенсивностью излучения, генерируемого с поверхности вольфрама. Так происходит в силу того, что атомные номера данных материалов отличаются в 2,5 раза, а интенсивность рентгеновского излучения пропорциональна атомному номеру мишени. Кроме того, поскольку температура плавления меди почти в 3 раза ниже температуры плавления вольфрама (1356 К против 3687 К), то при работе трубки и разогреве поверхностного слоя анода из-за электронной бомбардировки происходит значительная эрозия радиатора, напыление материала радиатора на изоляторы трубки. На сегодняшний день достигнута средняя рассеиваемая мощность 1,6 кВт для трубки, работающей при напряжении 100 кВ. Интересными материалами для создания комбинированного анодного узла являются высокопрочные конструкционные графиты, обладающие уникальным набором свойств. Данные графиты имеют теплопроводящие свойства на уровне меди, их температура плавления превышает температуру плавления вольфрама, эти материалы подходят для использования в условиях вакуума порядка 10^{-7} торр. При этом атомный номер углерода в 12,3 раза меньше номера вольфрама, как следствие интенсивность излучения от углерода с поверхности комбинированного анода будет существенно меньше. Таким образом, разработка комбинированного вольфрамографитового анода является актуальной задачей, решение которой позволит резко увеличить допустимую тепловую нагрузку импульсных рентгеновских трубок.

На рентгеновских аппаратах постоянного тока имеется оперативная регулировка эффективной энергии излучения, осуществляемая путем изменения напряжения подводимого к трубке. Такая возможность отсутствует на импульсных рентгеновских аппаратах, что является их существенным недостатком. На импульсных аппаратах с емкостными накопителями энергии напряжение включения трубки регулируется изменением давления в разряднике-обострителе и межэлектродного зазора в трубке. Данные методы сложно реализовать в отпаянных приборах. К тому же, недостатком отпаянных разрядников-обострителей является то, что диапазоны напряжений, при которых происходит их включение, лежат в широких пределах. Например, для разрядника РО-43 динамическое напряжение включения имеет диапазон от 140 кВ до 190 кВ [8]. В то же время известно, что электрическая прочность разрядного промежутка зависит не только от амплитудных значений импульса напряжения, но и его временных характеристик. Таким образом, регулировка напряжения включения трубки может быть обеспечена без изменения конструкции рентгеновской трубки, без изменения давления в баллоне трубки, а за счет изменения скорости нарастания напряжения на ней, что затруднительно для генераторов с емкостным накопителем и газонаполненным неуправляемым разрядником-обострителем. Принципиально для аппаратов с емкостными накопителями энергии эта задача не решаема, но может быть реализована для аппаратов с индуктивным накопителем и полупроводниковым прерывателем тока. Таким образом, разработка импульсной рентгеновской трубки для мощных компактных высокочастотных наносекундных высоковольтных генераторов с индуктивным накопителем энергии и полностью твердотельной системой коммутации для промышленного и медицинского использования совместно с цифровыми приемниками излучения, работающей в широком диапазоне ускоряющего напряжения является актуальной задачей.

Цель работы и задачи диссертационной работы.

Цель работы заключается в проведении исследований по разработке взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с рассеиваемой мощностью на аноде до 3 кВт, эффективным размером фокусного пятна не более 2 мм и с катодным узлом, обеспечивающим стабильную электронную эмиссию при скоростях нарастания напряжения менее 10^{13} В/с и частоте следования импульсов до 5 кГц, ресурсом стабильной работы не менее $2 \cdot 10^6$ импульсов.

Научная новизна.

1. Создан графитокерамический катод импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки, позволяющий получить стабильную эмиссию электронов при снижении скорости нарастания напряжения на трубке с $10 \cdot 10^{12}$ В/с до $2,5 \cdot 10^{12}$ В/с.

2. Показано, что рост эмиссионного тока катода, выполненного из конструкционных графитов, наблюдается вследствие смены типа гибридизации с sp^2 на sp^3 , вызванной бомбардировкой поверхности катода ионами остаточных газов в процессе работы.

3. Разработан комбинированный вольфрамографитовый анод импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с эффективным размером фокусного пятна 1,5 мм и средней мощностью рассеяния 3 кВт.

4. Создана острофокусная импульсная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка с комбинированными графитокерамическим катодом и вольфрамографитовым анодом с допустимой частотой следования импульсов до 5 кГц и ресурсом стабильной работы не менее $2 \cdot 10^6$ импульсов.

Практическая ценность работы.

1. В результате проведенных исследований разработана острофокусная импульсная рентгеновская трубка с комбинированными графитокерамическим катодом и вольфрамографитовым анодом с допустимой средней мощностью рассеяния 3 кВт, частотой следования импульсов до 5 кГц и ресурсом стабильной работы не менее $2 \cdot 10^6$ импульсов.

2. В созданной рентгеновской трубке обеспечивается стабильная эмиссия электронов в широком диапазоне скорости нарастания воздействующего напряжения, что позволяет создавать импульсные рентгеновские аппараты с регулируемым напряжением включения трубки от 70 до 120 кВ, импульсным током до 300 А, средней выходной мощностью рассеяния до 3 кВт.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Графитокерамический взрывоэмиссионный катод на основе конструкционного мелкозернистого графита в наносекундных рентгеновских трубках обеспечивает взрывную эмиссию электронов при снижении скорости нарастания напряжения на трубке с $10 \cdot 10^{12}$ В/с до $2,5 \cdot 10^{12}$ В/с при нестабильности рентгеновского излучения от импульса к импульсу менее 10%.

2. Воздействие наносекундного электронного пучка с энергией электронов до 120 кэВ и средней мощностью 3 кВт на комбинированный вольфрамографитовый анод рентгеновской трубки не вызывает снижения дозовых характеристик излучения при диаметре эффективного фокусного пятна 1,5 мм в течение $2 \cdot 10^6$ импульсов.

3. Электродный узел на основе комбинированных графитокерамического катода и воольфрамографитового анода острофокусной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки обеспечивает устойчивую генерацию рентгеновского излучения при изменении ускоряющего напряжения в диапазоне от 70 до 120 кВ при импульсном токе до 300 А, средней выходной мощности до 3 кВт.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечивается применением современной измерительной и регистрирующей аппаратуры, надежной статистической выборкой. Полученные данные согласуются с имеющимися в литературе, не противоречат физическим законам и принципам.

Основные результаты обсуждались на следующих российских и международных конференциях: II Всероссийской конференции производителей рентгеновской техники (С-Петербург, 2015 г.); на международной конференции Spring World Congress on Engineering and Technology SCET 2014 (Китай, Шанхай, 2014 г.); 18-й и 21-й Всероссийских научных конференциях студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-18 и ВНКСФ-21 (Красноярск, 2012 г.; Омск, 2015 г.); на XI, XIII, XV, XVII всероссийских молодежных школах-семинарах по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екатеринбург, 2010 г., 2012 г., 2014 г., 2016 г.).

Публикации.

По теме диссертационной работы опубликовано 7 статей в рецензируемых журналах, 7 тезисов докладов всероссийских и международных конференций, также получено 3 патента на полезную модель.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в подготовке и проведении экспериментов, а также обсуждении полученных результатов. Лично диссертант проводил эксперименты по исследованию автоэмиссионных характеристик катодов из искусственных углеродных материалов, а также исследования изменения электронной структуры методом оже-электронной спектроскопии. Автором изготовлены опытные образцы катодного узла и комбинированного вольфрамографитового анода, исследованы их параметры, проведена оптимизация. Диссертант разработал конструкцию взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с комбинированными электродами из конструкционных графитов.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Работа изложена на 107 страницах, содержит 82 рисунка и 4 таблицы. Список литературы включает 114 наименований на 10 страницах.

Глава 1. Обзор научных исследований и разработок импульсных рентгеновских источников, в основе работы которых лежит явление ВЭЭ.

В 1895 году немецким физиком В. Рентгеном было сделано фундаментальное открытие рентгеновского излучения [9], которое в дальнейшем очень сильно повлияло не только на развитие науки, но и нашло свое применение в различных сферах деятельности человека.

Рентгеновские трубки по типу катодов можно разделить на два вида: термоэмиссионные и взрыво- (авто-) эмиссионные рентгеновские трубки. Разработкой рентгеновских трубок постоянного тока с термоэмиссионными катодами занимаются со времен открытия рентгеновского излучения.

Предпосылки к зарождению холодных катодов, работающих на принципах авто- и взрывоэмиссии были сделаны Лиленфелдом Ю. Е. [10], который занимался поиском источников электронов для миниатюрных рентгеновских трубок. Импульсные взрывоэмиссионные рентгеновские источники получили свое развитие благодаря открытию взрывной эмиссии электронов [11] и разработке генераторов высоковольтных импульсов больших мощностей. Данные трубки характеризуются импульсной мощностью 10 – 100 МВт при токе от 0,1 – 1 кА и длительности импульса менее 100 нс.

1.1 Явления автоэлектронной и взрывной эмиссии электронов.

Процессы, происходящие на катоде при переходе автоэмиссии во взрывную электронную эмиссию.

ВЭЭ – это испускание электронов с поверхности эмиттера (катода) из-за взрыва микроскопического объема на его поверхности. Такой взрыв может быть индуцирован внешним источником, например, лазерным лучом или бомбардировкой поверхности катода заряженными частицами. Другим способом возникновения ВЭЭ является разогрев участка катода током большой плотности. Такой ток бежит при автоэлектронной эмиссии через участки на поверхности катода, где имеется большое усиление электрического поля [12]. ВЭЭ может возникать на плоских эмиттерах при достаточно низких электрических полях $E \sim 10^5$ В/см из-за того, что на их поверхности могут находиться диэлектрические включения, плёнки и микроскопические выступы, а это в свою очередь приводит к значительному снижению работы выхода электронов в отдельных областях поверхности.

В импульсных наносекундных рентгеновских трубках инициирование взрывной эмиссии происходит за счет автоэлектронной эмиссии, ток которой имеет плотность порядка $10^6 - 10^8$ А/см² [13].

Корректное объяснение явления автоэлектронной эмиссии на основе квантово-механического представления о туннельном прохождении электронов через потенциальный барьер на границе металл-вакуум было дано Фаулером и Нордгеймом [14].

Плотность тока автоэлектронной эмиссии j_e определяется следующим выражением:

$$j_e = 1,55 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{e\varphi} \exp\left(-\frac{6,85 \cdot 10^7 (e\varphi)^{3/2}}{E} \theta(y)\right) \quad (1.1)$$

$\theta(y)$ – функция Нордгейма:

$$\theta(y) \approx 0,955 - 1,03y^2 \quad (1.2)$$

$$y = \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0}} \cdot \frac{1}{W_a - W_x} \quad (1.3)$$

где W_a – полная работа выхода, E – напряженность электрического поля.

Если $W_x = W_F$, то $e\varphi = W_a - W_F$ – эффективная работа выхода, W_F – энергия Ферми. Графическое представление функции Нордгейма $\theta(y)$ приводится на рисунке 1.1.

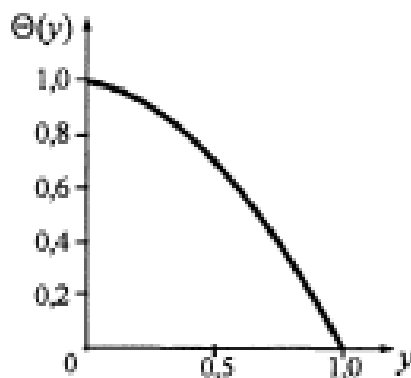


Рисунок 1.1 – Графическое изображение функции Нордгейма.

В работе Проскуровского [13] приведены плотности автоэмиссионного тока для катодов с разными значениями работы выхода (рисунок 1.2).

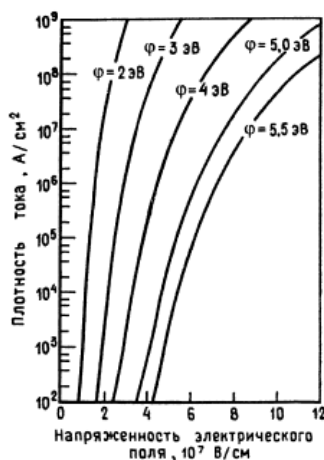


Рисунок 1.2 – Зависимость плотности тока автоэлектронной эмиссии от напряженности электрического поля на катоде при разных значениях работы выхода [13].

Зависимость вида:

$$\lg \frac{j_e}{E^2} = f\left(\frac{1}{E}\right) \quad (1.4)$$

фактически представляет собой прямую линию, экспериментально найдено, что в случае одноэмиттерной системы прямой линией характеризуется и выражение:

$$\lg \frac{i_e}{U^2} = f\left(\frac{1}{U}\right) \quad (1.5)$$

Однако при больших плотностях тока наблюдается отклонение от прямой, связанное с влиянием объемного заряда, как показано на рисунке 1.3.

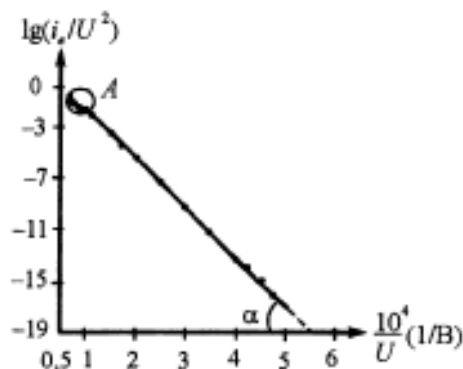


Рисунок 1.3 – Прямая Фаулера-Нордгейма. Наблюдается отклонение от прямой в точке А.

Для автоэлектронной эмиссии коэффициент прозрачности D_{W_x} при туннелировании сквозь этот барьер электрона с энергией W_x есть:

$$D_{W_x} = \exp\left\{-\frac{8\pi}{3eh}\sqrt{2m_e}(W_a - W_x)^{3/2}\frac{\theta(y)}{E}\right\} \quad (1.6)$$

При очень сильных электрических полях $y \rightarrow 1$, а $\theta(y) \rightarrow 0$ тогда прозрачность барьера $D_{W_x} \rightarrow 1$, т.е. происходит полное снятие потенциального барьера. Напряженность электрического поля, при котором происходит полное снятие барьера:

$$E_{кр} = \frac{4\pi\varepsilon_0(W_a - W_x)^2}{e^3} \quad (1.7)$$

Для энергии уровня Ферми $W_x = W_F \rightarrow E_{кр} \approx 10^{10}$ В/м. На практике такая ситуация не реализуема по двум причинам: во-первых, объемный заряд препятствует увеличению внешнего электрического поля [15 – 17], во-вторых, при больших плотностях автоэмиссионного тока происходит нагрев вершины эмиттера за счет джоулевого нагрева, приводящий к его разрушению [18, 19]. Если приложено постоянное электрическое поле, то это приводит к развитию дугового разряда между электродами. Процессы, предшествующие развитию дуги, высокие плотности тока при автоэлектронной эмиссии также рассмотрены в работах Елинсона М. И., Фурсея Г. Н. и других [20 – 23].

Изучение предпробойных явлений возможно только при импульсных напряжениях длительностью порядка $10^{-6} - 10^{-9}$ секунд, при этом наблюдаются процессы ВЭЭ.

Процесс ВЭЭ был изучен Г.А. Месяцем [24, 25], с применением наносекундных генераторов высоковольтных импульсов.

Была найдена связь между временем запаздывания взрыва острия t_3 и плотностью эмиссионного тока j [26, 27] (рисунок 1.4).

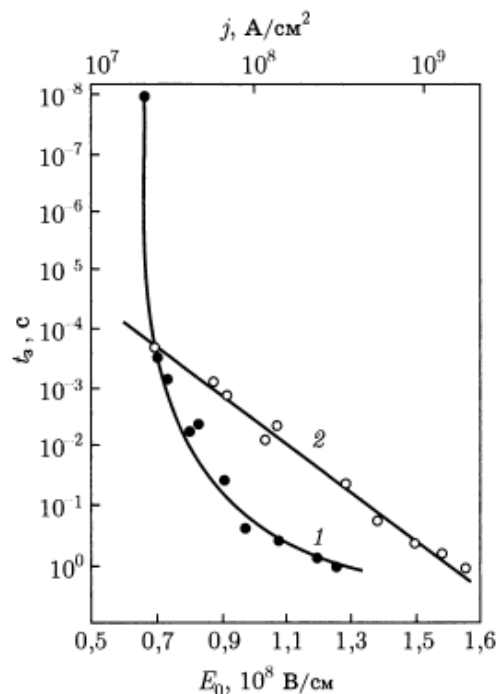


Рисунок 1.4 – Зависимость времени запаздывания взрыва вершины эмиттера от напряженности электрического поля на вершине (1) и от плотности автоэмиссионного тока, предшествовавшего взрыву (2) [11].

Экспериментально установлена зависимость плотности автоэмиссионного тока, предшествующего взрыву острия, и времени запаздывания [11]:

$$j^2 \cdot t_3 = const \quad (8)$$

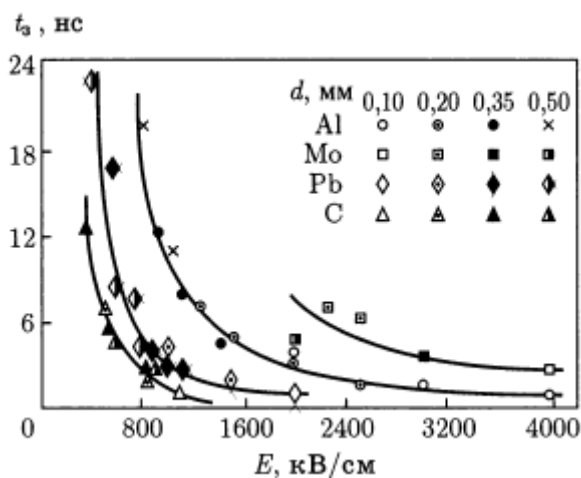


Рисунок 1.5 – Зависимость времени запаздывания пробоя от средней напряженности для разных электродов.

Для плоских электродов из Al, Mo, Pb, C была измерена зависимость времени запаздывания от напряженности электрического поля, как показано на рисунке 1.5.

Из данных зависимостей интерес представляет то, что напряженность, соответствующая пробоем графитового электрода, намного меньше, чем для металлических.

Инициирование ВЭЭ из контакта диэлектрик-металл происходит при электрических полях в несколько раз меньших, чем эмиссия с чистого металла. Это было обнаружено Бугаевым и Месяцем [28] при исследовании импульсного разряда по поверхности диэлектрика. Наличие малого тока автоэлектронной эмиссии в контакте металл-диэлектрик при приложении электрического поля установлено Кофойдом [29]. Обычно в месте контакта присутствует металл, диэлектрик и вакуум, поэтому это место называют тройная точка.

Наличие диэлектрика в вакууме облегчает появление взрывной эмиссии по двум причинам. Во-первых, в контакте металл-диэлектрик имеем место усиление поля, благодаря чему при низких напряжениях появляется автоэлектронная эмиссия [29]. Во-вторых, автоэмиссионные электроны, попавшие на диэлектрик, приводят к образованию новых зарядов за счет различных процессов на диэлектрике: вторичная эмиссия электронов, испарение диэлектрика и ионизация паров, десорбция и ионизация газа и т.д. Например, в работе [30] указывается, что для стеатитовой и форстеритовой керамик происходит уменьшение поля в 6 – 7 раз.

Автоэмиссионные и взрывоэмиссионные катоды из углеродных материалов.

Автоэмиссионные катоды не получили широкого распространения главным образом из-за нестабильной электронной эмиссии. Такие меры, как переход к высокому вакууму, использование материалов, более устойчивых к ионной бомбардировке, попытки уменьшить поток ионов на катод, позволили добиться относительно стабильной работы лишь в ограниченных сферах применения.

Области применения, где плюсы автоэмиссионных катодов оказываются важнее их недостатков [13]: катоды электронных пушек электронных микроскопов, катоды туннельных микроскопов, катоды устройств вакуумной микроэлектроники (гибридные пленочные технологии на одной базе с полупроводниковыми приборами).

Отдельным классом автокатодов можно выделить катоды из различных форм углеродных структур: конструкционные материалы, композитные материалы, углеродные волокна, углеродные пленки [4].

На автоэмиссионную способность наибольшее влияние оказывает поверхностный микрорельеф автокатаода, его шероховатость. В работах [31 – 33] исследованы образцы следующих углеродных материалов: МПГ-6, вспененный пирографит, стеклоуглерод, пироуглерод. Авторами показано, что степень шероховатости в процессе работы для образца из

МПГ-6 увеличилась более, чем в три раза, тогда как для вспененного пирографита шероховатость уменьшилась. Скорость изменения шероховатости зависела от тока автоэмиссии, при большем токе скорость пропорционально возрастала. Это подтверждает то, что на рельеф поверхности очень сильно влияет ионная бомбардировка. Следует отметить, что автоэмиссионный ток растет с увеличением степени шероховатости поверхности, а следовательно происходит появление новых эмиссионных центров.

На работу автокатаода из высокопрочных марок графита влияет формовка, т.е. постепенное увеличение отбора тока. Как объясняет Шешин [4] всплески тока обусловлены отрывом слабосвязанных выступов, за счет ионной бомбардировки и сильного электрического поля. На рисунке 1.6 представлены осциллограммы автоэмиссионного тока из высокопрочного графита марки МПГ-6.

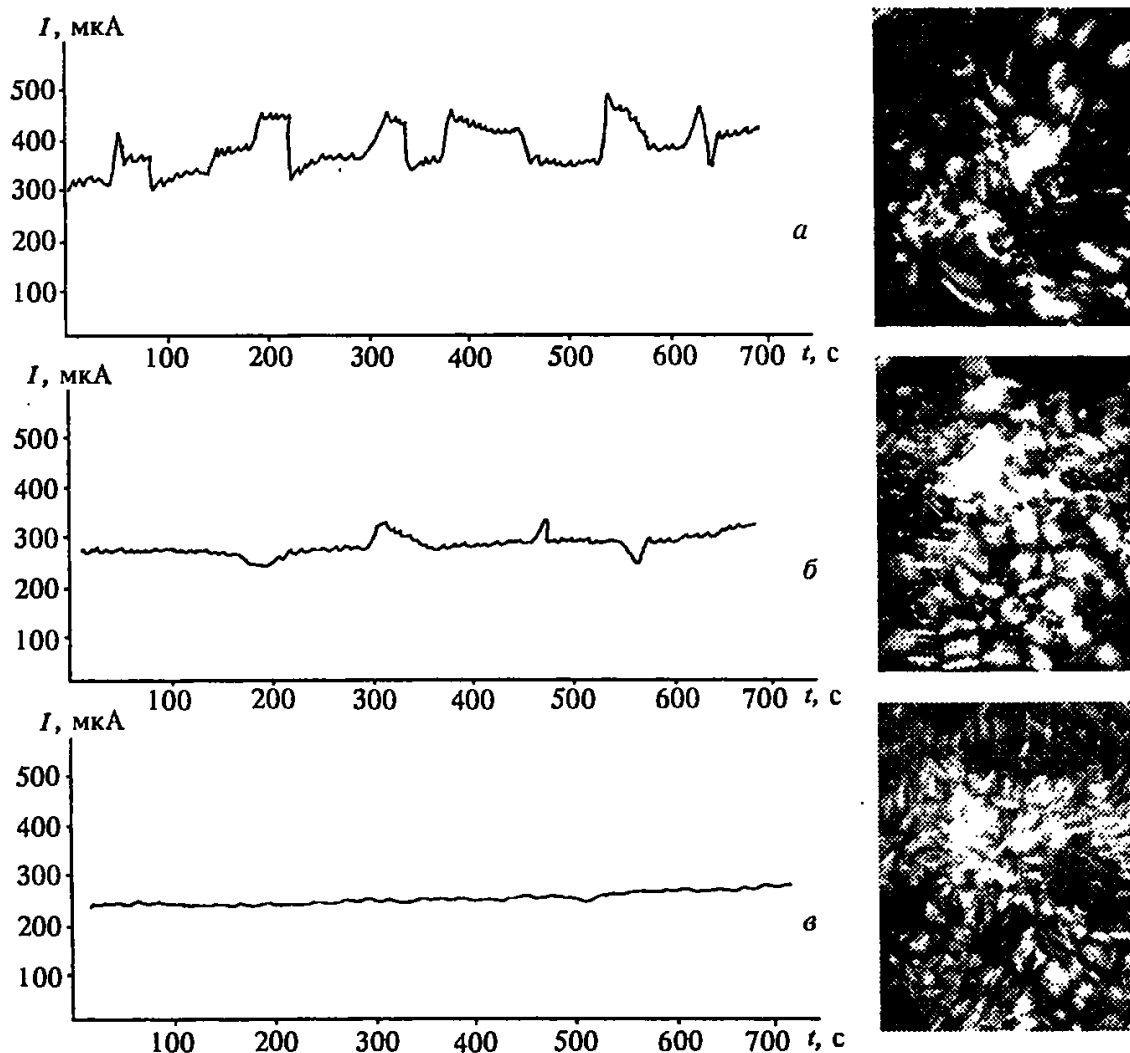


Рисунок 1.6 – Осциллограммы автоэмиссионного тока и автоионные изображения катодов из высокопрочного графита типа МПГ-6: а) неформованный катод; б) формованный катод; в) после формовки и наработки в течение 2 часов [4].

Наличие примесей на поверхности графитового автокатада критически сказывается на отбор автоэмиссионного тока, например, электроэрозионная резка вносит примеси железа, молибдена и др. Оптимальная подготовка поверхности катода заключается в механической обработке и вакуумном отжиге. Далее чистка ионами, либо формовка.

В работе [34] приводится автокатод из графита типа МПГ-6 площадью 1 см^2 . После формовки он стабильно проработал 50 часов при среднем токе 8,7 мА и давлении не хуже 10^{-6} торр. Применяется такой катод для аппаратуры электро-лучевой обработки, где необходимы большие токи [35].

В связи с развитием в последнее время углеродных нанотрубок и графеноподобных структур, очень много работ посвящено изучению их автоэмиссионных свойств. В работе Елецкого [36] приводится обзор по углеродным нанотрубкам (УНТ). Использование УНТ в качестве автоэмиттеров холодных катодов позволяет улучшить характеристики таких приборов, как плоские мониторы, катодolumинесцентные экраны, рентгеновские источники.

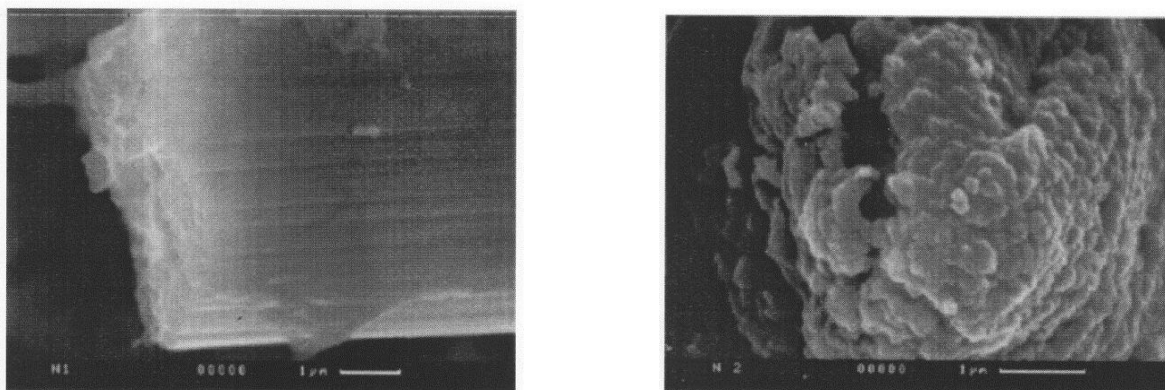
В работах ряда авторов описаны рентгеновские автоэмиссионные трубки, изготовленные преимущественно из наноструктурных углеродных материалов [37 – 39]. Данные трубки являются микрофокусными и маломощными, часто прострельного типа, имеют очень ограниченные и специфические области применения.

Аномально малые напряжения автоэмиссии с нанокластеров углерода (на два – три порядка меньше по сравнению с металлическими эмиттерами) объяснил Форбс Р. [40]. Он утверждает, что это происходит за счет геометрических неоднородностей на поверхности углерода. В работе Фурсея [41] показано, что для нанокластеров углерода нельзя объяснить механизм низкопороговой автоэмиссии чисто геометрическим усилением поля. В своей статье [42] приводит объяснение, опирающееся на механизм резонансного туннелирования электронов сквозь потенциальный барьер.

Только в работах Фурсея и его коллег встречается применение в качестве взрывоэмиссионных катодов углеродных материалов. В статье [42] материалы, выбранные для исследования, состояли из набора агрегатов аллотропных фаз углерода из наноалмазов (sp^3), оригами-графенов (sp^2) и линейных структур (sp). Отмечается, что взрывная эмиссия возбуждается при меньших электрических полях, форма импульса тока повторяет форму импульса напряжения. Авторы объясняют это тем, что эмиссионные центры однородно расположены на поверхности холодного катода.

В качестве катодов для рентгеновских взрывоэмиссионных трубок в работах Фурсея Г.Н. с коллегами [43, 44] также применяются графитовые структуры. Они используют катод, выполненный из графитовой ткани, сплетенной из двух взаимопересекающихся совокупностей нитей углеродного полиакрилонитрильного волокна. Нить содержит несколько сотен волокон

диаметром 7-10 мкм каждое. Заготовка для катода представляет собой монолитный трехмерный материал, образованный множеством слоев ткани, пропитанной пироуглеродом. На рисунке 1.7.a представлена фотография исходной поверхности отдельной нити графитового катода до взрыва; на рисунке 1.7.б представлена фотография поверхности отдельной нити графитового катода после 10^4 включений [44].



а)

б)

Рисунок 1.7 – Фото нити графитового взрывоэмиссионного катода: а) исходная поверхность до взрыва;
б) поверхность отдельной нити графитового катода после 10^4 включений [44].

Отмечу, что после 10^4 импульсов торцевая поверхность графитовой нити крайне сильно оплавлена, соответственно с каждой следующей пачкой импульсов необходимо будет увеличивать напряжение, чтобы возникала ВЭЭ.

Автоэмиссионным исследованиям углеродных материалов посвящено много работ. В основном в этих работах уделяется внимание изучению эмиссии с наноразмерных углеродных образований, которые достаточно сложны в изготовлении. Эти исследования не дали бесспорно положительных результатов, к тому же имеют ограничения по рабочим параметрам: автоэммиттеры остаются требовательными к высокому вакууму, имеется ограничение по отдаваемому току, автокатоды обладают нестабильными эмиссионными характеристиками и недолговечны. Эти требования обусловлены, главным образом, влиянием ионной бомбардировки, которая способствует быстрому разрушению поверхности катода.

В отличие от автоэлектронной эмиссии ВЭЭ из углеродных материалов изучена крайне слабо. В существующих исследованиях рабочие поверхности катодов изготовлены из наноразмерных углеродных материалов. Взрывоэмиссионные катоды из конструкционных графитов практически не исследовались и не применялись в качестве катодов для импульсных рентгеновских трубок, хотя исследования в этом направлении могут быть перспективными. Также инициирование ВЭЭ в тройной точке графит-диэлектрик-вакуум представляет большой интерес, так как, предположительно, это должно привести к более стабильной эмиссии, при меньшей напряженности электрического поля.

1.2 Импульсные высоковольтные питающие устройства РТ с различными типами накопителей энергии.

Явление ВЭЭ открыто и изучено благодаря созданию генераторов высоковольтных импульсов наносекундной длительности. Генераторы одиночных импульсов достигают пиковой мощности до 10^{14} Вт, несколько меньшие мощности получены для импульсно-периодических генераторов. Импульсные генераторы используются для накачки лазеров, получения мощных электронных пучков, СВЧ излучения, также в роли нагрузки для данного типа генераторов может выступать взрывоэмиссионная рентгеновская трубка.

Работа всех генераторов мощных импульсов основана на двух принципах. На первом принципе работают генераторы с накоплением энергии в емкостном накопителе (конденсаторе или формирующей линии), запасенная энергия которого при помощи коммутатора подключается к нагрузке. Такие устройства называют генераторами с замыкателями. Второй принцип состоит в том, что энергия накапливается в индуктивности, а для того чтобы получить электрический импульс, нужно быстро выключить ток в цепи с накопительной индуктивностью при помощи размыкателей [45].

Применительно к рентгеновской технике можно отметить, что развитие силовоточной электроники позволило создать достаточно компактные генераторы рентгеновского излучения. Импульсная мощность достигает значений $10^7 - 10^9$ Вт.

Большинство, выпускаемых промышленностью импульсных рентгеновских аппаратов, имеют генераторы высоковольтных импульсов с емкостными накопителями энергии, в качестве ключа-коммутатора применяется разрядник.

Кратко обратимся к основным схемам данного типа генераторов, чтобы понять принципы их работы и выделить преимущества и недостатки перед генераторами с индуктивными накопителями энергии.

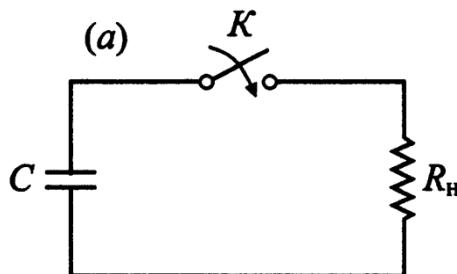


Рисунок 1.8 – Емкостная схема формирования импульсов.

На рисунке 1.8 показана простейшая схема с емкостным накоплением энергии. Если принять, что ключ К идеальный, а сопротивление R_n чисто активное, то напряжение разряда конденсатора, заряженного до напряжения U_0 , будет

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{R_H C}} \quad (1.9)$$

Амплитуда импульса $U_a = U_0$, а длительность импульса на полувысоте $t_{и} = 0,7CR_H$.

На практике переключение ключа из непроводящего состояния в полностью проводящее занимает время, называемое временем коммутации t_k

$$t_k \approx t_\phi = \frac{2,2}{a} \quad (1.9)$$

Где a величина, определяемая физическими процессами, происходящими в коммутаторе.

В рентгеновских генераторах с емкостным накопителем часто применяется схема, где в качестве источника импульсного напряжения используют генератор с трансформатором Тесла.

Трансформатор Тесла содержит два колебательных контура L_1C_1 и L_2C_2 с индуктивной связью (рисунок 1.9). После замыкания коммутатора K в контуре L_1C_1 возникают свободные колебания, которые передаются в контур L_2C_2 . В качестве емкости C_2 обычно используется емкость формирующей линии ускорителя. Для максимальной передачи энергии контуры должны быть согласованы, частоты колебаний должны быть равны:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (1.9)$$

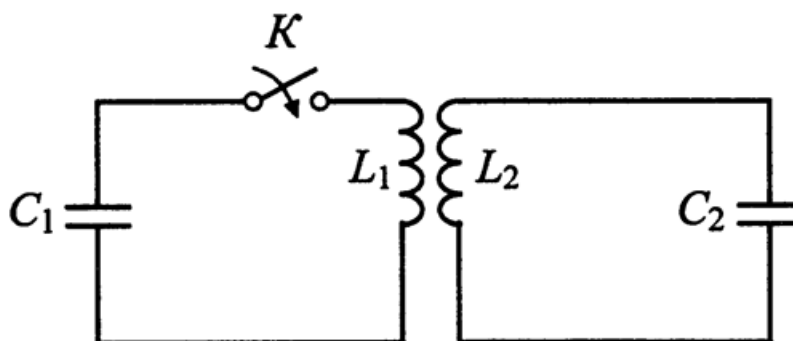


Рисунок 1.9 – Схема трансформатора Тесла.

Максимально возможное значение напряжения U_2 на емкости C_2

$$U_{2\text{макс}} = U_1 \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (1.10)$$

Если $C_1 = n^2C_2$, то на выходе получим умножение напряжения в n раз. Важно, чтобы наибольшее напряжение U_2 достигалось на первом полупериоде биений, тогда будет выше прочность электрической изоляции.

Примером реализации схемы с трансформатором Тесла может служить резонансный импульсный ускоритель РИУС-5, который был предложен Абрамяном, Вассерманом, Печерским и др. [46 – 48].

Часто трансформатор, разрядник и рентгеновская трубка в рентгеновских портативных аппаратах, объединены общим токопроводящим корпусом, заполненным трансформаторным

маслом (рисунок 1.10). Корпус совместно с одним из электродов разрядника образует конструктивный конденсатор, используемый в качестве формирующего конденсатора. Минимальная паразитная индуктивность схемы обеспечивается за счет коаксиального расположения рентгеновской трубки, разрядника и трансформатора. Размеры такого аппарата достаточно малы, масса составляет несколько килограммов.

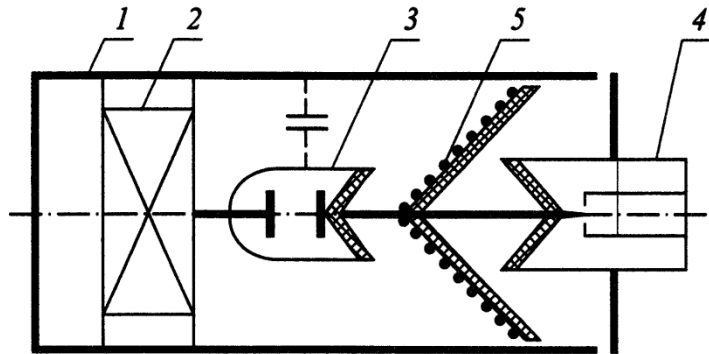


Рисунок 1.10 – Схематический чертеж высоковольтного блока импульсного рентгеновского аппарата для дефектоскопии: 1 – корпус, 2 – трансформатор, 3 – разрядник-обостритель, 4 – рентгеновская трубка, 5 – катушка индуктивности.

Самым небольшим в серии является аппарат МИРА-1Д и имеет напряжение 100 кВ. Следующими в серии являются аппараты МИРА-2Д, МИРА-3Д. Первичные накопительные конденсаторы в них расположены в одном кожухе вместе с высоковольтным блоком, что позволяет расположить блок управления в 20 – 30 метрах от рентгеновского генератора, и сделать работу для оператора практически безопасной. Аппараты МИРА-4Д, МИРА-5Д состоят из 3-х функциональных блоков. В третий блок вынесены первичные накопительные конденсаторы, соединенные по схеме Маркса, это дает повышение напряжения на них до 40 – 50 кВ. Реальный коэффициент передачи в трансформаторах Тесла до 15 – 20, то такие генераторы позволяют получать амплитуду импульса на разряднике 500 кВ.

В областях физики, как высокоскоростная люминесценция, рентгеновская локация, тестирование дефектов излучения и структурный анализ применялись аппараты КВАНТ и ИРА-3 [49], выполненные по единой принципиальной схеме (рисунок 1.11).

Конденсатор C_1 заряжается от сети переменного тока через выпрямитель D_1 и ограничивающий резистор R_1 до напряжения, при котором срабатывает динистор D_2 . После срабатывания динистора конденсатор C_1 разряжается через первичную обмотку импульсного трансформатора Tr_1 . Накопительный конденсатор C_2 через выпрямитель D_3 заряжается до определенного напряжения. Постоянную времени цепочки $C_1 - R_1$ выбирают так, чтобы за один полупериод напряжения сети динистор срабатывал 5-6 раз. Таким образом, накопительный конденсатор C_2 в течение нескольких секунд заряжается до амплитудного значения выходного напряжения импульсного трансформатора. Трехэлектродный управляемый

разрядник P_1 запускает высоковольтный генератор, образованный резонансным трансформатором Тесла Tr_2 , разрядником P_2 и рентгеновской трубкой. За счет импульсной схемы питания удалось уменьшить габаритные размеры и массу зарядного трансформатора, который в данном случае работает на повышенной частоте. Достоинство схемы – возможность ее питания от сухих батарей. Конструктивно аппараты КВАНТ и ИРА-3 выполнены в виде портативного рентгеновского блока, соединенного с выносным пультом управления кабелем. В обоих аппаратах использованы рентгеновская трубка типа ИМА1-150П и разрядники-обострители с напряжением срабатывания 100 кВ (КВАНТ) и 150 кВ (ИРА-3).

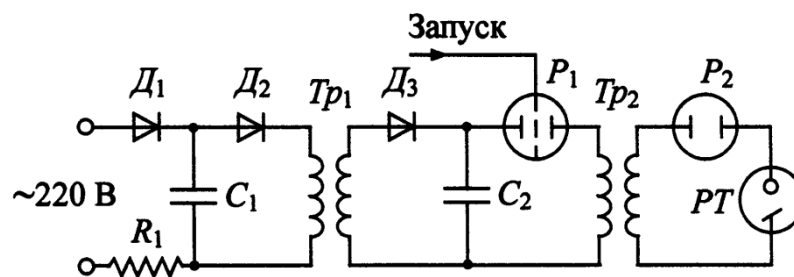


Рисунок 1.11 – Принципиальная электрическая схема аппаратов КВАНТ, ИРА-3.

В [50] описан диагностический импульсный рентгеновский аппарат «ДИНА-1».

С помощью этого прибора получены рентгенограммы конечностей. В этом аппарате с тем же высоковольтным блоком, что и в аппарате КВАНТ, использована острофокусная рентгеновская трубка типа ИМА-6, работающая на принципе ВЭЭ. Диаметр эффективного фокусного пятна не превышает 2 мм, что обеспечивает вполне приемлемую четкость рентгеновских снимков большинства органов.

На импульсной установке типа МИРА-5Б/1 достигнуто напряжение на рентгеновской трубке 600 кВ. В данной установке также использован трансформатор Тесла. Благодаря использованию схемы Маркса стало возможным вдвое увеличить напряжение на входе генератора импульсных напряжений без изменения зарядного напряжения. Таким образом, установка включает в себя высоковольтный блок, генератор Маркса, блок синхронизации и пульт управления [49].

Однако, рентгеновские генераторы с емкостными накопителями энергии не нашли применения в медицинской диагностике из-за малой выходной мощности, которая ограничена несколькими сотнями Ватт.

Но что касается дефектоскопии то, на данный момент лидирующие позиции на рынке дефектоскопов занимают импульсные рентгеновские аппараты серии АРИНА [51] производства «Спектрофлеш». Все они выполнены по принципиальной схеме, представленной на рисунке 1.12. В патенте [52] представлен импульсный генератор подобного типа.

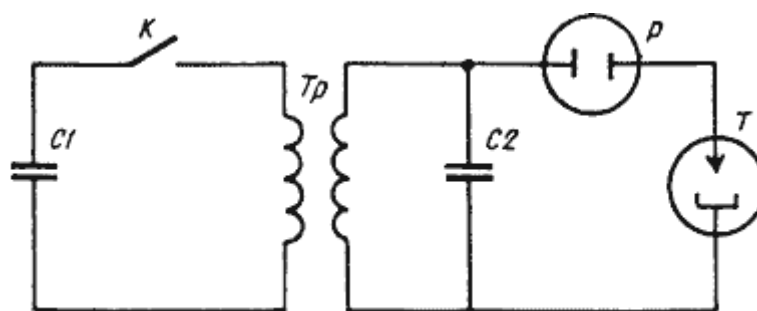


Рисунок 1.12 – Принципиальная схема аппаратов серии АРИНА
 С1 – накопительный конденсатор; К – ключ (первичный коммутатор);
 Тр – импульсный трансформатор; С2 – разрядная емкость;
 Р – разрядник-обостритель; Т – рентгеновская трубка.

В таблице представлена линейка выпускаемых дефектоскопов [53].

Таблица 1.1 Характеристика импульсных рентгеновских аппаратов серии АРИНА

Модель	АРИНА-1	АРИНА-3	АРИНА-7	АРИНА-9
Рабочее напряжение, кВ	150	200	250	300
Доза на расстоянии 500 мм за 1,5 мин., мР	500	600	1000	1200
Фокусное пятно, мм	2,5	2,5	2,5	2,5
Частота следования импульсов, Гц	8	10	10	10
Максимальная просвечивающая толщина по стали с применением свинцовой фольги, мм	25	30	40	50
Напряжение питания, В	–	≈230/=24	≈230/=24	≈230/=24
Потребляемая мощность, Вт	120	150	250	250
Вес излучателя, кг	8,9	5,5	7,9	8,1
Вес блока питания, кг	1	5	6,8	5,5

Этот же производитель заявляет, что последняя серия импульсных аппаратов, которые уже выпускаются, или готовятся к выпуску, содержит 3 модели, получившие общее название ПАМИР. Они мощнее, несколько легче, а главное, обладают большим ресурсом по сравнению с широко известными дефектоскопами серии АРИНА.

Схемы генераторов с емкостными накопителями для портативных рентгеновских аппаратов являлись приоритетными до появления твердотельных прерывателей тока – SOS-диодов [2], и разработке на их основе высокочастотных генераторов с индуктивными накопителями энергии. На основе твердотельных полупроводниковых прерывателей тока, появилась качественно новая мощная импульсная техника, которая имеет практически неограниченный срок службы. Мощные частотные прерыватели способны отключать килоамперные токи и выдерживать напряжения порядка 10^6 В.

Разработаны рентгеновские аппараты с использованием импульсных генераторов с обрывом тока на основе SOS-диодов и магнитных ключей. Напряжение на трубке составило 120 кВ, длительность импульса 15 – 25 нс при частоте следования импульсов порядка нескольких кГц [1]. Тогда как частота следования импульсов в рентгеновских аппаратах с емкостными накопителями не превышает сотен Герц.

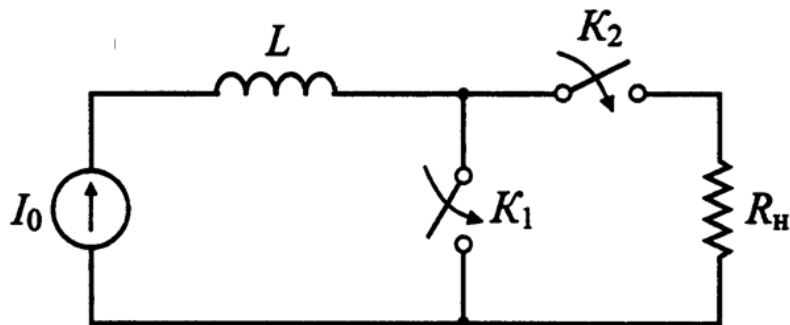


Рисунок 1.13 – Индуктивная схема формирования импульсов.

На рисунке 1.13 представлена схема с индуктивным накоплением энергии. В ней имеется генератор тока I_0 с нулевым внутренним сопротивлением. Если ключ K_1 идеальный, то при его размыкании напряжение на его зажимах подскочит до бесконечности. На практике, конечно, такой случай не реализуется. Во-первых, вместо генератора тока I_0 включают конденсатор с емкостью C , заряженный до напряжения U_0 , а размыкание ключа K_1 происходит в максимуме тока. Ключ K_2 коммутирует нагрузку R_n и индуктивность L . Во-вторых, размыкающий ключ не бывает идеальным, у него всегда есть возрастающее во времени сопротивление.

Принципиальные отличия механизма обрыва тока в SOS-прерывателях от прерывателей с меньшими плотностями тока, например, от дрейфовых диодов с резким восстановлением [54], заключаются в следующем. Во-первых, в SOS-прерывателях область с низкой проводимостью возникает в сильнолегированной р-области, где плотность тока составляет килоампер на

квадратный сантиметр. Во-вторых, на стадии обрыва тока в диоде остается существенное количество плазмы, и момент обрыва тока не связан с равенством заряда внесенного в структуру в положительной полуволне, и удаленного в отрицательной, что принципиально для дрейфовых диодов с резким восстановлением.

После открытия SOS эффекта и разработки первых мощных генераторов стала очевидной возможность построения качественно новых мощных наносекундных импульсных устройств, отличие которых от традиционных заключается в полностью твердотельной системе коммутации энергии при использовании магнитных ключей. Магнитный ключ – это коммутатор, основанный на эффекте резкого уменьшения индуктивности магнитного дросселя при насыщении его сердечника. Главное преимущество магнитного ключа по сравнению с газоразрядными коммутаторами заключается в том, что это твердотельный коммутатор, в связи с чем он характеризуется большим сроком службы, надежностью и способностью работать с высокой частотой следования импульсов до 20 кГц.

Схемная идеология такого подхода в виде блок-схемы представлена на рис. 1.14 [45]. Тиристорное зарядное устройство (ТЗУ) осуществляет дозированный отбор энергии из питающей сети. Из ТЗУ энергия переходит в магнитный компрессор (МК) при напряжении несколько кВ за время 10-100 мкс. МК сжимает энергию во времени до величины порядка нескольких сотен нс и повышает напряжение до 10 – 100 кВ. SOS-диод выступает как оконечный усилитель мощности, переводя энергию в диапазон времени 10-100 нс, при этом напряжение повышается в 2-3 раза.

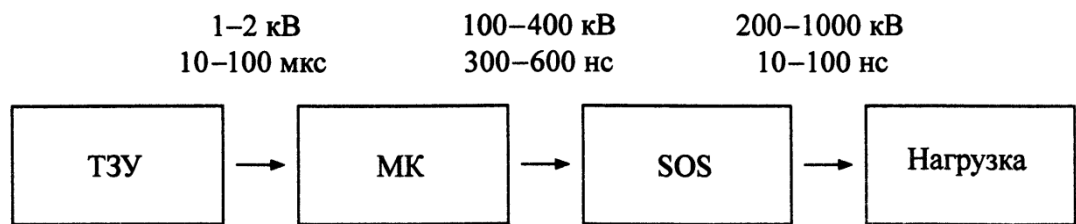


Рисунок 1.14 – Блок схема построения генераторов с полностью твердотельной системой коммутации энергии.

Параметры импульсов на выходе МК определяются условиями работы полупроводникового прерывателя и параметрами импульса, которые нужно получить в нагрузке. Амплитуда импульса на выходе МК $U_{МК} = U_n / K_U$, где K_U - коэффициент перенапряжения при отключении тока прерывателем, а U_n – требуемая амплитуда импульса на нагрузке.

Схемная реализация, при передаче энергии от МК к полупроводниковому прерывателю, является важным вопросом. Одна из распространенных схем двухконтурной накачки

прерывателя в режиме усиления обратного тока. Такое решение было независимо предложено в работах [55, 56]. Схема согласования приведена на рис. 1.15.

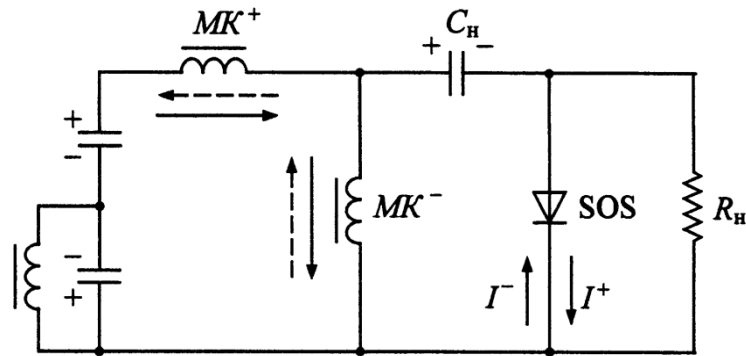


Рисунок 1.15 – Схема согласования МК и SOS.

Между выходом магнитного компрессора и прерывателем вводятся конденсатор обратной накачки C_n и магнитный ключ обратной накачки MK^- (либо импульсный трансформатор). После насыщения ключа прямой накачки MK^+ энергия из последней ячейки компрессора переводится в конденсатор C_n . Ток I^+ заряда конденсатора C_n также является током прямой накачки прерывателя тока SOS (рис. 1.16). Нарастающим напряжением на C_n перемагничивается ключ MK^- . После его включения в прерыватель вводится обратный ток I^- , превышающий I^+ в несколько раз, и энергия из C_n переводится в индуктивность контура обратной MK^- . После обрыва тока прерывателем энергия передается в нагрузку в виде короткого наносекундного импульса.

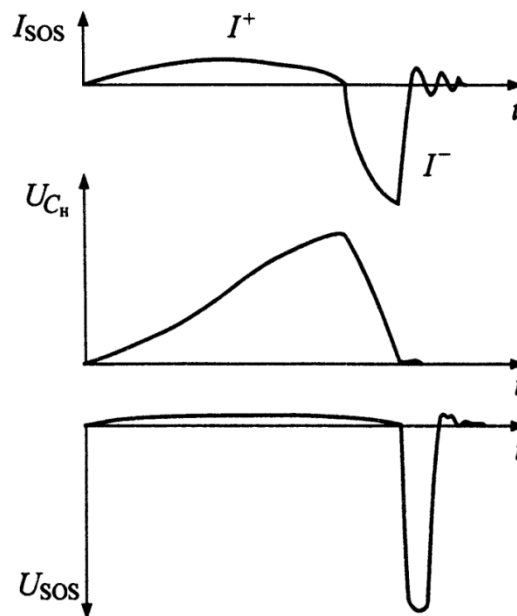


Рисунок 1.16 – Эпюры токов и напряжений в схеме согласования МК и SOS.

Таким образом, генераторы высоковольтных импульсов с индуктивными накопителями энергии и твердотельными прерывателями тока позволяют получать среднюю выходную

мощность на порядок большую, чем аппараты с емкостными накопителями. Разработка импульсных рентгеновских источников с генераторами данного типа является очень перспективной.

1.3 Конструкции импульсных рентгеновских трубок

Переход к напряжениям наносекундной длительности привел к сокращению веса и размера рентгеновских источников. Денхольд [57] показал, что при импульсах с крутизной переднего фронта 10^{14} В/с изолятор рентгеновской трубки на напряжение 2,3 МВ может работать при средней напряженности электрического поля около 80 кВ/см.

Для разных типов импульсных рентгеновских источников разработаны специальные взрывоэмиссионные рентгеновские трубки, которые имеют уникальные конструктивные особенности и обладают существенно меньшими габаритами, чем РТ накаливаемого типа, применяемые в рентгеновских аппаратах постоянного тока.

Первая двухэлектродная трубка с холодным катодом отмечена в работе [58]. Трубка была разборная, находилась под постоянной откачкой, имела конический заостренный анод и полый конический катод с острыми кромками. Трубка подобного вида представлена на рисунке 1.17.

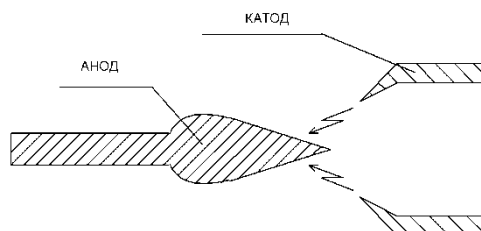


Рисунок 1.17 – Двухэлектродная трубка с холодным катодом. [59]

Трубка, описанная в [60], была трехэлектродной отпаянной, имела плоский вольфрамовый анод и фокусирующую катодную головку с щелью, в которой помещали холодный катод. Края этой щели выполняли роль поджигающего электрода. В работе Шаафса [61] представлена одна из первых трехэлектродных рентгеновских трубок. Конструкция с трехэлектродной системой, в которой анод выполнен в виде заостренного конуса с полым катодом и поджигающим электродом, показана на рисунке 1.18.

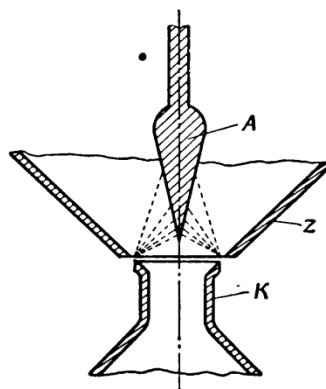


Рисунок 1.18 – Разрядный промежуток трубки триодного типа. А – анод, К – катод, Z – поджигающий электрод. [59]

Авторы Цукерман и Манакова [62] модернизировали трубки в целях получения более стабильной эмиссии. Между поджигающим электродом и катодом вводили диэлектрик для стабилизации возбуждения поджигающей искры, это также увеличивало количество образующейся плазмы в промежутке.

Среди достоинств трехэлектродных трубок можно отметить следующие. Во-первых, благодаря введению третьего электрода можно понизить анодное напряжение трубки и управлять моментом возникновения рентгеновской вспышки, что дает возможность синхронизировать ее появление с соответствующей фазой исследуемого процесса. Во-вторых, повышается стабильность параметров вспышки (интенсивность, спектральный состав, длительность) в периодическом режиме работы. В-третьих, если сдвигать моменты подачи импульсов на управляющий электрод и анод относительно друг друга, можно регулировать ток в трубке [49].

Однако, трехэлектродные трубки имеют недостатки. Во-первых, недостаточен ресурс их системы поджига. Во-вторых, необходим дополнительный источник питания, для поджигающего электрода.

Переход на простые двухэлектродные трубки, стал возможен благодаря разработке схем формирования высоковольтных импульсов с обостряющим разрядником [63 – 65]. Характерные времена коммутации с помощью разрядников обеспечивали скорости нарастания напряжения на уровне 10^{14} В/с, соответственно, двухэлектродные рентгеновские трубки разработаны под данные требования.

В современной импульсной рентгеновской аппаратуре применяют в большинстве случаев двухэлектродные отпаянные трубки. Импульсные трубки имеют коаксиальную или плоскую систему электродов. В приборах коаксиального типа анод выполняется конической формы, изготовленный чаще всего из вольфрама. Для трубок плоской конструкции применяется прострельный анод, выполненный из тантала, либо вольфрама.

В трубках коаксиального типа проще обеспечить фокусное пятно малых размеров, необходимое для получения геометрической резкости. Поскольку анод выполнен в виде усеченного конуса. На рисунке 1.19 представлена трубка коаксиальной конструкции на напряжение 320 кВ типа ИМА5-320Д, предназначенная для дефектоскопических целей. Используется в аппаратах МИРА-3Д.

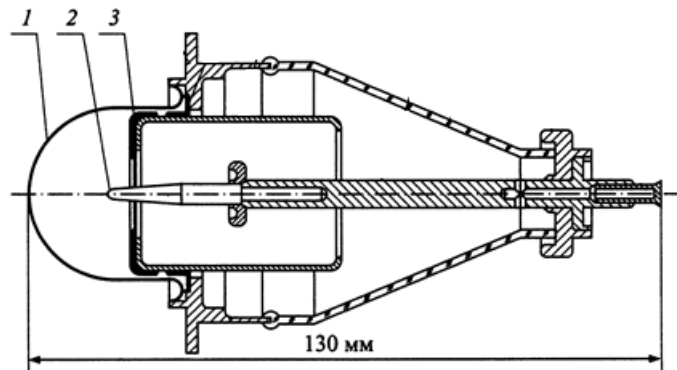


Рисунок 1.19 – Схема импульсной рентгеновской трубки ИМА5-320Д. 1 – окно, 2 – анод, 3 – катод.

Импульсные трубки плоской конструкции характеризуются большим размером фокусного пятна. Есть и острофокусные, например, малогабаритная острофокусная трубка с лезвийным катодом ИМА2-150Д, показанная на рисунке 1.21. Катод этой трубки выполнен из вольфрамовой трубки диаметром 2 мм и толщиной стенки 0,2 мм.

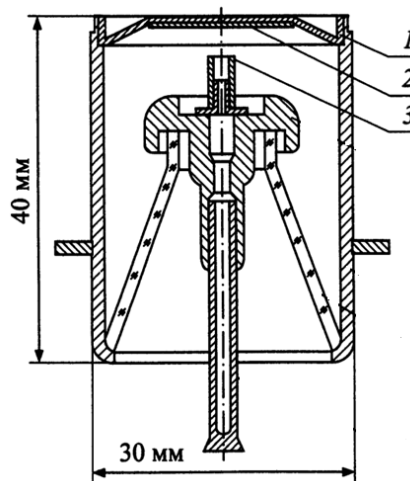


Рисунок 1.20 – Схема импульсной трубки плоской конструкции ИМА2-150Д.
1 выходное окно, 2 анод, 3 катод.

Применение импульсных взрывоэмиссионных рентгеновских аппаратов в медицине, дефектоскопии и досмотровой технике устанавливает высокие требования к рентгеновским трубкам. Важными параметрами являются: мощность (интенсивность или доза), размер эффективного фокусного пятна, стабильность работы, долговечность. В основном применяются трубки с коаксиальной системой электродов.

В промышленных аппаратах «Арина», «Пион» и «Шмель» для дефектоскопических исследований применяется описанная Морговским и Пеликсом импульсная трубка [66]. Она состоит из цилиндрического корпуса с фланцем, соединенным с лезвийным катодом, выполненном в виде шайбы, внутренняя кромка которой охватывает острый анод. Изолятор выполнен в виде полого усеченного конуса, большее основание которого соединено с корпусом, а меньшее – с выводом анода.

Недостатком данной трубки является плохой теплоотвод с электродов, из-за чего снижается средняя выходная мощность.

В работе [67] представлена импульсная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка, которая состоит из корпуса, изолятора и анода с катодом, выполненных из тантала.

Тантал по сравнению с другими материалами обладает низкой работой выхода, что позволяет увеличить интенсивность излучения на 10 – 15 %. К недостаткам данной трубки относят низкий ресурс стабильной работы при напряжении на аноде, меньше 200 кВ.

РТ близкая к описанной импульсной трубке приведена в патенте Меркулова [68]. Импульсная рентгеновская трубка со взрывной эмиссией, содержащая выполненные из тантала анод и катод, отличающаяся тем, что катод выполнен из вольфрама, температура плавления которого больше, чем температура плавления материала анода. Авторы утверждают, что удастся сохранить воспроизводимость эмиссии от импульса к импульсу при более низком напряжении. Повышается долговечность, сохраняются рентгентехнические параметры. Авторы патента поясняют, что в процессе работы происходит перепыление тантала с анода на лезвийную поверхность вольфрамового катода. Данную трубку можно использовать в медицинских целях.

К недостаткам такой конструкции я бы отнес то, что танталовый анод имеет существенные ограничения по тепловой нагрузке и ограничивает выходную мощность трубки, т.к. его температура плавления ниже, чем у вольфрама. Однако авторы не указывают на данный недостаток.

Описанные взрывоэмиссионные рентгеновские трубки характеризуются небольшими мощностями, их рабочие частоты ограничены десятками герц, при увеличении частоты следования импульсов, происходит быстрая деградация электродов рентгеновской трубки, ресурс работы значительно уменьшается.

В работе [69] описана импульсная трубка, для которой достигнуто повышение пространственной равномерности, стабильности от импульса к импульсу, качества рентгеновского излучения и снижение скорости роста питающего напряжения.

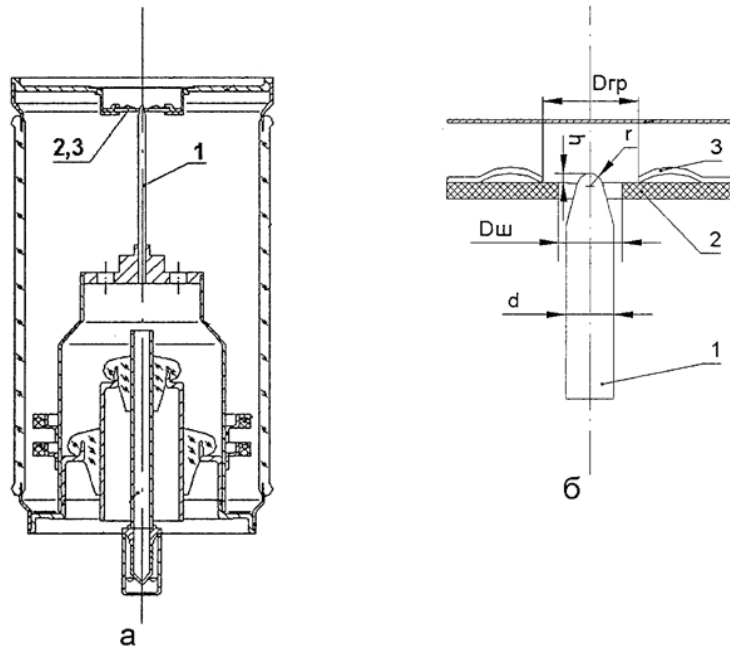


Рисунок 1.21 – Рентгеновская трубка с метало-диэлектрическим катодом: а) разрез, б) катод под увеличением; 1 – анод, 2 – диэлектрическая часть катодного узла, 3 – металлическая часть катодного узла.

Результат достигается за счет того, что на взрывоэмиссионный катод, выполненный в виде шайбы из термостойкого диэлектрика, накладывается гребенка, образованная металлической шайбой, имеющей радиальные прорезы, расходящиеся от центра, с внутренним диаметром большим, чем внутренний диаметр диэлектрической шайбы. Кончики зубцов гребенки имеют пружинящие контакты с торцевой плоскостью диэлектрической шайбы, причем контактный узел гребенки с диэлектрической шайбой обращен в сторону выходного окна (рисунок 1.22). Анод выполнен в виде стержня или конуса, оканчивающегося полусферой, и выступает за плоскость сечения, перпендикулярного оси трубки.

Для РТ, описанной в патенте [7], удалось достичь мощности свыше 1 кВт и работе на частоте до нескольких кГц с сохранением пространственной равномерности, стабильности рентгеновских вспышек от импульса к импульсу. Результат достигается за счет того, что анод выполнен в виде стержня с конусообразным окончанием, на цилиндрическую поверхность которого напрессован радиатор в виде цилиндра из материала с высокой теплоемкостью и температуропроводностью. Взрывоэмиссионный катод выполнен в виде керамической шайбы и металлического кольца, находящихся в механическом контакте с целью формирования тройной точки (металл-вакуум-диэлектрик), обеспечивающей высокую плотность тока эмиссии (рисунок 1.23).

Фурсей Г.Н. с коллегами занимается разработкой взрывоэмиссионных катодов из наноразмерных кластеров углерода [42 – 44]. Стабильность работы обеспечивается за счет того, что в процессе взрывной эмиссии образуются нановыступы равномерно расположенные на

катоде. Такие катоды могут работать при частоте свыше 1 кГц и около 10^6 импульсов. Однако, ничего не говорится о том, как такую тепловую нагрузку выдерживает анод, а представленный катод после 10^4 импульсов имеет оплавленную поверхность (рисунок 1.7.б), и, по-видимому, эмиссионная стабильность не могла остаться неизменной, т.к. поверхность катода претерпела существенные изменения. Представленный аппарат с рентгеновской трубкой, в которой используется катод из графитовых нанокластеров работает при напряжениях 15 – 60 кВ.

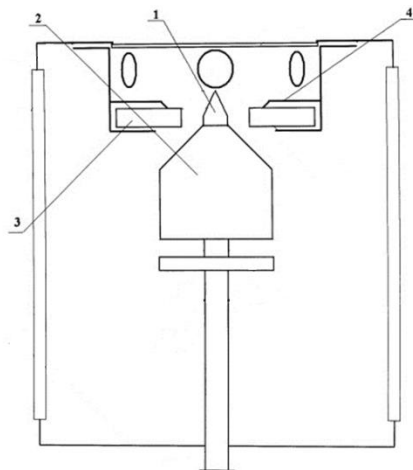


Рисунок 1.22 – Взрывоэмиссионная рентгеновская трубка с медным радиатором: 1 – анод, 2 – медный радиатор, 3 – диэлектрическая часть катодного узла, 4 – металлическая часть катодного узла.

1.4 Выводы по главе

Проблеме создания автоэмиссионных рентгеновских трубок, в частности, с холодными катодами из наноструктурных форм углерода, уделено большое внимание в работах ряда ученых. Однако, автоэмиссионные рентгеновские трубки имеют малую мощность, работают в условиях высокого вакуума для уменьшения деградации вследствие ионной бомбардировки, ограничены по эмиссионному току, недолговечны и могут быть применены в весьма узких областях науки и техники.

В отличие от автоэмиссии взрывная эмиссия из углеродных материалов изучена крайне слабо. В имеющихся исследованиях рабочие поверхности катодов изготовлены из наноразмерных углеродных материалов. Работ, связанных с использованием конструкционных высокопрочных графитов в качестве электродов для взрывоэмиссионных РТ, не проводилось.

Интересным для изучения является взрывная эмиссия с конструкционных марок графита. Это обусловлено тем, что графит обладает низкой пороговой напряженностью электрического поля, при которой начинает течь автоэмиссионный ток, и как следствие ВЭЭ может быть инициирована при меньших скоростях нарастания напряжения.

Рентгеновские генераторы с емкостными накопителями энергии и разрядниками-обострителями обладают низкой частотой следования импульсов ограниченной десятками Гц,

нестабильностью срабатывания разрядника по напряжению, а также отсутствием возможности регулировать напряжение на трубке. По этим параметрам данные генераторы уступают другому типу генераторов, генераторам с индуктивными накопителями энергии и твердотельными коммутаторами – SOS-диодами. Эти генераторы имеют частоту следования импульсов десятки кГц, хорошую стабильность рентгеновского излучения, и, как мы предполагаем, на данных генераторах можно реализовать регулировку напряжения включения РТ путем изменения скорости нарастания напряжения.

В разработке импульсных взрывоэмиссионных трубок на данный момент достигнуты следующие характеристики: мощность до 1,6 кВт, число включений свыше 10^6 импульсов, частота следования импульсов до 4 кГц, при эффективном фокусном пятне 1,7 мм. Для высокочастотных трубок, которые являются нагрузкой для высоковольтных генераторов с индуктивными накопителями, применяется катод в виде металлической шайбы расположенной на диэлектрической подложке, что позволяет генерировать стабильную эмиссию при скорости нарастания напряжения не менее 10^{13} В/с. Аноды для рассеивания большой мощности делают из тугоплавкого материала (в основном вольфрам) в виде массивного стержня с конусом на конце и с применением радиатора, расположенного на цилиндрической части анода, из хорошо проводящего тепло материала (часто медь).

Импульсные рентгеновские источники с высоковольтными генераторами с индуктивными накопителями по своим массогабаритным характеристикам превосходят аппараты постоянного тока, сравнимы по ресурсу работы и качеству получаемых рентгеновских изображений. Однако, по выходной мощности, рассеиваемой на аноде, импульсные аппараты уступают аппаратам постоянного тока, что сужает области их применения.

Как следствие, для взрывоэмиссионных РТ, применяемых в рентгеновских источниках с генераторами высоковольтных импульсов, разработанных по схеме с индуктивным накопителем энергии, существует необходимость повышать стабильность эмиссионного тока и мощность, рассеиваемую на аноде.

Глава 2. Разработка графитокерамического катода для импульсной наносекундной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки.

В работах Шешина Е.П. [4] показано, что в качестве автоэмиссионных катодов могут быть перспективны высокопрочные конструкционные графиты. Автор с коллегами экспериментально сравнил, как меняется шероховатость поверхности для образцов высокопрочного графита МПГ-6, стеклографита, графитизированного пироуглерода, вспененного пирографита после работы в качестве автоэмиттеров [32]. В результате исследования степень шероховатости для образца из МПГ-6 возросла в несколько раз после работы автоэмиттером в течение 2 часов, тогда как для других образцов этот параметр либо слабо изменился, либо, как в случае вспененного пирографита, уменьшился. Ток автоэмиссии экспоненциально зависит от степени шероховатости поверхности, поэтому для создания автоэмиссионного катода оптимально подходит высокопрочный графит МПГ-6. К тому же авторы экспериментально установили, что вольт-амперная характеристика для автокатада из МПГ-6 смещена в область меньших напряжений по сравнению с другими исследованными материалами.

Для исследования эмиссионных свойств с целью определения оптимального материала для взрывоэмиссионного катода выбраны марки промышленных высокопрочных графитов близких по своим физическим свойствам описанному графиту типа МПГ-6: мелкозернистый прочный графит (МПГ-7), мелкозернистый графит (МГ), графит электродный (ГЭ), графит полученный изостатическим прессованием (GS-1800), графит малозольный (ГМЗ). Эмиссионные свойства и стабильность работы данных графитов могут отличаться, вследствие того, что они имеют различную зернистость, плотность. Данные марки графита широко применяются в промышленности, хорошо поддаются обработке, подходят для использования в вакууме.

Авто- и взрывоэмиссионные процессы сильно зависят от поверхностной структуры катода. Во время работы холодного катода одним из основных факторов, влияющим на изменение поверхности и как следствие эмиссионного тока, является бомбардировка поверхности катода ионами остаточных газов, которые образуются в промежутке катод-анод и под действием электрического поля ускоряются в сторону эмиттера. Свойства поверхности, влияющие на эмиссионные характеристики, определяются электронной структурой поверхностных атомов на глубине 1-2 нм. Исходя из этого, для исследования изменения электронной структуры поверхности эмиттера до и после работы в качестве холодного катода выбраны поверхностные методы анализа такие, как оже-спектроскопия и РФЭС.

В главе исследована зависимость работы автоэмиссионных катодов из конструкционных графитов указанных марок при разных давлениях газа в рабочей камере. Изучение автоэмиссионных характеристик обусловлено той причиной, что именно автоэмиссионный ток большой плотности инициирует ВЭЭ в двухэлектродных импульсных рентгеновских трубках. Основными критериями для выбора материала катодов являются, во-первых, устойчивость к ионной бомбардировке, поскольку ионная бомбардировка является одним из основных факторов, влияющих на изменение состояния поверхности эмиттера, во-вторых, стабильность тока автоэмиссии. После изучения автоэмиссионных характеристик катодов и анализа спектров выбран материал, на основе которого разработан и исследован взрывоэмиссионный катод для импульсной рентгеновской трубки.

2.1 Исследование эмиссионных характеристик конструкционных марок графита.

Экспериментальная установка. Для изучения стабильности работы автоэмиссионных катодов из искусственных углеродных материалов модернизирована экспериментальная установка на базе оже-спектрометра LAS-2000 фирмы RIBER [70]. Откачка данной системы производится магниторазрядным насосом с титановыми сублиматорами, в аналитической камере достигается вакуум не хуже 10^{-10} торр. Можно регулировать давление в пределах 10^{-10} – 10^{-5} торр, применение безмасляной откачки повышает точность и достоверность полученных экспериментальных результатов [71].

Для исследования автоэмиссионных характеристик в установке LAS-2000 была смонтирована измерительная ячейка. Система для регистрации, как автоэмиссионных характеристик, так и оже-спектров полностью автоматизирована. Управление экспериментальной установкой, сбор и обработка полученных данных производятся с помощью персонального компьютера (ПК). Таким образом, экспериментальная установка модернизирована под комплексные исследования эмиссионных характеристик и изучение поверхности эмиттеров [72]. Для подготовки образцов к исследованию применяется ионное травление и прогрев до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

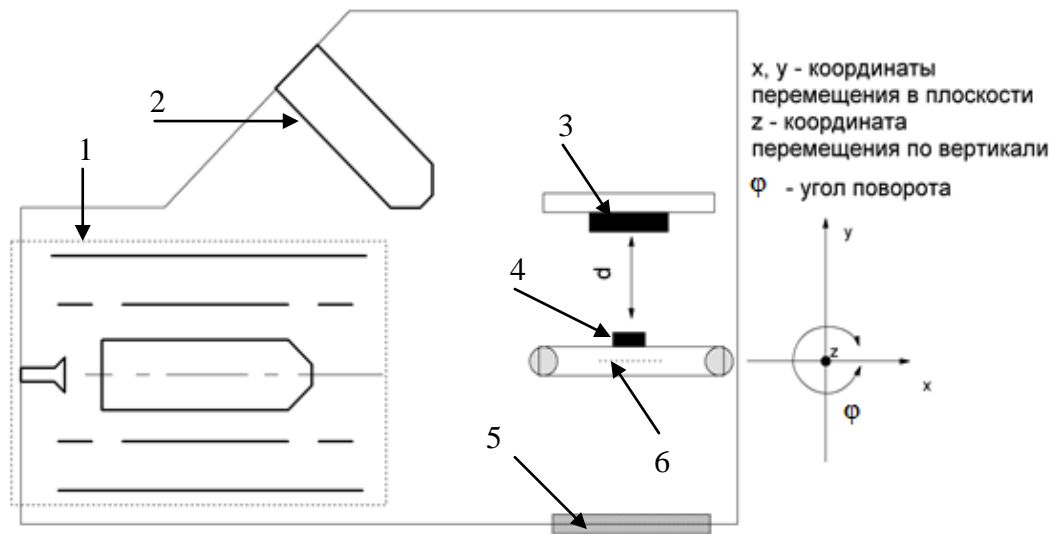


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки для изучения автоэмиссионных характеристик и поверхности эмиттеров.

1. энергоанализатор типа цилиндрическое зеркало с электронной пушкой вдоль оси и детектором, необходимые для Оже-спектроскопии; 2. ионная пушка, 3. анод; 4. катод; 5. смотровое окно; 6. нагревательная спираль.

Схема установки представлена на рисунке 2.1. На данной установке проводится комплекс исследований без извлечения образца на воздух:

1. Исследование автоэмиссионных характеристик искусственных углеродных материалов;
2. Изучение модификации поверхности под действием ионной бомбардировки методом Оже-спектроскопии.

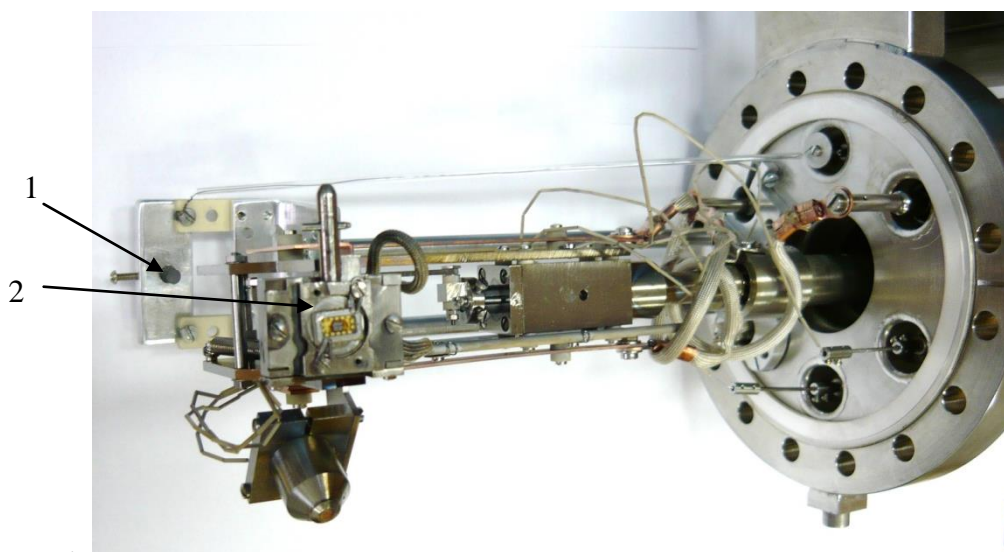


Рисунок 2.2 – Манипулятор с анодом. 1 – анод, 2 – катододержатель.

Анододержатель закреплен на неподвижных стержнях к фланцу с манипулятором,

изоляция между анододержателем и корпусом обеспечивается за счет вставок, выполненных из керамики. Фотографии манипулятора с установленным на нем анодом приведены на рисунках 2.2 и 2.3 соответственно.

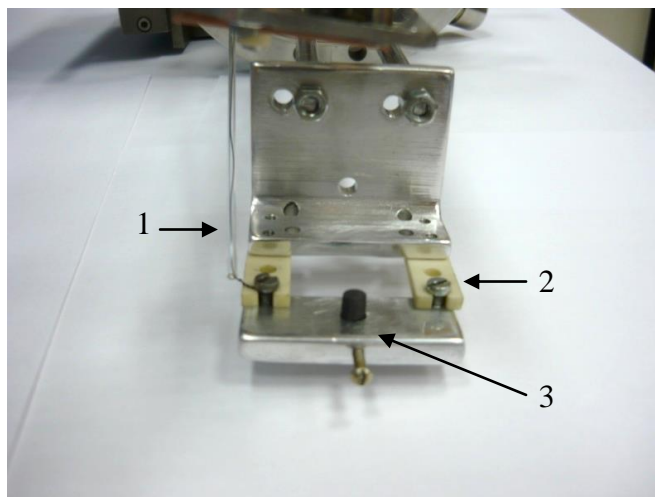


Рисунок 2.3 – Анод экспериментальной ячейки.

1. высоковольтный провод в стеклянном изоляторе; 2. керамический изолятор между корпусом и анодом; 3. анод из реакторного графита.

Рабочая поверхность катода из искусственных углеродных материалов представляет собой диск диаметром 4 мм, который зафиксирован в держателе (рисунок 2.4) при помощи медной пластины. Поверхность образца отшлифована, для очистки поверхности образца от адсорбированных газов производится его прогрев до 400 °С при давлении 10^{-8} торр.



Рисункок 2.4 – Катод из искусственных углеродных материалов в держателе.

Манипулятор позволяет позиционировать исследуемый образец в трех плоскостях и вращать в горизонтальной плоскости. Это дает возможность устанавливать катод напротив анода для проведения измерений эмиссионных характеристик, либо напротив анализатора оже-электронов для исследования электронной структуры, что схематично показано на рисунке 2.1. Расстояние промежутка катод анод устанавливается с точностью до 0,01 мм.

В качестве анода используется реакторный графит, так как другие материалы в процессе работы при значительных мощностях расплываются и переносятся на поверхность катода, тем самым изменяют химический состав поверхности образца и его эмиссионные свойства.

Схема измерения, разработанная для исследования автоэмиссионных характеристик, представлена на рисунке 2.5.

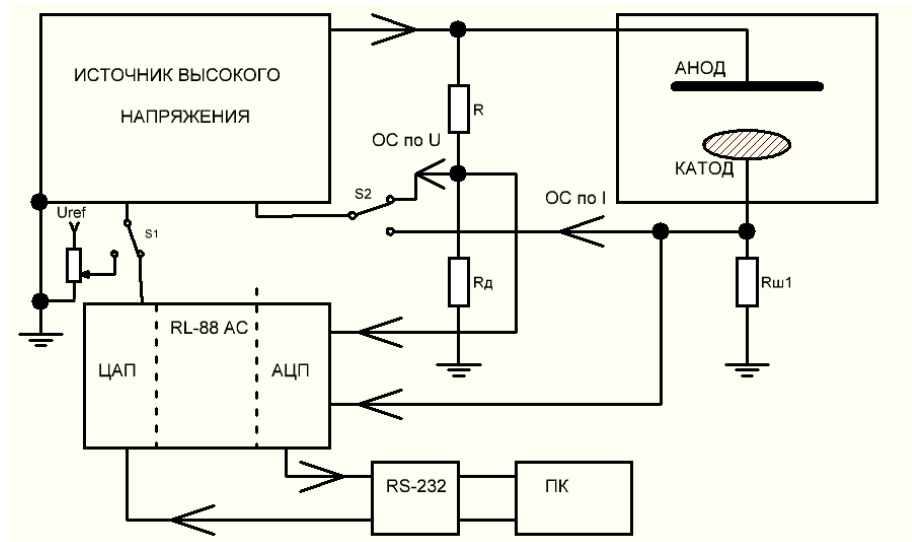


Рисунок 2.5 – Блок-схема измерения автоэмиссионных характеристик.

Анод измерительной ячейки подключен к источнику высокого напряжения. Данный высоковольтный блок имеет следующие характеристики: регулируемое выходное напряжение до 10 кВ, ток до 2 мА. Режим стабилизации задается положением переключателя S_2 за счет подключения обратных связей либо по напряжению (ОС по U), либо по току (ОС по I). Переключатель S_1 определяет, каким образом осуществляется регулировка напряжения: цифровым сигналом с ПК, который преобразуется в аналоговый через устройство ввода-вывода RL-88 AC [73], либо «ручным» способом с делителя напряжения, подключенного к опорному напряжению U_{ref} . Регистрация данных производится на ПК через то же устройство RL-88 AC.

На описанной экспериментальной установке можно измерять вольт-амперные характеристики холодных катодов из искусственных углеродных материалов, наблюдать за динамикой изменения напряжения при стабильном токе, либо за динамикой изменения тока при стабильном напряжении. Погрешность измерений составляет не более 7%.

Экспериментальное исследование эмиссионных характеристик автокатодов из конструкционных графитов. Изучены следующие образцы из искусственных углеродных материалов: мелкозернистый прочный графит (МПП-7), мелкозернистый графит (МГ), графит электродный (ГЭ), графит полученный изостатическим прессованием (GS-1800), графит малозольный (ГМЗ).

Перед помещением образца в вакуум его поверхность шлифуется. После помещения в вакуум проводится тренировка путем дискретного повышения напряжения при контроле автоэмиссионного тока. Когда ток достигает значения 0,4 мА, данная процедура повторяется. Циклы прекращаются тогда, когда достигается воспроизводимость результатов не хуже 3%. Далее проводится исследование вольт-амперных характеристик образца.

На рисунке 2.6 для образца МПГ-7 приведена типичная зависимость эмиссионного тока от напряжения, прикладываемого к вакуумному диоду.

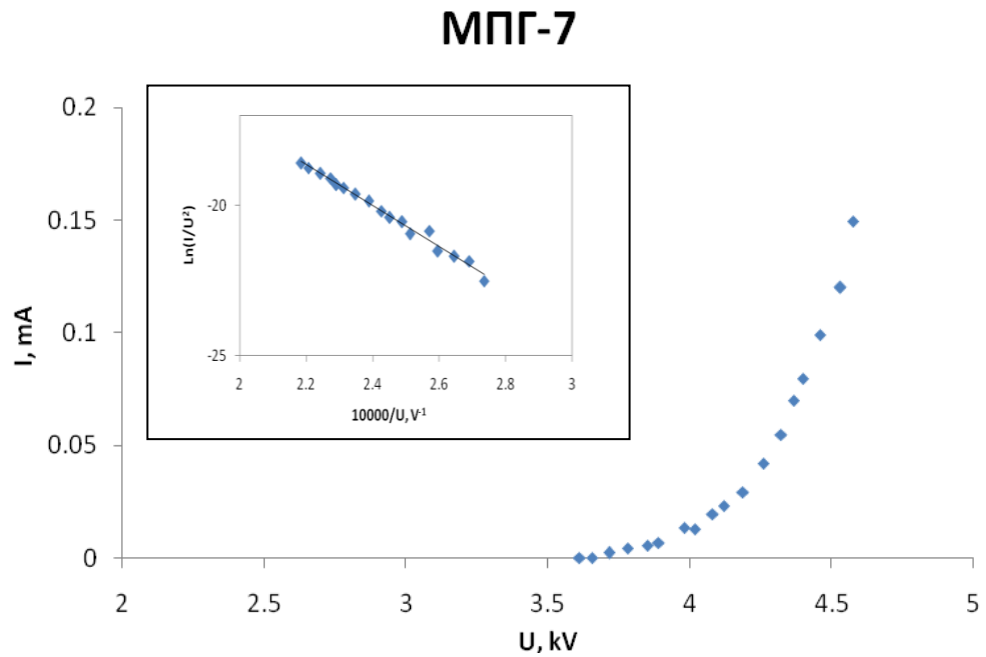


Рисунок 2.6 – ВАХ образца МПГ-7.

В отдельной рамке на этом рисунке показана данная зависимость в координатах Фаулера-Нордгейма. В этих координатах точки лежат на одной прямой, что говорит об автоэлектронном характере эмиссии.

Зависимости ВАХ для всех исследуемых образцов представлены на рисунке 2.7. Данные характеристики сняты для образцов, которые работали в качестве автоэммиттеров при давлениях от 10^{-9} до 10^{-6} торр по 10 минут при токе автоэмиссии $I = 100$ мкА.

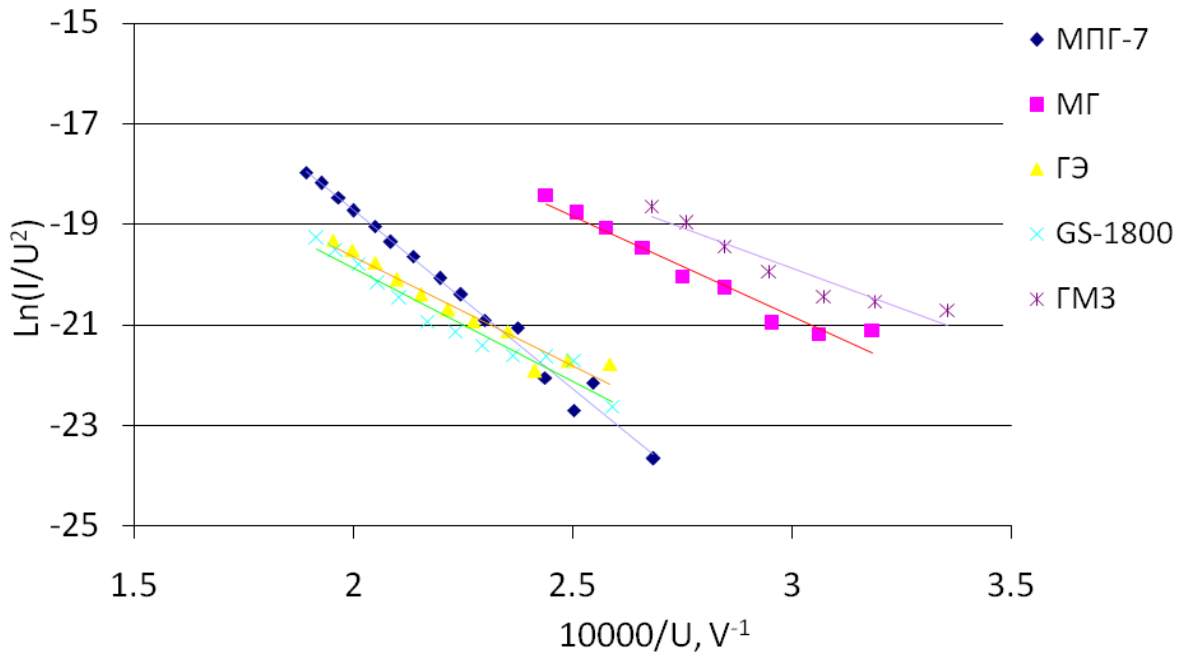


Рисунок 2.7 – Вольт-амперные характеристики образцов после автоэмиссии в координатах Фаулера-Нордгейма, $p=10^{-8}$ торр.

Крутизна наклона кривых характеризует коэффициент усиления электрического поля. Из исследованных образцов выделяется образец графита марки МПГ-7, он обладает самым большим коэффициентом усиления. Таким образом, при одинаковом приращении напряжения, начиная с пороговых значений, отклик эмиссионного тока будет максимальным для образца из данного материала.

Измерены напряженности электрического поля E_{cm} , соответствующие старту автоэмиссионного тока в зависимости от давления в вакуумной камере. Напряженность электрического поля E определяется как

$$E = \frac{U}{d} \quad (2.1)$$

где U – напряжение, прикладываемое к измерительной ячейке, d – расстояние между анодом и катодом. В экспериментах промежуток d устанавливался равным 0,15 мм, за напряженность старта E_{cm} принято значение напряженности, соответствующее автоэмиссионному току $I = 0,025$ мА. На рисунке 2.8 приведены полученные экспериментальные зависимости.

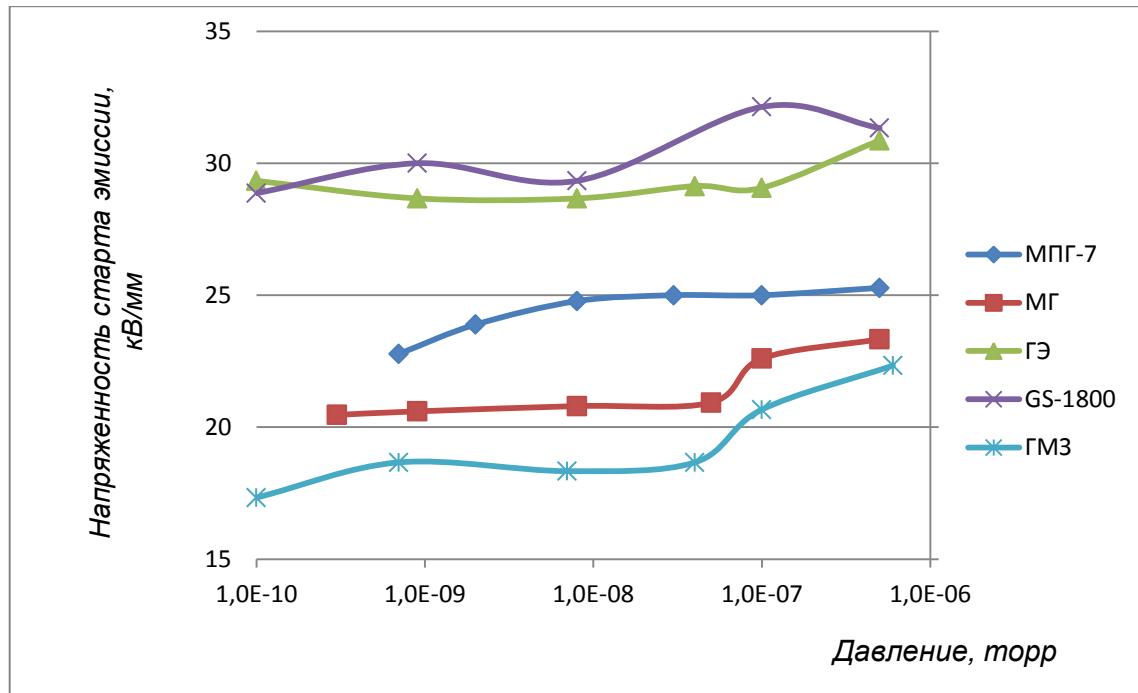


Рисунок 2.8 – Напряженности, соответствующие началу автоэмиссионного тока при разных давлениях.

Выбрана следующая методика проведения эксперимента. Каждый из образцов после шлифовки и установки в вакуумную камеру подвергается циклической тренировке, описанной выше. Затем производится регистрация зависимостей ВАХ при давлении 10^{-9} торр (для некоторых образцов начиная с 10^{-10} торр) и определяется значение напряженности старта $E_{ст}$. После этого изменяется давление в камере, путем напуска инертного газа Ar, и в течение 10 минут катод работает при стабильном токе 0,1 мА. Производится откачка до первоначального давления 10^{-9} торр и регистрируется $E_{ст}$. После этого процедура напуска повторяется, таким образом, автокатод работает при давлениях, которые дискретно изменяются до 10^{-6} торр.

Таким образом, можно отслеживать изменение автоэмиссионных характеристик катода в зависимости от интенсивности ионной бомбардировки остаточными газами. Наименьшие значения стартовой напряженности электрического поля соответствуют образцам из графита марок ГМЗ и МГ. Наибольшие напряженности соответствуют образцам ГЭ и GS-1800. Для образца из материала МПГ-7 эти значения занимают промежуточное положение. Однако, автокатод из графита МПГ-7 демонстрирует стабильные значения напряженности электрического поля при давлениях порядка 10^{-7} – 10^{-6} торр, что является определяющим фактором для использования данного материала в качестве взрывоэмиссионного катода при экстремальных нагрузках, поскольку давление в отпаянных РТ составляет порядка 10^{-7} – 10^{-6} торр.

Поверхность графита МПГ-7 наиболее устойчива к ионному воздействию, во время работы происходит генерация новых эмиссионных центров [74]. Дальнейшие исследования

влияния давления и изучение электронной структуры позволяют прояснить природу стабильной автоэлектронной эмиссии для графита данной марки.

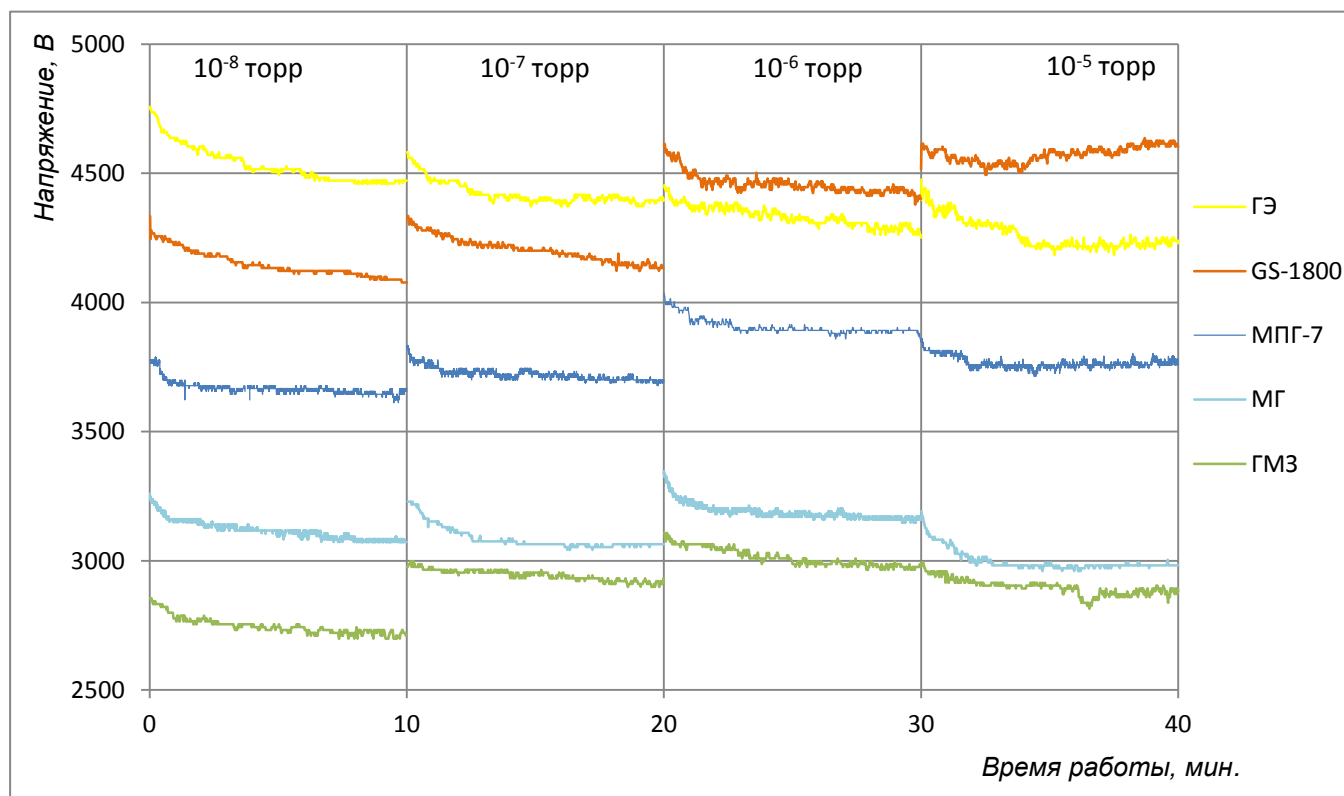


Рисунок 2.9 – Зависимость напряжения на измерительной ячейке при стабильном токе автоэмиссии 0,1 мА от времени при постоянном давлении на 10 минутном временном интервале.

Проведено измерение долговременных характеристик. В течение десяти минут при постоянном давлении и стабилизированном токе автоэмиссии равном 0,1 мА измеряется напряжение. После десяти минут съемки повышается давление путем напуска Ar, и регистрация продолжается. Измерения проводились для всех образцов при давлениях 10⁻⁸ торр, 10⁻⁷ торр, 10⁻⁶ торр, 10⁻⁵ торр. На рисунке 2.9 показаны результаты эксперимента по измерению долговременных характеристик.

При высоком вакууме порядка 10⁻⁸ – 10⁻⁷ торр отклонения напряжения от средних значений не существенны. Однако для всех образцов характерно время выхода на режим стабильного напряжения. Для образцов ГМЗ, МГ, МПГ-7 это время порядка 1 – 2 минут в зависимости от образца и давления. Для образцов GS-1800 и ГЭ эти времена составляют до 5 минут при вакууме порядка 10⁻⁸ – 10⁻⁷ торр, а при вакууме порядка 10⁻⁵ торр образец GS-1800 работает нестабильно на протяжении всего эксперимента. При вакууме 10⁻⁵ торр, когда интенсивность ионной бомбардировки максимальна, стабильные значения напряжения показывают образцы графитов марок МГ и МПГ-7. МГ характеризуется меньшими колебаниями напряжения, однако выходит на режим стабильной работы графит марки МПГ-7 быстрее. У образца ГМЗ есть

участок с провалом напряжения, с дальнейшим «откатом» назад, возможно это связано с образованием нового центра эмиссии, например, образование кратера либо излома, но этот центр не остался стабильным и быстро деградирует по причине влияния ионной бомбардировки.

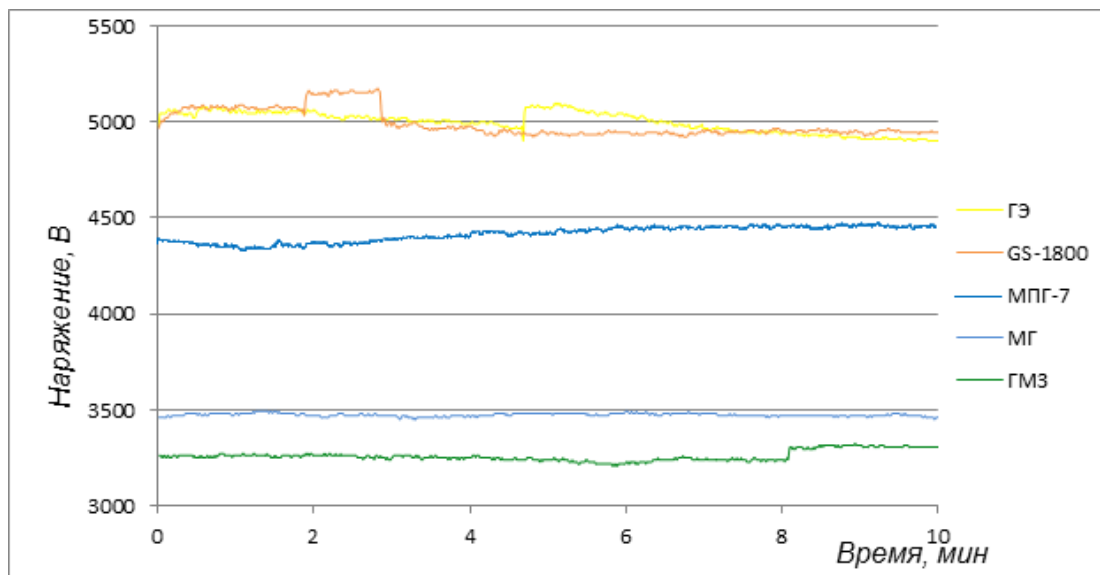


Рисунок 2.10 – Зависимость напряжения вакуумного диода от времени при стабильном токе 0,25 мА.

Процессы резкого зарождения и исчезновения эмиссионных центров заметнее проявились для некоторых образцов с повышением автоэмиссионного тока, что можно наблюдать на рисунке 2.10. Для образцов ГМЗ, GS-1800 и ГЭ характерны исчезновения целых эмитирующих областей, похожие процессы описаны в работе Шешина Е.П. [4]. Однако образцы МПГ-7 и МГ показывают стабильные характеристики.

Как можно заметить, выход на стабильный режим характерен для всех образцов и сопровождается снижением напряжения, т.е. происходит формирование стабильных центров эмиссии. При дальнейшей работе видны флуктуации напряжения, по-видимому, идет процесс исчезновения и возникновения эмитирующих областей.

Для более полного понимания этих особенностей необходимо изучение электронной структуры эмитирующей поверхности автокатода. Дальнейшие исследования должны прояснить природу изменения эмиссионной способности. Но уже на основании результатов, полученных на данном этапе исследований, можно выделить наиболее перспективные материалы для катодов импульсной рентгеновской трубки являются графиты марок МПГ-7 и МГ [75].

2.2 Исследование электронной структуры холодных катодов, изготовленных из конструкционных графитов.

Для изучения электронной структуры поверхности проведено сравнение оже-спектров для образцов всех марок графитов до их работы в качестве автоэмиссионных катодов и после. Для эксперимента образцы были подготовлены и прошли тренировку по методике, описанной выше. Затем образцы отработали в качестве автоэмиссионных катодов в течение 15 минут, при стабильном токе 0,1 мА, давление в вакуумной камере составляло 10^{-7} торр. Такие параметры были выбраны исходя из проведенных экспериментов, где для всех образцов наблюдается понижение напряжения на вакуумном диоде при стабильном токе. Особенностью данного эксперимента является то, что образец после автоэмиссионных процессов не извлекается из вакуумной системы на воздух, регистрация оже-спектров происходит в той же камере. Оже спектры получены в соответствии с методиками описанными в работе [70]. Сложности, связанные с зарядкой поверхности образцов, были решены в работах по исследованию химического состава поверхностей керамических и пленочных покрытий [76, 77], которые выполнял автор на данном приборе.

Исследование электронной структуры. Форма оже-линий в спектре чувствительна к химическому состоянию атомов, что наиболее четко проявляется в случае переходов с участием электронов валентной зоны. На дифференциальном оже-спектре это проявляется разной формой линий перед основным максимумом. Также может происходить сдвиг оже-линии, что обусловлено наличием запрещенной зоны разной ширины. Эти особенности хорошо видны на рисунке 2.11, где приведены спектры различных соединений углерода. Например, хорошо заметен сдвиг по энергии минимума линии алмаза по отношению к линии графита, что говорит о смене типа гибридизации с sp^2 , свойственного графиту, на sp^3 , свойственного алмазу, изменении кристаллической решетки.

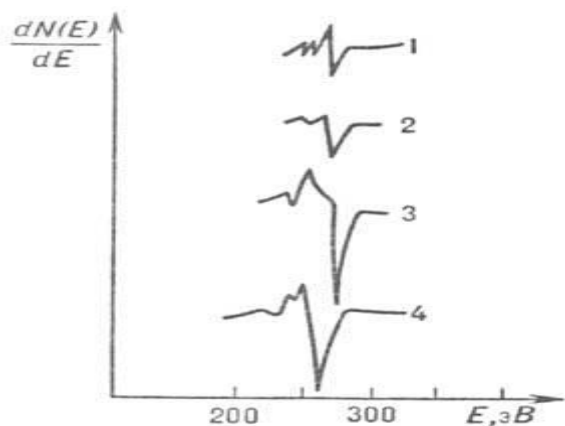


Рисунок 2.11 – Линия KVV переходов атомов углерода в оже-спектрах Mo₂C – 1, SiC – 2, графита – 3, алмаза – 4. [78]

На рисунке 2.12 представлены дифференциальные оже-спектры для образцов конструкционных графитов GS-1800, ГМЗ, ГЭ, МГ. Получены спектры исходной поверхности образца и после того, когда произошло снижение напряжения работы автоэмиссионного катода при стабильном токе.

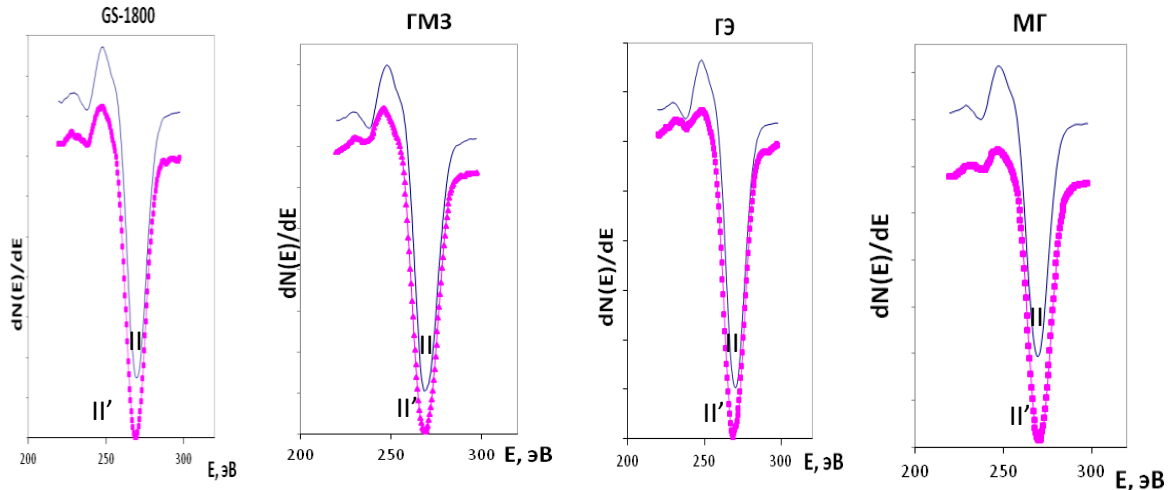


Рисунок 2.12 – Оже-спектры промышленных углеродных материалов марок GS-1800, ГМЗ, ГЭ, МГ, полученные на спектрометре LAS-2000, где возбуждение Оже электронов происходит за счет электронного пучка. На оже-спектрах сверху представлены образцы до работы автоэмиттерами, на оже-спектрах снизу – образцы после снижения напряжения работы автоэмиттера при стабильном токе.

Спектры, полученные после того, как образцы отработали в качестве автоэмиттеров, имеют общие особенности. Во-первых, на спектрах, полученных после автоэмиссии, интенсивность отношения максимумов в валентной полосе (около 150 эВ) снизилась по сравнению с отношением максимумов до работы катода. Во-вторых, минимум II' сдвинут по энергии примерно на 1 – 2 эВ относительно минимума II. Таким образом, можно сделать вывод, что происходит изменение межатомных связей и, возможно, перестройка кристаллической решетки. Сдвиг обусловлен тем, что на поверхности за счет бомбардировки ионами остаточных газов образуются области или включения, где межатомные связи близки к кристаллической решетке алмаза [79, 80]. Появление таких областей объясняет снижение рабочего напряжения вакуумного диода, поскольку в местах с наличием неоднородностей с разными электропроводящими свойствами, происходит локальное усиление напряженности электрического поля.

На рисунке 2.13.a представлены дифференциальные спектры образца МПГ-7 после 15 минут работы при токе 0,1 мА и давлении 10^{-7} торр. Для данного образца более существенно проявились особенности, описанные выше для остальных: пик В' расщеплен на два В1' и В2', а линия сдвинута на 3 эВ. Дополнительно для данного образца получен РФЭ-спектр на установке РН1 5000, после математических обработок спектр преобразован в дифференциальный оже-

спектр (рисунок 2.13.б). Наблюдается уширение пика В' и смещение минимума на 3 эВ, что также является подтверждением тенденции образования областей с межатомными связями несвойственными кристаллической решетке графита.

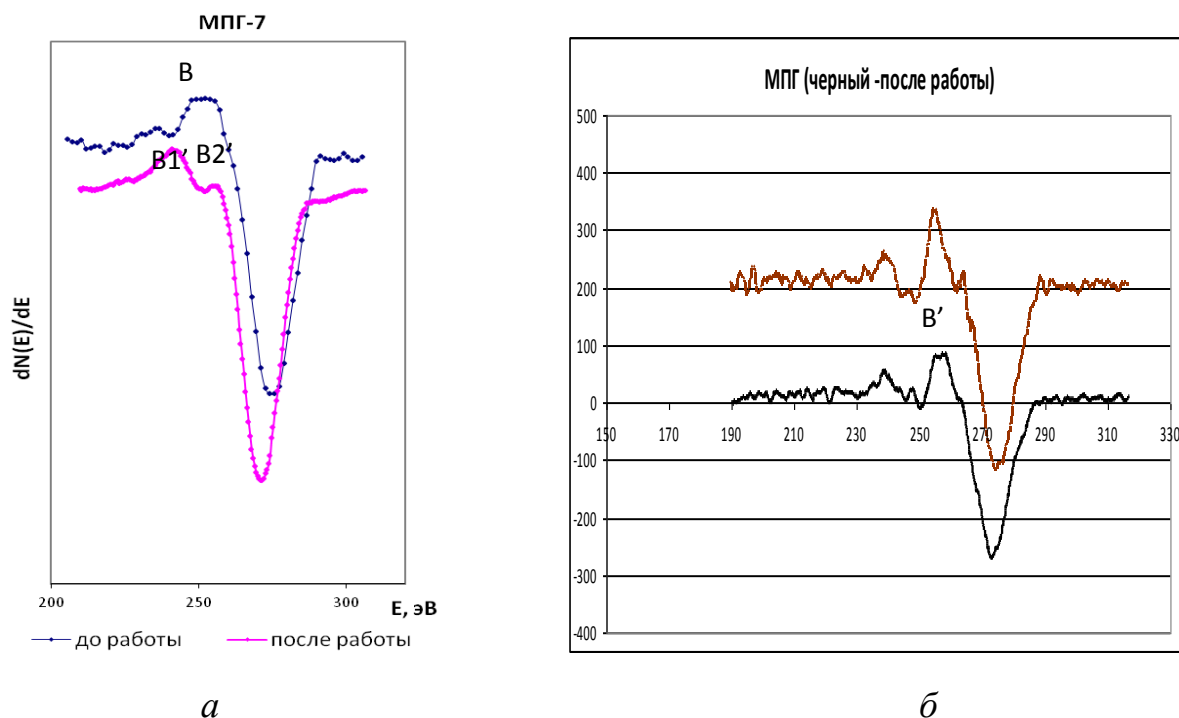


Рисунок 2.13 – Оже-спектр графита марки МППГ-7, полученный при возбуждении оже-электронов электронным пучком – а) (LAS-2000); рентгеновским излучением – б) (PHI 5000). Спектры сверху – чистый образец до работы автоэммиттером, спектры снизу – после работы в качестве автоэммиттера.

Таким образом, после проведенного анализа автоэммиттеров из конструкционных графитов методом оже-спектроскопии выявлены изменения электронной структуры поверхностных атомов вследствие воздействия бомбардировки ионами остаточных газов. Схожие закономерности присущи всем исследуемым графитам. Наиболее сильно изменения проявились для образца МППГ-7. Дополнительный анализ методом РФЭС также подтвердил, что в процессе работы автокатода появляются области, где происходит смена типов связей [81 – 83], появляются неоднородности. В этих областях происходит образование локальных мест усиление напряженности электрического поля, что объясняет снижение рабочего напряжения при стабильном эмиссионном токе во время работы.

Как показало исследование, образец из материала МППГ-7 наиболее устойчив к ионной бомбардировке. При долговременных характеристиках данный материал продемонстрировал стабильную работу. Напряженность старта автоэмиссии при различных значениях давления существенно не изменялась. Он обладает самым большим коэффициентом усиления поля, что доказывает крутизна ВАХ. Анализ электронной структуры поверхностных атомов образца МППГ-7 после его работы в качестве автоэмиссионного катода методами оже-спектроскопии и

РФЭС показал, что на его поверхности происходит возникновение областей с типом связи не свойственным графиту. Смена типа гибридизации с sp^2 , свойственного графиту, на sp^3 , свойственного алмазу, для данной марки графита более выражена, чем для остальных, что приводит к появлению новых эмиссионных центров в процессе работы холодного катода.

В силу особенностей выявленных для образца МПГ-7 использование его в качестве взрывоэмиссионного катода является перспективным.

2.3 Разработка графитокерамического катодного узла импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки.

ВЭЭ может быть индуцирована внешним источником, например, лазерным лучом или бомбардировкой поверхности катода заряженными частицами. Другим способом возникновения ВЭЭ является разогрев участка катода током большой плотности. Когда через эмиттер течет ток большой плотности, происходит его разогрев за счет Джоулева тепла, и автоэмиссия с такого участка переходит в термоавтоэлектронную эмиссию. Затем, из-за большой плотности энергии, происходит взрыв данной области и образуется плазма. Этот процесс сопровождается многократным увеличением тока, так как отбор электронов происходит уже из образовавшейся плазмы, а не с поверхности катода.

Если прикладываемое электрическое поле будет постоянным, то в промежутке между катодом и анодом образуется плазменный канал, и загорается дуговой разряд. Если подавать импульсное напряжение с длительностью меньшей, чем время перекрытия плазмой промежутка катод - анод, и время между импульсами установить достаточным для рекомбинации плазмы, то дуговой разряд не образуется, возникнет ВЭЭ. Именно этот процесс лежит в основе работы импульсных рентгеновских трубок.

В данном разделе представлено исследование импульсного взрывоэмиссионного катода на основе высокопрочного графита марки МПГ-7. Выбор данного материала для использования в качестве взрывоэмиссионного катода импульсной рентгеновской трубки обусловлен результатами исследований приведенных в разделах 2.1 и 2.2. Эмиссионные характеристики образца, изготовленного из данного материала, отличаются стабильностью. Автокатод из данного графита устойчив к ионной бомбардировке остаточными газами вплоть до давления 10^{-5} торр. Обнаружено, что в процессе работы происходит самовосстановление эмиссионных центров [81, 83] за счет возникновения на поверхности эмиттера неоднородностей из-за изменения типов связей атомов графита.

Также важно отметить, что поверхность графита очень развитая, это влечет за собой локальное усиление напряженности электрического поля на неоднородностях, и снижение

порогового напряжения необходимого для возникновения эмиссии. Авторы работы [84] утверждают, что поверхность графита при использовании в качестве холодного катода медленнее деградирует, чем металлы.

Учитывая данные особенности, можно предположить, что взрывоэмиссионный катодный узел в импульсной РТ из конструкционного графита марки МПГ-7 будет иметь стабильную эмиссию одновременно из множества центров, высокий ресурс, и будет сохраняться высокая стабильность работы при более низких скоростях нарастания переднего фронта импульса напряжения, в отличие от металлических катодных узлов.

Эксперимент проведен на установке, которая имеет импульсный генератор с регулируемой скоростью нарастания напряжения от $2,5 \cdot 10^{12}$ В/с до $1,2 \cdot 10^{13}$ В/с. Оценена стабильность работы взрывоэмиссионного катода из высокопрочного графита МПГ-7, проведен сравнительный анализ со взрывоэмиссионным катодом гребенчатого типа, изготовленного из металла, который применяется в серийно выпускаемых рентгеновских трубках РИА-1.

В перспективе графитокерамические катодные узлы будут применены в портативных импульсных частотных рентгеновских аппаратах, генераторы которых имеют индуктивные накопители энергии и твердотельные прерыватели тока SOS. Отличительная особенность этих аппаратов заключается в снижении дозы облучения пациентов на порядок и более [85] при стандартных медицинских исследованиях.

Экспериментальная установка. Для исследования импульсных взрывоэмиссионных катодов была разработана экспериментальная установка [86], представленная на рисунке 2.14. Составными частями установки являются: откачиваемая вакуумная камера, в которой помещена разборная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка коаксиального типа; импульсный высоковольтный генератор; система регистрации.

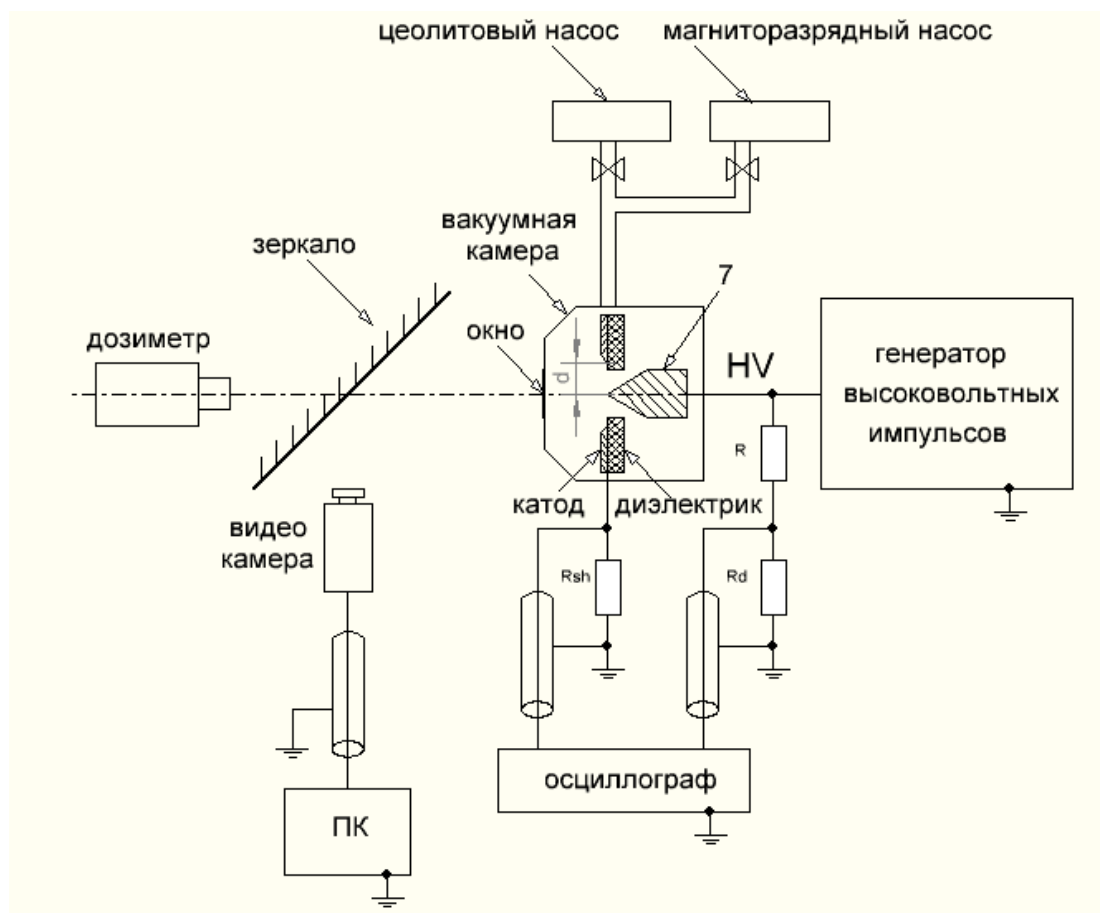


Рисунок 2.14 – Схема экспериментальной установки.

В вакуумной ячейке размещены электроды рентгеновской трубки. Через стеклянное окно, расположенное в корпусе вакуумной камеры, можно наблюдать процессы, происходящие в вакуумной камере во время работы трубки. Анод представляет собой заостренный вольфрамовый стержень, впрессованный в медный радиатор. Из медного радиатора выступает только конусная часть вольфрамового прутка. Длина анода составляет 21 мм, диаметр – 3 мм, угол заточки вольфрамового стержня – 30° , диаметр радиатора – 11 мм. Катодный узел выполнен в форме двух прилегающих вплотную дисков: диск с внутренним отверстием большего диаметра сделан из проводящего материала, диск с внутренним отверстием меньшего диаметра выполнен из диэлектрика, в частности в экспериментах применена корундовая вакуумплотная керамика 22ХС с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 10^{11}$ Ом·м и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 10,3$ на частоте 1 МГц.

Высоковольтный генератор представляет собой трехзвенный магнитный генератор импульсов напряжения, с использованием последнего звена в качестве индуктивного накопителя. Для регулировки скорости нарастания импульса напряжения в последнее звено устанавливается добавочная индуктивность $L_{доб}$, как показано на рисунке 2.15.

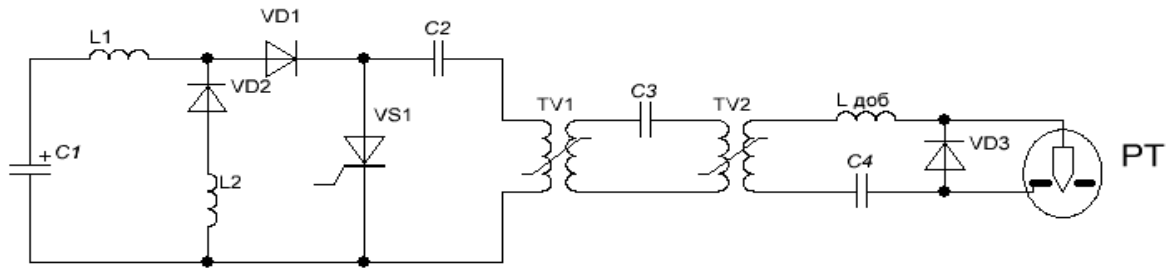


Рисунок 2.15 – Схема высоковольтного генератора импульсов с добавочной индуктивностью.

Ключевым (частото задающим) элементом схемы является тиристор VS1, управляемый внешним генератором запускающих импульсов. Частота следования импульсов может регулироваться от 1 Гц до 5000 Гц. Импульсы высокого напряжения формируются с помощью твердотельного прерывателя тока VD3. Скорость нарастания выходного импульса напряжения зависит от индуктивности последнего звена генератора. Данная зависимость представлена на рисунке 2.16. Без добавочной индуктивности амплитуда импульса напряжения достигает 150 кВ. Генератор формирует импульсы положительной полярности, которые подаются на анод. Для регистрации амплитуды и длительности импульсов высокого напряжения применяется делитель напряжения, собранный на сопротивлениях R, R_d. Амплитуда и длительность тока протекающего через рентгеновскую трубку регистрируется на осциллографе с использованием токового шунта сопротивлением R_{sh}.

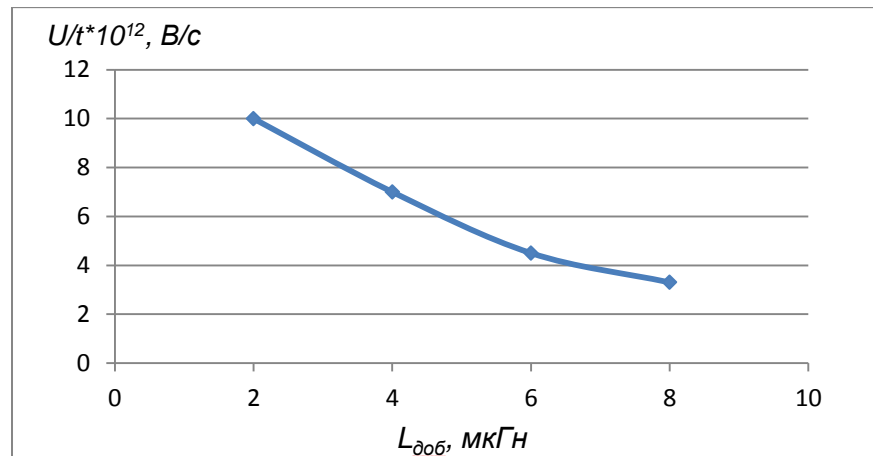


Рисунок 2.16 – Зависимость скорости нарастания напряжения от индуктивности выходного звена генератора.

Предварительная откачка вакуумной камеры осуществляется цеолитовым насосом до давления 10^{-4} торр, а рабочий вакуум с давлением не хуже 10^{-7} торр обеспечивает магниторазрядный насос. Для откачки системы не используются насосы способные вносить в вакуумную систему пары масла. Это важное условие, поскольку загрязнение поверхности электродов рентгеновской трубки во время работы сказывается на стабильности включения

трубки, и достоверности результатов, и, к тому же, не соответствует условиям работы в отпаянной трубке.

Для регистрации мощности импульсного рентгеновского излучения используется сертифицированный дозиметр ДКС-АТ1123, сертифицированный Росреестром как средство измерения импульсов излучения наносекундной длительности. Осциллограф для регистрации импульсов токов и напряжений – Tektronix TDS 620 В с полосой пропускания 500 МГц. Каналы регистрации тока и напряжения согласованы с точностью не хуже 0,1 нс. Видеокамера позволяет оценить время остывания электродов рентгеновской трубки.

Экспериментальное исследование. На рисунке 2.17 представлена фотография и схема разработанного графитокерамического катодного узла для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки.

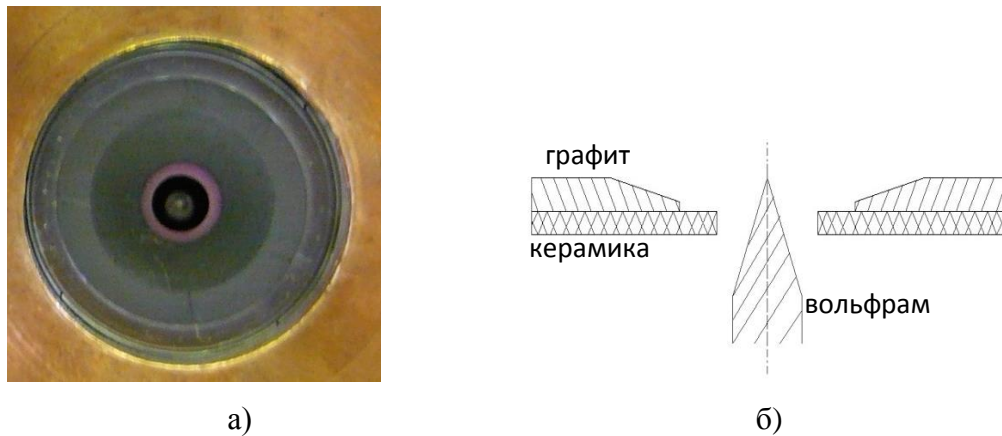


Рисунок 2.17 – Взрывоэмиссионная рентгеновская трубка с графитокерамическим катодным узлом: а) фото, б) схематическое изображение.

Данный катодный узел состоит из диэлектрического диска с внутренним отверстием диаметром 3 мм, на котором закреплен диска с внутренним отверстием большего диаметра из конструкционного графита марки МПГ-7. В данном катодном узле конструкционно обеспечено образования тройной точки контакта: проводник-диэлектрик-вакуум [87], что ведет к усилению напряженности электрического поля в данном месте.

Использование контакта проводящего материала с диэлектриком в вакууме в случае металлодиэлектрических катодов необходимо, для обеспечения стабильной взрывной эмиссии электронов при многократно повторяющихся импульсах напряжения при скорости нарастания напряжения не ниже 10^{13} В/с. Для лезвийных катодов без диэлектрической подложки требования к скорости нарастания напряжения предъявляются выше: стабильность эмиссии обеспечивается при 10^{14} В/с. Данный факт объясняется тем, что инициирование пробоя в случае металлодиэлектрических взрывоэмиссионных катодов происходит на неоднородностях за счет образования «тройной точки», это точка контакта проводника с диэлектриком в вакууме [45, 84].

Для определения стабильности эмиссии графитокерамического катодного узла было проведено исследование его работы при разных скоростях нарастания импульса напряжения. Вновь установленная РТ, показанная на рисунке 2.17, проходит тренировку: ступенчато меняется частота следования высоковольтных импульсов от 10 Гц до 1 кГц. Импульсы с одной частотой подаются в течение определенного времени, при частоте 10 Гц – 100 секунд, при частоте 1 кГц – 1 секунда, таким образом, что количество импульсов в пачке составляет 1000. В процессе тренировки электродов импульсной РТ ведется регистрация мощности дозы рентгеновского излучения с помощью дозиметра и регистрируются импульсы напряжений и токов. Тренировка длится до тех пор, пока не будет получена стабильная мощность дозы излучения при частоте 1 кГц с отклонением от среднего значения не более 5 %, это сопровождается хорошей воспроизводимостью импульсов напряжения и тока. В результате процесса тренировки происходит дегазация материалов катода и анода. С помощью видеокамеры можно отследить симметрично ли расположен катод относительно острия анода, это заметно по яркости свечения керамики, как во время работы трубки, так и при остывании.

На рисунке 2.18 приведены осциллограммы импульсов напряжения и тока при разной скорости нарастания напряжения для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с графитокерамическим катодным узлом, приведенной на рисунке 2.17. При скорости нарастания импульса напряжения $dU/dt = 2,5 \cdot 10^{12}$ В/с эмиссия электронов начиналась при напряжении около 100 кВ, тогда как при $dU/dt = 1,2 \cdot 10^{13}$ В/с эмиссия возникала при значении напряжения близком к 150 кВ.

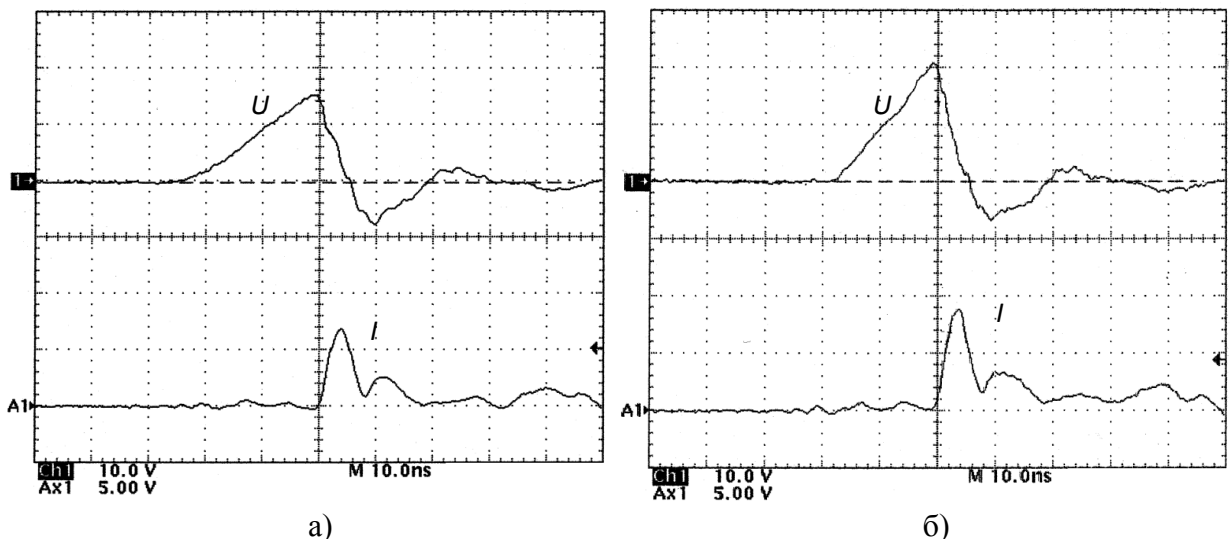


Рисунок 2.18 – Осциллограммы импульсов напряжения и тока для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с графитокерамическим катодом при разных скоростях нарастания напряжения: а) $dU/dt = 2,5 \cdot 10^{12}$ В/с; б) $dU/dt = 1,2 \cdot 10^{13}$ В/с.

По данным осциллограммам (рис. 2.18) рассчитаны и построены спектры тормозного рентгеновского излучения по длинам волн I_λ , как показано на рисунке 2.19. В данном расчете применена формула [88]:

$$I_\lambda = \frac{c^2}{\lambda_0} \cdot C \cdot i \cdot Z \cdot \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda^3} \quad (2.1)$$

где λ_0 – граничная длина волны, C – постоянный коэффициент, λ – длина волны рентгеновского излучения, Z – атомный номер материала мишени, c – скорость света в вакууме.

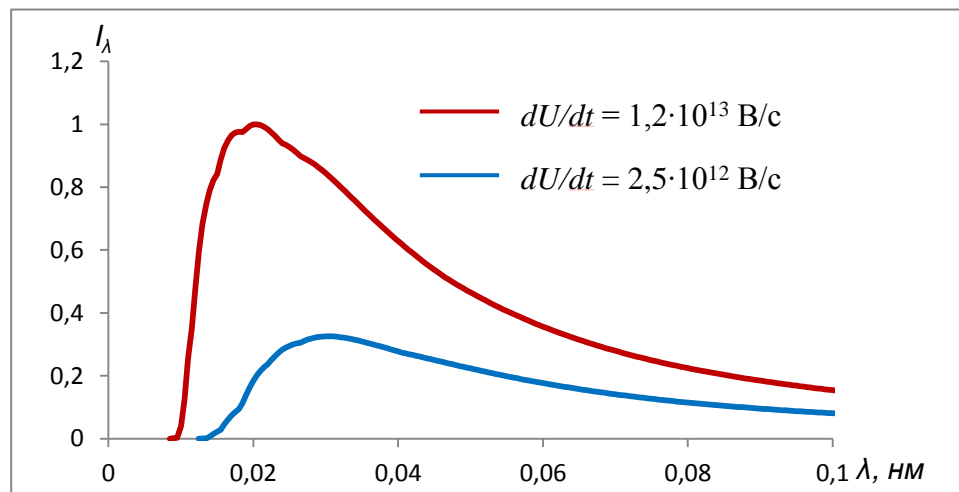


Рисунок 2.19 – Спектр тормозного рентгеновского излучения для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с графитокерамическим катодом.

Анализ спектральных зависимостей показывает, что происходит смещение как коротковолновой границы, так и максимума спектральной плотности для разных напряжений включения взрывоэмиссионной рентгеновской трубки. Интенсивность спектра смещенного в коротковолновую область выше, и излучение является более однородным. Таким образом, изменяя скорость нарастания напряжения на рентгеновской трубке можно менять эффективную энергию рентгеновского излучения, что важно при исследованиях объектов с различной плотностью.

Далее была исследована стабильность работы при разных скоростях нарастания импульса напряжения для взрывоэмиссионных катодных узлов 2-х типов: разработанного графитокерамического и катода гребенчатого металлодиэлектрического типа, который применяется в серийно выпускаемых рентгеновских трубках серии РИА-1, показанный на рисунке 2.20.

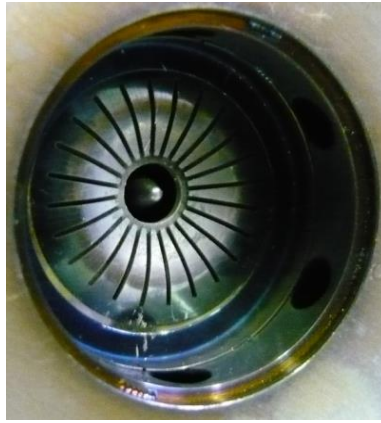


Рисунок 2.20 – Фото взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с катодным узлом гребенчатого металлодиэлектрического типа.

На рисунке 2.21 представлена зависимость мощностей доз облучения для взрывоэмиссионных рентгеновских трубок с катодами, описанных конструкций, при изменении скорости нарастания напряжения. Измерения усреднены по 10 экспозициям для каждой измеренной точки.

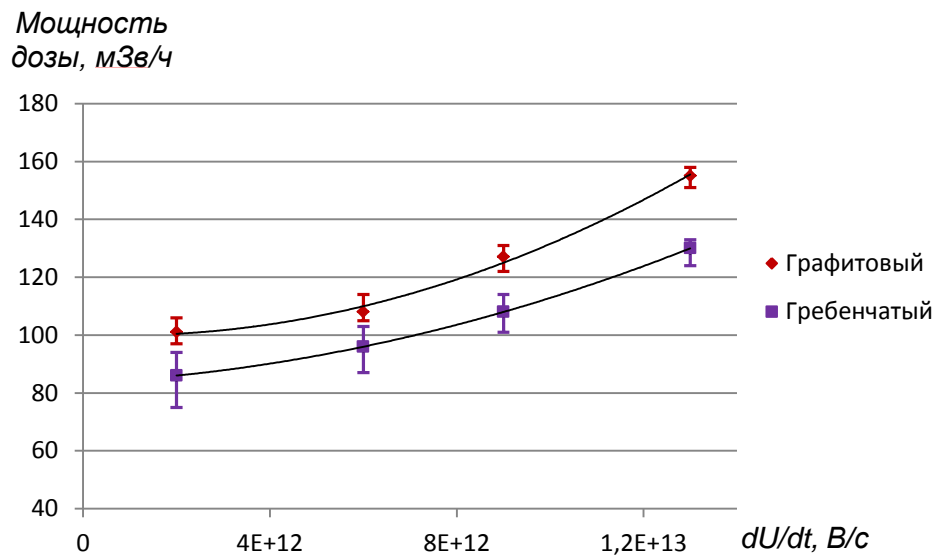


Рисунок 2.21 – Зависимость мощностей доз облучения для взрывоэмиссионных рентгеновских трубок с графитокерамическим катодом и гребенчатым металлодиэлектрическим при разных скоростях нарастания импульса напряжения.

В случае катода, изготовленного с применением конструкционного графита МПГ-7, разброс в значениях мощности доз при скорости нарастания напряжения $2,5 \cdot 10^{12}$ В/с составил менее 10 %, для катода гребенчатого металлодиэлектрического типа разброс составил около 20%. Стабильная работа с погрешностью менее 10% наблюдается для обоих типов катодов при скорости нарастания напряжения порядка $1 \cdot 10^{13}$ В/с. Более стабильная взрывная электронная эмиссия при скоростях нарастания импульса напряжения порядка 10^{12} В/с для

графитокерамического катода, возможно, объясняется тем, что в процессе работы изменяются межатомные связи углерода, внося дополнительные поверхностные неоднородности.

Как видно из рисунка 2.21 значения мощности доз для взрывоэмиссионной трубки с графитокерамическим катодным узлом выше. Анализ осциллограмм тока и напряжения, приведенных на рисунке 2.22 для рентгеновских трубок с этими видами катодов показывает, что при использовании графитокерамического катода максимум тока смещен в сторону больших напряжений.

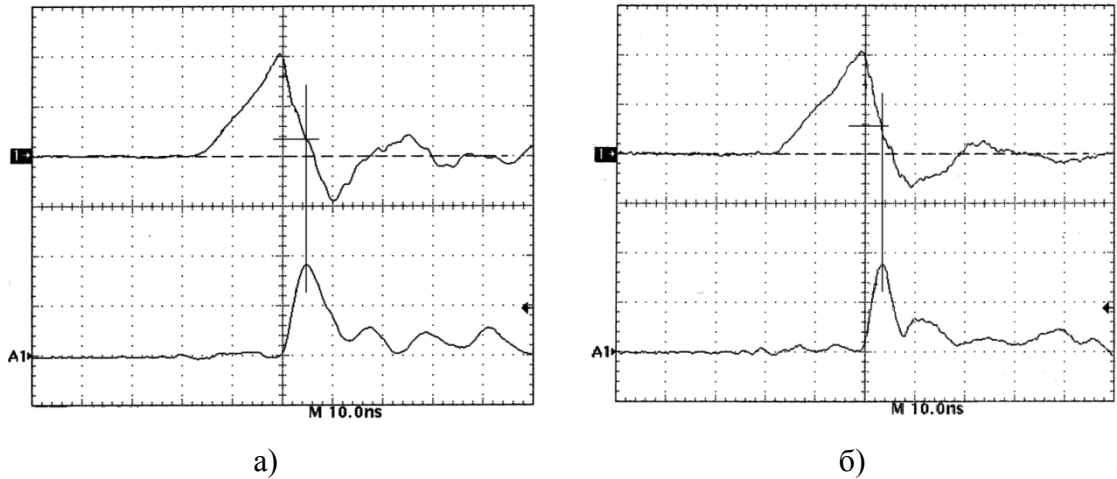


Рисунок 2.22 – Осциллограммы импульсов напряжения и тока для взрывоэмиссионных рентгеновских трубок с а) гребенчатым металлодиэлектрическим и б) графитокерамическим катодами, которые демонстрируют смещение максимума импульса тока относительно импульса напряжения.

По осциллограммам (рисунок 2.22) рассчитаны и построены спектры тормозного рентгеновского излучения I_λ по длинам волн, как показано на рисунке 2.23. На спектральных зависимостях отражено изменение интенсивности и смещение пика в более коротковолновую область для трубки с графитокерамическим катодом.

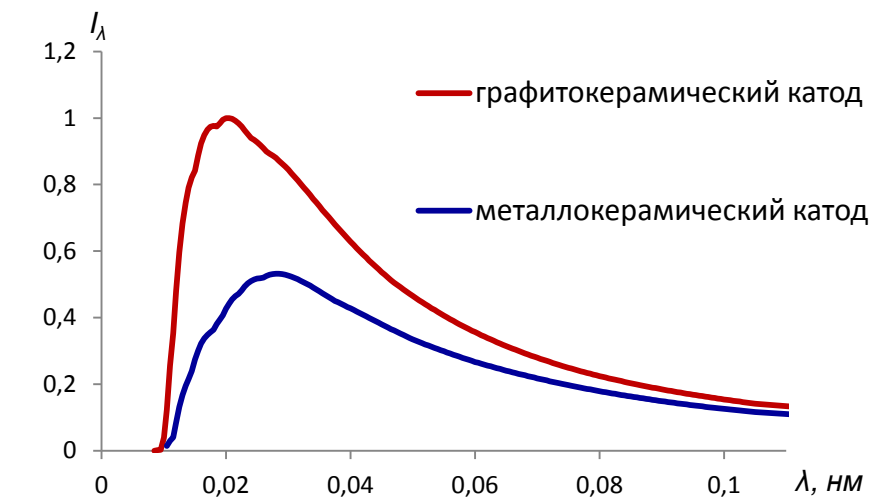


Рисунок 2.23 – Спектр тормозного рентгеновского излучения для взрывоэмиссионных рентгеновских трубок с графитокерамическим и гребенчатым металлодиэлектрическим катодами.

Длительность импульса тока на полувысоте в случае применения во взрывоэмиссионной рентгеновской трубке графитокерамического катода составляет 5 нс, тогда как в случае гребенчатого катода это время порядка 8 нс. Это приводит к более однородному излучению, что также подтверждается на расчетном спектре (рисунок 2.23).

Меньшая длительность тока говорит о более быстром разряде выходного накопителя энергии генератора на рентгеновской трубке с графитокерамическим катодом. Зависимость времени разряда t или длительности протекания тока, представляет собой функцию:

$$t = f(R, C, L) \quad (2.3)$$

где R – активное сопротивление выходного контура цепи, C – емкость выходного контура цепи, L – индуктивность выходного контура. Поскольку электрическая цепь генератора не меняется, то на эти параметры влияет только нагрузка в виде взрывоэмиссионной рентгеновской трубки. Значения емкости и индуктивности трубки пренебрежимо малы в сравнении с выходной цепью, поэтому определяющим фактором, влияющим на время разряда, является активное сопротивление трубки R . В случае графитового катода сопротивление трубки меньше, т.к. у данного катода более развитая поверхность и имеется большее число эмиссионных центров. В ходе экспериментов РТ с графитокерамическим катодом отработала $2 \cdot 10^6$ импульсов при частоте 5 кГц в повторно-кратковременном режиме, характеристики изменились не более, чем на 2 %.

2.4 Выводы по главе

Исследование автоэмиссионных свойств конструкционных графитов, показало, что автокатод, изготовленный из мелкозернистого высокопрочного графита марки МПГ-7, наиболее устойчив к ионной бомбардировке. При долговременных характеристиках данный материал демонстрирует стабильную работу. Напряженность старта автоэмиссии при разных давлениях существенно не изменяется. Автокатод из данного материала обладает самым большим коэффициентом усиления поля, по сравнению с исследованными материалами, что доказывает крутизна ВАХ.

Анализ методом оже-электронной спектроскопии структуры поверхностных атомов образцов из конструкционных марок графита после их работы в качестве автоэмиссионных катодов показывает, что происходит смена гибридизации с sp^2 на sp^3 , что наиболее выражено для марки графита МПГ-7. В местах с изменением типа связи атомов кристаллической решетки образуются области близкие по свойствам к диэлектрикам, вследствие чего в данных местах происходит усиление напряженности электрического поля. Таким образом, снижение напряжения эмиссии при стабильном токе объясняется действием ионной бомбардировки,

которая меняет электронную структуру эмиттера. Этот эффект наблюдается для всех образцов при давлении в вакуумной камере 10^{-7} торр.

Разработан взрывоэмиссионный графитокерамический катодный узел для импульсной высокочастотной рентгеновской трубки, основной частью которого стал высокопрочный графит марки МПГ-7.

Проведены сравнительные эксперименты графитокерамического катодного узла с металлодиэлектрическим гребенчатого типа. В экспериментах изучена стабильность ВЭЭ с указанных типов катодов при разных скоростях нарастания напряжения. Разработанный графитокерамический катодный узел позволяет получать стабильную эмиссию электронов при скорости нарастания импульса напряжения менее 10^{13} В/с, тогда как металлодиэлектрический катод гребенчатого типа стабильно работает при скорости нарастания импульса напряжения выше 10^{13} В/с.

В отличие от рентгеновских источников со взрывоэмиссионными металлокерамическими типами катодных узлов, излучение рентгеновской трубки с графитокерамическим катодным узлом характеризуется меньшей длительностью импульса тока.

Мощность дозы излучения для РТ с графитокерамическим катодным узлом выше, чем для РТ с гребенчатым металлодиэлектрическим катодом. Это объясняется тем, что при использовании графитокерамического катода максимум тока смещен в область больших напряжений.

В перспективе графитокерамические катодные узлы будут применены для излучателей в портативных импульсных частотных рентгеновских аппаратах.

Глава 3 Разработка комбинированного вольфрамографитового анода.

Исследования, проведенные в последнее десятилетие, показали перспективность применения в медицинской рентгенодиагностике наносекундных импульсных частотных генераторов рентгеновского излучения. Использование таких генераторов делает возможным снизить дозу облучения пациентов при диагностике на порядок и более, по сравнению с рентгеновскими аппаратами постоянного тока [89].

Однако, медицинская диагностика, в отличие от дефектоскопии, требует проведения исследования за ограниченный промежуток времени, определяемый биологическими процессами жизнедеятельности организма. Длительное время экспозиции в данном случае приводит к динамической нерезкости получаемого изображения. В результате основными источниками рентгеновского излучения в медицинской диагностике являются аппараты постоянного тока, обладающие выходной мощностью в повторно-кратковременном режиме до десятков кВт.

Задача создания анода для импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки способного рассеивать тепловую мощность до нескольких кВт возникла с появлением высоковольтных импульсных генераторов с индуктивными накопителями энергии и полностью твердотельной системой коммутации, основанной на SOS-диодах. Рентгеновские аппараты с таким типом генераторов по частоте следования импульсов и, как следствие, по мощности существенно превосходят аппараты с емкостными накопителями энергии, а их средняя выходная мощность ограничивается, главным образом, допустимой тепловой нагрузкой анода. Стоит отметить, что энергия, передаваемая за импульс, может составлять несколько Дж, а за одну экспозицию от сотен до нескольких тысяч Дж. Для импульсных рентгеновских источников с индуктивным накопителем энергии и полностью твердотельной системой коммутации с напряжением включения трубки до 150 кВ достигнута средняя выходная мощность в повторно-кратковременном режиме 1,6 кВт [90], что позволяет использовать данный тип аппаратов для исследования статичных объектов, но затрудняет применение для исследования динамически изменяющихся объектов.

Благодаря стремительному развитию электроники, стали широко применяться цифровые детекторы (flat panel detector) рентгеновского излучения. Однако данные детекторы имеют ограниченное время накопления дозы, например, цифровой плоскопанельный детектор Carestream DRX-1 имеет фиксированное время экспозиции $t = 1,2$ с.

Тем не менее, такие плоско-панельные детекторы находят свое применение не только в медицине, но и решают широкий круг задач в области дефектоскопии, досмотровой техники. Интроскопия динамически подвижных объектов и создание цифровых приемников

рентгеновского излучения на основе аморфного кремния с ограниченным временем накопления дозы делают создание рентгеновских трубок киловаттного диапазона средней мощности актуальной задачей, поскольку, существенно увеличив мощность рентгеновского излучения, можно сократить время экспозиции.

Ограничения при создании взрывоэмиссионной рентгеновской трубки связаны с проблемой отвода тепла из фокуса, т.е. области анода, бомбардируемой электронным пучком. В импульсных аппаратах для достижения минимальных размеров фокусного пятна и получения снимка с высокой геометрической резкостью используется острый анод, выполненный в виде заостренного вольфрамового стержня, что позволяет получить рентгеновский снимок с четкими границами, практически без полутеней. Массивные аноды большой площади или прострельные плоские аноды практически не применяются в наносекундных импульсных диагностических аппаратах из-за сложной системы фокусировки электронного пучка, получаемого в результате ВЭЭ.

В данной главе представлена разработка вольфрамографитового анода для импульсной наносекундной острофокусной РТ, которая работает в повторно-кратковременном режиме, при напряжении до 120 кВ, частоте следования импульсов не менее 1 кГц и средней выходной мощности в повторно-кратковременном режиме 2,5 – 3 кВт [91]. Благодаря принципиально новому подходу при разработке анодной части, данная трубка превосходит по средней выходной мощности в повторно-кратковременном режиме ранее созданные импульсные взрывоэмиссионные рентгеновские трубки.

3.1 Вольфрамографитовый анод для импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки.

Более 99% энергии, подводимой к рентгеновской трубке, выделяется в тепловую на аноде и лишь малая часть (около 0,5%) переходит в рентгеновское излучение. К настоящему времени разработаны и серийно выпускаются взрывоэмиссионные трубки серии ИМА. Данные трубки имеют следующие конструкционные особенности: острый вольфрамовый анод и лезвийный катод из тугоплавкого металла. Такие трубки предназначены для работы с ГВИ с емкостным накопителем энергии [51, 53,]. Работают при средней выходной мощности в повторно-кратковременном режиме до 300 Вт, эффективное фокусное пятно составляет 2,5 – 3 мм.

Для генераторов с индуктивным накопителем энергии разработана взрывоэмиссионная трубка РИА-1, отличающаяся от трубок серии ИМА конструкцией катода и анода, что позволяет ей работать на частотах до 4 кГц, при средней выходной мощности в повторно-

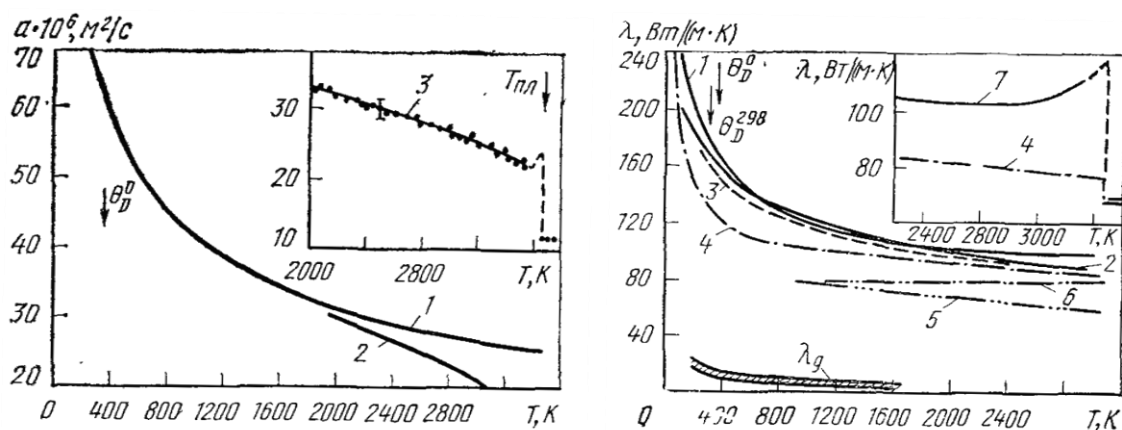
кратковременном режиме до 1,6 кВт. Анод у рентгеновской трубки серии РИА-1 представляет собой заостренный пруток из вольфрама, закрепленный на медном радиаторе, как показано на рисунке 3.1, противоположная сторона которого имеет тепловой контакт с трансформаторным маслом, заполняющим корпус ГВИ. Радиатор устанавливается так, чтобы исключить возможность попадания электронного пучка на него.

Катод трубки РИА металлодиэлектрический [92], что позволяет получать стабильную эмиссию при скорости нарастания напряжения 10^{13} В/с, тогда как на трубках ИМА стабильная эмиссия возникает при скорости нарастания напряжения на порядок короче – 10^{14} В/с.



Рисунок 3.1 – Анод взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с медным радиатором.

В силу того, что коэффициенты температуропроводности и теплопроводности вольфрама в сравнении с медью в несколько раз меньше, то тепловая энергия из области, бомбардируемой электронным пучком, отводится крайне слабо. Причем с ростом температуры эти коэффициенты значительно снижаются (рисунок 3.2). Отвод тепла за счет излучения также крайне мал, поскольку оценочный расчет показал, что за счет излучения, при характерных значениях рабочих температур, отводится мощность порядка лишь нескольких десятков Вт, с поверхности вольфрама. В результате, превышение времени экспозиции более 0,3 с при средней мощности 1,6 кВт и удельной плотности тока электронного пучка 80 А/мм^2 приводит к локальному нагреву поверхности анода в зоне фокусного пятна до температуры плавления вольфрама, дальнейшие нагрузки приводят к кипению и уносу материала анода.



1 – кривая из работы [93], 2 – [94],
3 – [95]

1 – обобщенные данные [96], 2 – усредненные данные [97], 3 – λ_e^g (решеточная составл. теплопроводности, 4 – λ_e^l (электронная составл. теплопроводности), λ_e расчет [98], 6 – то же, но с учетом темп. завис. θ_D (температура Дебая), 7 – [95].

Рисунок 3.2 – Температурные зависимости коэффициентов температуропроводности (a) и теплопроводности (λ) [99].

Для повышения рассеиваемой тепловой мощности, впервые, предлагается использовать комбинированный вольфрамографитовый анод, представляющий собой графитовый стержень с находящимся в центре него вольфрамовым прутком, рис 3.3.

Искусственные углеродные материалы обладают уникальными свойствами. Они имеют теплопроводящие свойства на уровне меди, а температура плавления соизмерима с температурой плавления вольфрама.



Рисунок 3.3 – Схематическое изображение вольфрамографитового анода.

Кроме того, известно, что интенсивность рентгеновского излучения определяется, как

$$I_{x-ray} = k \cdot I \cdot Z \cdot U^2 \quad (3.1)$$

где I_{x-ray} – интенсивность рентгеновского излучения, k – коэффициент пропорциональности, Z – атомный порядковый номер материала анода, I – сила тока рентгеновской трубки, U – разность потенциалов на рентгеновской трубке. Следовательно, соотношение интенсивностей рентгеновского излучения при прочих равных условиях:

$$\frac{I_{x-ray_W}}{I_{x-ray_{Gr}}} = \frac{Z_W}{Z_{Gr}} = 12.33 \quad (3.2)$$

где I_{x-ray_W} , $I_{x-ray_{Gr}}$ – интенсивность рентгеновского излучения с поверхности вольфрама и графита соответственно, Z_W и Z_{Gr} – атомный порядковый номер вольфрама и графита соответственно.

Это дает основание предположить, что интенсивность излучения от углерода с поверхности комбинированного вольфрамографитового анода будет настолько мала, что ей можно пренебречь. Следовательно, в трубке, предложенной конструкции допустима установка графитового радиатора в области анода, бомбардируемой электронным пучком. Также важно, что эффективное фокусное пятно будет определяться только диаметром вольфрамового стержня. Таким образом, упрощается задача фокусировки электронного пучка, направленная на достижение минимальных размеров фокусного пятна.

Следовательно, в трубке, предложенной конструкции допустима установка графитового радиатора прямо в области анода, бомбардируемой электронным пучком. Кроме того, упрощается задача фокусировки электронного пучка, направленная на достижение минимальных размеров фокусного пятна.

В тоже время, допустимая тепловая нагрузка подобной трубки во много раз будет превышать тепловые нагрузки взрывоэмиссионных трубок традиционной конструкции, что существенно расширит область применения импульсных наносекундных рентгеновских аппаратов, поскольку графит обладает высокой теплопроводностью - до 2435 Вт/м*К, что в 6 раз больше чем у меди. Причем радиатор, находящийся в непосредственном контакте с рабочей областью анода, бомбардируемой электронным пучком, будет эффективно отводить тепло от данной области. Использование такой конструкции анода исключает возможность применения медного радиатора, так как

$$\frac{Z_W}{Z_{Cu}} = 2.6 \quad (3.3)$$

где Z_{Cu} – атомный порядковый номер меди.

Таким образом, интенсивность рентгеновского излучения с медного радиатора имеет соизмеримое значение с интенсивностью излучения, генерируемого с основной вольфрамовой части анода, что приводит к недопустимому увеличению площади эффективного фокусного пятна и ухудшению геометрической резкости получаемых изображений.

3.2 Оценка тепловых процессов на аноде импульсной взрывоэмиссионной наносекундной рентгеновской трубки.

Расчет допустимой энергии $W_{\text{доп}}$, подводимой к фокусному пятну анода, в целом нетривиальная задача, для решения которой в большинстве случаев необходимы эмпирические данные. Для РТ с вращающимся анодом в литературе приводится много данных с оценкой допустимой тепловой нагрузки, которую способен выдержать анод. Для взрывоэмиссионных коаксиальных РТ данных по расчетам такого типа не приводится. Нагрузочная способность рентгеновской трубки характеризуется соотношениями:

$$P_{\text{доп}} = f(t_0) \quad (3.4)$$

$$W_{\text{доп}} = P_{\text{доп}} \cdot t_0 \quad (3.5),$$

где $P_{\text{доп}}$ – допустимая мощность фокусного пятна, t_0 – длительность включения трубки.

Для аппарата постоянного тока на рисунке 3.4 представлены кривые допустимых мощностей и энергий для большого и малого фокусов РТ 14-30 БД10-150, для постоянного и пульсирующего анодных напряжений. Зависимости получены экспериментальным путем для определения ресурса работы трубки. Под действием электронного пучка и нагрева поверхности анода до высоких температур возникают перенапряжения в фокусной дорожке, происходит эрозия анода, что приводит к снижению мощности рентгеновского излучения [101 – 103]. Зависимости понятны: допустимая мощность уменьшается с увеличением времени экспозиции; допустимая энергия, передаваемая аноду РТ, тем выше, чем больше время экспозиции; для малого фокусного пятна допустимая мощность ниже, чем для большого.

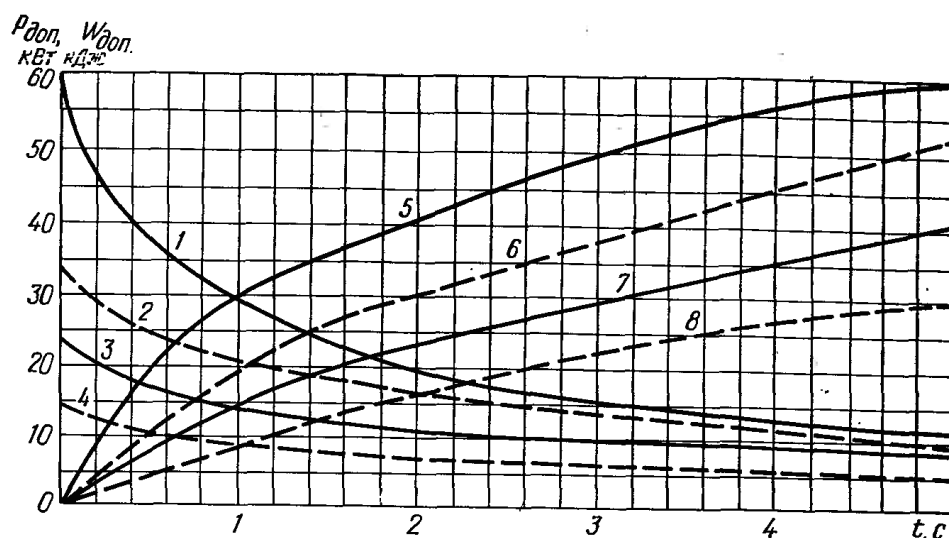


Рисунок 3.4 – Допустимая мощность и энергия в зависимости от длительности снимка для трубок с вращающимся анодом 14-30 БД10-150 на 3000 об/мин и 14-30 БД9-150 на 9000 об/мин. 1, 2 – $P_{\text{доп}}$ для фокусов 2x2 и 1,2x1,2 мм трубок на 3000 и 9000 об/мин соотв., 3, 4 – $P_{\text{доп}}$ для фокусов 1,2x1,2 и 0,6x0,6 мм, 5, 6 – $W_{\text{доп}}$ для кривых 1 и 2, 7, 8 – $W_{\text{доп}}$ для кривых 3 и 4. Сплошная линия – пост. напряжение, прерывистая – пульсирующее напряжение. [100]

Охлаждение поверхности фокусного пятна в основном происходит за счет передачи тепла в тело анода. Охлаждение анода осуществляется частично путем излучения (зависимость мощности излучения от температуры приведена на рисунке 3.5), частично за счет теплопередачи через основание анода в масляный объем генератора. Нагрев и распространение тепла в рентгеновских излучателях зависят от рассматриваемой области: фокусное пятно, тело анода, корпус с маслом. Скорость протекания тепловых процессов в этих областях отличается на несколько порядков. Для фокусного пятна это времена меньше 10^{-3} с, для тела анода - минуты, для корпуса около часа. Исходя из таких значений характерных времен, при единичном снимке можно рассматривать нагрев только в фокусном пятне, а при серии - в теле анода.

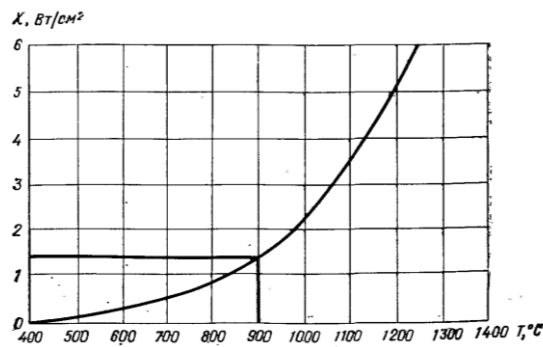


Рисунок 3.5 – Мощность, излучаемая с единицы поверхности вольфрама в зависимости от температуры.

Температура фокусного пятна для анода взрывоэмиссионной трубки T_{ϕ} определяется суммой трех составляющих:

$$T_{\phi}(P, T) = T_0 + T_{\phi M}(P) + T_{\text{д}}(T_{\phi M}, t) \quad (3.6)$$

где T_0 – начальная температура анода, $T_{\phi M}$ – температура после однократного импульса, $T_{\text{д}}$ – остаточная температура от предшествующих импульсов.

Начальная температура T_0 зависит от паузы между снимками, обычно составляет несколько сотен градусов. Нагрев фокусного пятна за время одного импульса определяется решением дифференциального уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.7)$$

где a^2 – коэффициент температуропроводности ($\text{см}^2/\text{с}$).

$$a^2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (3.8)$$

λ – коэффициент теплопроводности ($\text{Вт}/\text{см} \cdot \text{град}$), c – удельная теплоемкость ($\text{Дж}/\text{г} \cdot \text{град}$), ρ – удельная плотность ($\text{г}/\text{см}^3$).

Для РТ с вращающимся анодом приводят решение:

$$T'_{\phi M} = \frac{2P_a(1-\psi)a}{S_{\phi}\lambda} \sqrt{\frac{\Delta t}{\pi}} \quad (3.9)$$

где P_a – выделившаяся на аноде мощность, $\psi = 0,3$ – коэффициент учитывающий влияние вторичной электронной эмиссии, S_{ϕ} – площадь действующего фокуса, Δt – время прохождения

элемента фокусной дорожки под электронным лучом. В силу разных времен воздействия: Δt зависит от скорости вращения анода и составляет тысячные доли секунды, тогда как время импульса во взрывоэмиссионной трубке имеет порядок 10^{-8} секунды, то данная формула не опишет должным образом изменение температуры фокуса за один импульс.

Поскольку во взрывоэмиссионных РТ время воздействия электронного пучка составляет десятки нс, то за это время энергия пучка приведет к нагреву тонкого приповерхностного слоя анода. Объем данной области анода определяется площадью действительного фокусного пятна, и глубиной проникновения электронного пучка в мишень $\delta_{эл}$ (мкм), которая зависит от напряжения, приложенного к трубке и плотности материала соотношением [104]:

$$\delta_{эл} = \frac{0,2 \cdot U^2}{\rho}, \quad (3.10)$$

U – напряжение на трубке (кВ), ρ – плотность материала мишени (г/см³).

Тогда

$$T_{фм} = \frac{\Delta Q(1-\psi)}{c \cdot m} \quad (3.11)$$

ΔQ – энергия передаваемая за 1 импульс (кДж), $(1 - \psi)$ – множитель учитывающий влияние вторичной электронной эмиссии, c – теплоемкость (кДж/кг·градус), m – масса слоя материала мишени, где происходит торможение электронов (кг). Подставив, получаем

$$T_{фм} = \frac{\Delta Q_{[кДж]}(1-\psi)}{c_{\left[\frac{кДж}{кг \cdot град}\right]} \cdot 0,2 \cdot U_{[кВ]}^2 \cdot S_{ф[см^2]} \cdot 10^{-7}} \quad (3.12)$$

Для анода взрывоэмиссионной РТ с медным радиатором РИА-1 диаметр фокусного пятна составляет 1,5 мм, что соответствует площади действительного фокусного пятна $S_{ф} = 6,83 \cdot 10^{-2}$ см², расчетное ускоряющее напряжение электронного пучка $U = 80$ кВ, энергия передаваемая за импульс $\Delta Q = 0,0004$ кДж, в результате:

$$T_{фм} = 167,2 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.13)$$

Далее тепло с поверхности фокуса $S_{ф}$ распространяется в глубинные слои анода. В работе [100] перераспределения температуры из поверхностного в глубинные слои приведен численный способ расчета – методом конечных разностей. Выражение, полученное аппроксимацией кривых, рассчитанных методом конечных разностей:

$$T_{д} = \frac{K_{ф} \cdot W_{ф}}{10^2 \cdot \sqrt{t}}, \quad (3.14)$$

где $T_{д}(t)$ – температура фокусной дорожки в момент времени t ; $K_{ф}$ – коэффициент, равный 28,7 град·см/Вт·с^{1/2}; $W_{ф}$ – энергия на единицу поверхности действительного фокуса за интервал Δt .

Остаточная температура каждого импульса дает вклад в следующий, и сильно зависит от частоты следования импульсов, соответственно, чем выше частота, тем выше остаточная температура фокусного пятна в момент прихода следующего импульса.

Суммарная температура фокуса:

$$T_{ф} = T_{фм}(P) + \sum T_{д}(t) + T_0 \quad (3.15)$$

Для РТ с вращающимся анодом 14-30 БД10-150 на рисунке 3.6 приведен пример суммирования температур с числом оборотов $n=3000$ ($\Delta t=0,02$ с).

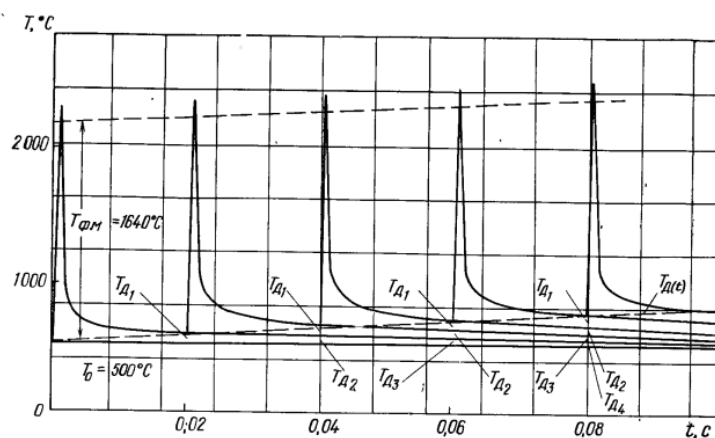


Рисунок 3.6 – Суммирование температуры элемента фокусной дорожки при многократных проходах элемента под электронным лучом. $T_{ФМ}$ – температура после однократного воздействия, $T_{Ф}$ – остаточная температура перегрева элемента от предыдущих проходов его под лучом, T_0 – начальная температура анода. Мощность 50 кВт при $t_0 = 0,1$ с для фокуса $2,0 \times 2,0$ мм, трубка 14-30 БД10-150.

На рисунке 3.7 приведен результат оценочного расчета по суммированию температур для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с анодом в виде вольфрамового заостренного прутка с медным радиатором, конструкция которого описана в пункте 3.1. Трубка работает на частоте 1 кГц, энергия, передаваемая за импульс 0,4 Дж, диаметр эффективного фокусного пятна составляет 1,5 мм.

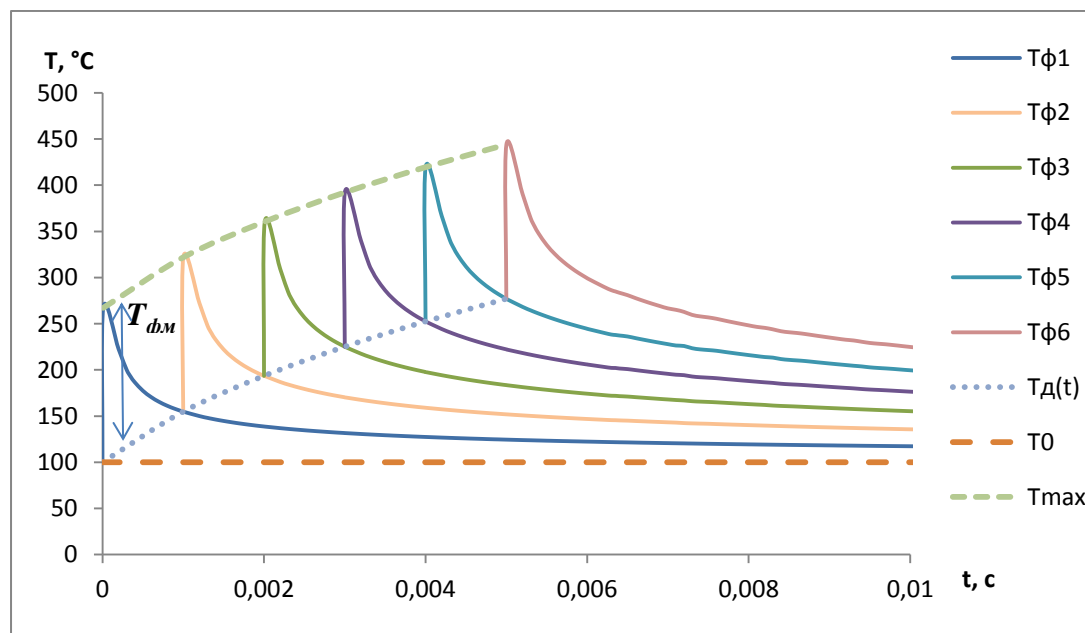


Рисунок 3.7 – Температура фокусного пятна $T_{Ф}$ анода взрывоэмиссионной трубки с медным радиатором для первых 6-и импульсов, энергия передаваемая за импульс 0,4 Дж, диаметр фокусного пятна 1,5 мм, начальная температура анода $T_0 = 100$ °С, $T_{ФМ}$ – температура после однократного импульса, $T_{Ф}(t)$ – остаточная температура от предшествующих импульсов.

Как видно из рисунка 3.7 для данной частоты следования импульсов возможно построить огибающую T_{\max} , позволяющую оценить максимальную допустимую мощность при заданном времени экспозиции либо время работы при заданной мощности.

Далее нами экспериментально измерена температура фокусного пятна при мощностях: 750 Вт, и 1500 Вт для взрывоэмиссионной РТ, для которой представлены расчетная кривая. Данные этих экспериментов приведены на рисунке 3.8. В качестве измерения температуры разработан фоторегистратор, роль детектора в котором выполнял фотодиод. Калибровка регистратора проведена с помощью пирометра ФЭП-4М. Для повышения помехоустойчивости применена дифференциальная схема усиления сигнала, с последующей его модуляцией/демодуляцией. Демодулированный сигнала через буферный усилитель подается на выход схемы.

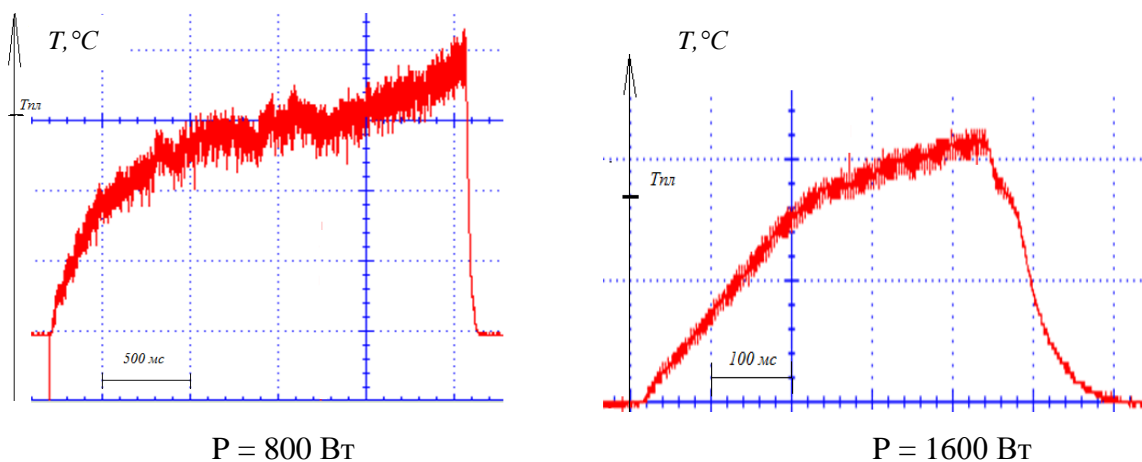


Рисунок 3.8 – Зависимость температуры фокуса для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с анодом с медным радиатором. Экспериментальные зависимости.

При мощности 800 Вт (рисунок 3.8 слева), температура фокусного пятна достигает температуры плавления $T_{\text{пл}}$ за 1,2 с, тогда как по расчетной кривой температура фокуса для мощности 800 Вт $T_{\text{ф}}$ достигает $T_{\text{пл}}$ за 0,9 с. В эксперименте, когда средняя мощность составляет 1600 Вт (рисунок 3.9 справа), поверхность фокусного пятна начинает оплавляться через 0,2 с, расчетное время от нагрева до плавления поверхности фокусного пятна при мощности 1600 Вт составляет 0,15 с. Таким образом, полученные расчетные значения температуры фокусного пятна хорошо согласуются с экспериментальными, что говорит о приемлемом выборе оценочной модели и сделанных допущениях при расчетах.

Нами проведены эксперименты, которые по времени остывания анода позволили найти значения $K_{\text{ф}}$ для разных конструктивных исполнений анода, представляющего собой цилиндрический прут, торцевая часть которого является фокусным пятном взрывоэмиссионной РТ анодов. Например, значение $K_{\text{ф}}$ для анодов с диаметром эффективного фокусного пятна 1,5 мм составляют: $K_{\text{ф}} = 33,8 \text{ град}\cdot\text{см}/\text{Вт}\cdot\text{с}^{1/2}$ для анода с медным радиатором, установленном на расстоянии 10 мм от фокусного пятна, $K_{\text{ф}} = 63,5 \text{ град}\cdot\text{см}/\text{Вт}\cdot\text{с}^{1/2}$ без радиатора.

Для вольфрамографитового анода предварительные оценки дают значения $K_{\phi} = 3,1$ град·см/Вт·с^{1/2}.

Далее мы провели оценку зависимости температуры действующего фокусного пятна заданного размера от частоты следования импульсов. По этим данным можно определить допустимое время работы РТ при заданной частоте следования импульсов и энергии передаваемой за одиночный импульс, т.е. при заданной средней мощности. Начальная температура анода принята $T_0 = 100$ °С. Параллельно с кривыми $T_{\text{д}}$, характеризующими остаточную температуру после импульса, проходят линии, нанесенные точками того же цвета – это максимальная температура фокуса $T_{\text{ф max}}$ с учетом нагрева от импульса в момент времени t .

Численный расчет нагрева фокусного пятна проведен для анода, представляющего собой цилиндрический прут диаметром 1,5 мм, торцевая часть которого является фокусом. Зависимость представлена на рисунке 3.9.

По кривым на графике видно, что такая конструкция анода, практически не работоспособна, имеет очень большое ограничение по допустимой мощности. При средней мощности 60 Вт ($\Delta Q = 0,6$ Дж, $f = 100$ Гц) фокусное пятно достигнет температуры плавления за 1,2 секунды, при мощности 150 Вт ($f = 250$ Гц) и 300 Вт ($f = 500$ Гц) – за 0,2 с и 0,06 с соответственно.

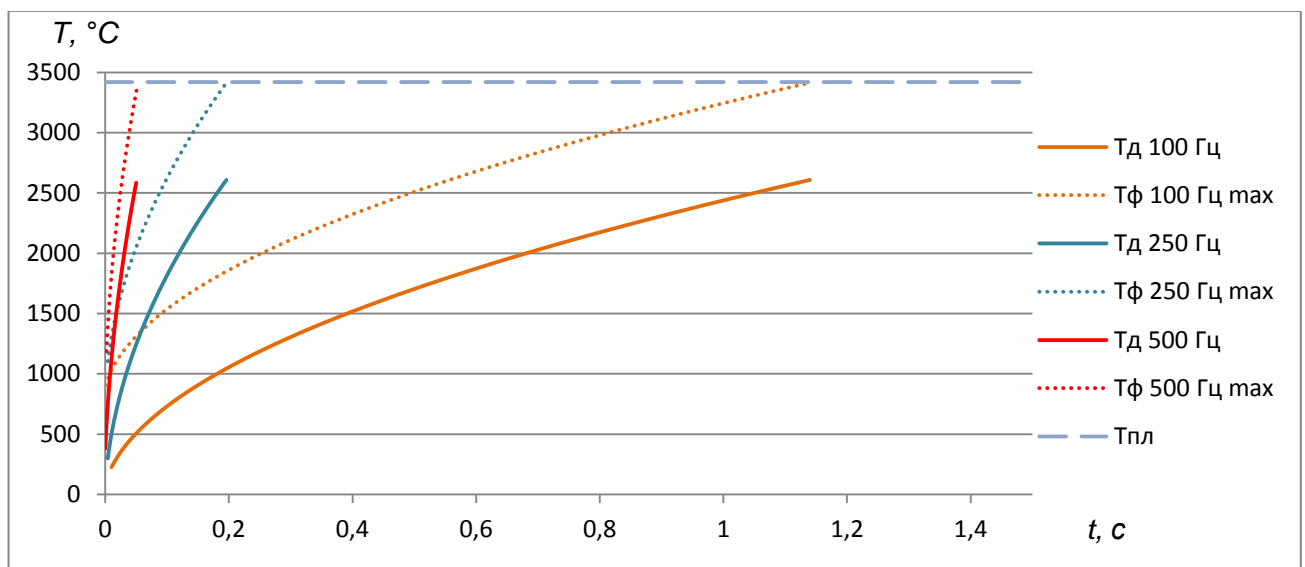


Рисунок 3.9 – Зависимость температуры фокуса для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с анодом, выполненным в виде вольфрамового стержня. Оценочный расчет. Эффективный диаметр фокусного пятна 1,5 мм, энергия в импульсе $\Delta Q = 0,6$ Дж.

Установка медного радиатора позволяет увеличить среднюю мощность, рассеиваемую на аноде, хотя эффективность теплоотвода снижается из-за удаленного расположения радиатора в зоне, не подвергающейся бомбардировке электронным пучком. На рисунке 3.10 представлены расчетные зависимости температуры фокусного пятна от времени работы при разной частоте следования импульсов для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с медным радиатором.

Смоделированы случаи для работы РТ с частотами следования импульсов 1 кГц, 2,5 кГц, 4 кГц, т.е. средняя мощность для выбранных режимов составляет: 600 Вт, 1500 Вт, 2400 Вт соответственно.

По графикам видно, что при рассеиваемой мощности 2400 Вт ($f=4$ кГц) температура фокусного пятна достигает температуры плавления за 0,09 с. При рассеиваемой мощности 1500 Вт ($f=2,5$ кГц) плавление поверхности фокусного пятна произойдет после 0,15 с. Таким образом, исходя из данного расчета, трубка может работать в течении 0,9 секунды при мощности 500 Вт, а 0,2 секунды при мощности 1,25 кВт.

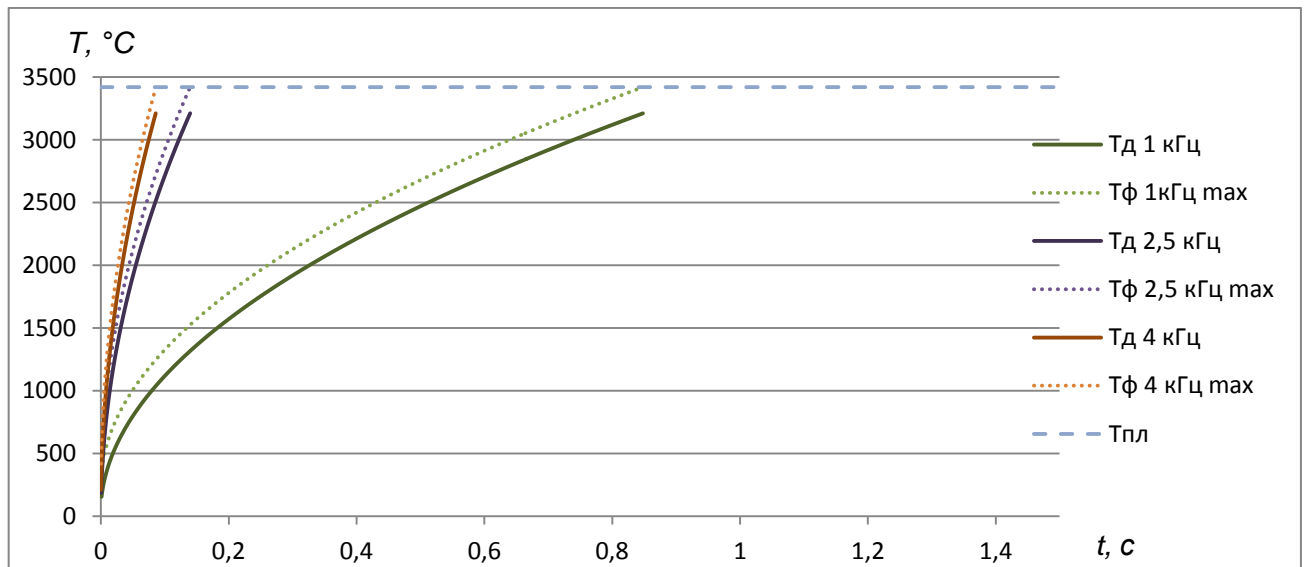


Рисунок 3.10 – Зависимость температуры фокуса для взрывозмиссионной рентгеновской трубки с анодом с медным радиатором. Оценочный расчет. Эффективный диаметр фокусного пятна 1,5 мм, энергия в импульсе $\Delta Q = 0,6$ Дж.

На рисунке 3.11, представлен расчет нагрева фокусного пятна для предложенного вольфрамографитового анода, при установке графитового радиатора непосредственно в рабочей области анода.

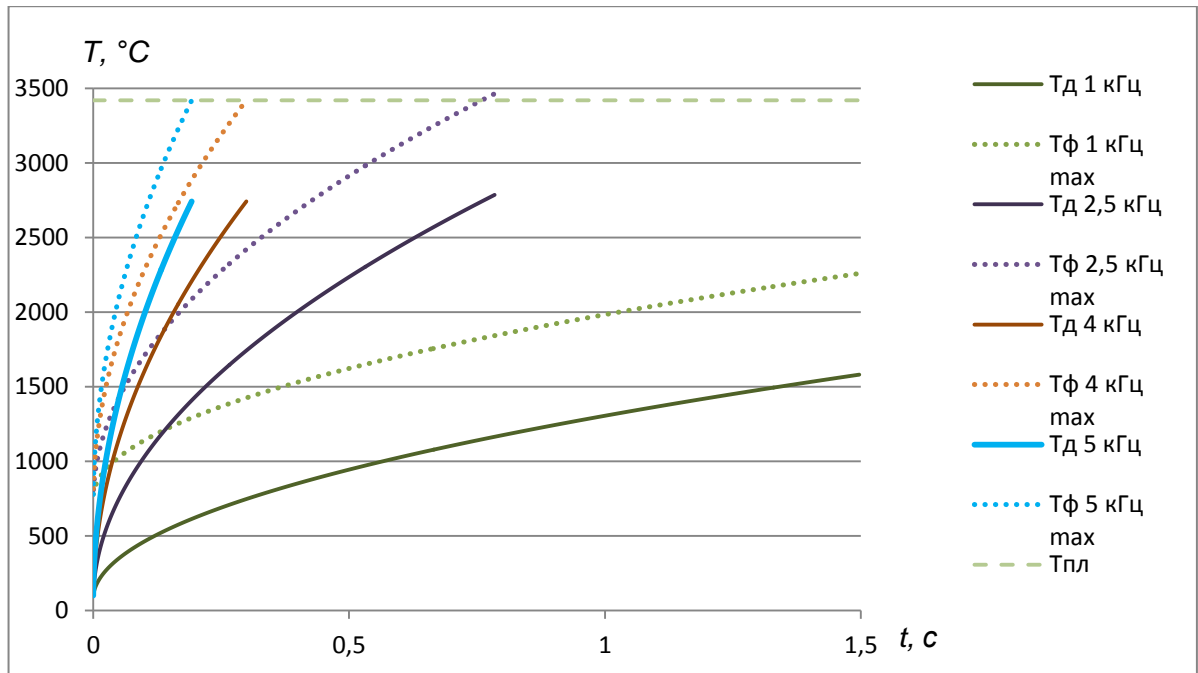


Рисунок 3.11 – Зависимость температуры фокуса для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с вольфрамографитовым анодом. Оценочный расчет. Эффективный диаметр фокусного пятна 1,5 мм, энергия за импульс $\Delta Q = 0,6$ Дж.

Значения допустимой мощности, полученные для вольфрамографитового анода расчетно, превосходят практически в два раза значения допустимой мощности для анода с медным радиатором, который применяется на данный момент. При мощности $P = 2,4$ кВт, температура плавления фокусного пятна вольфрамографитового анода достигает температуры плавления $T_{пл}$ за 0,3 с, а в случае анода с медным радиатором это время оценивается около 0,1 с. Для мощности 1,5 кВт, эти времена равны соответственно для вольфрамографитового анода 0,8 с, а для анода с медным радиатором 0,2 с.

Данная расчетная модель справедлива для нагрева фокусного пятна до температуры плавления материала, т.к. далее она не учитывает дополнительные затраты энергии на плавление, и к тому же после плавления, резко меняются термодинамические постоянные.

3.3 Экспериментальное исследование характеристик вольфрамографитового анода: эффективное фокусное пятно, радиационный выход, ресурс работы.

Изготовлен макетный образец вольфрамографитового анода для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки. На рисунке 3.12 показано фото, изготовленного анода. В графитовый цилиндр диаметром 10 мм запрессован вольфрамовый пруток диаметром 1,5 мм, так, что торцевые поверхности цилиндра и прутка находятся в одной плоскости с погрешностью не более 0,1 мм.



Рисунок 3.12 – Вольфрамографитовый анод, макетный образец.

Эксперимент проведен на установке с безмасляной системой откачки (рисунок 3.13), при давлении в камере не хуже 10^{-7} торр. Генератор высоковольтных импульсов имеет следующие параметры: амплитуда импульса напряжения $U_a = 140$ кВ, частота следования импульсов до 5 кГц, длительность импульса напряжения на полувывоте составляет 20 нс.

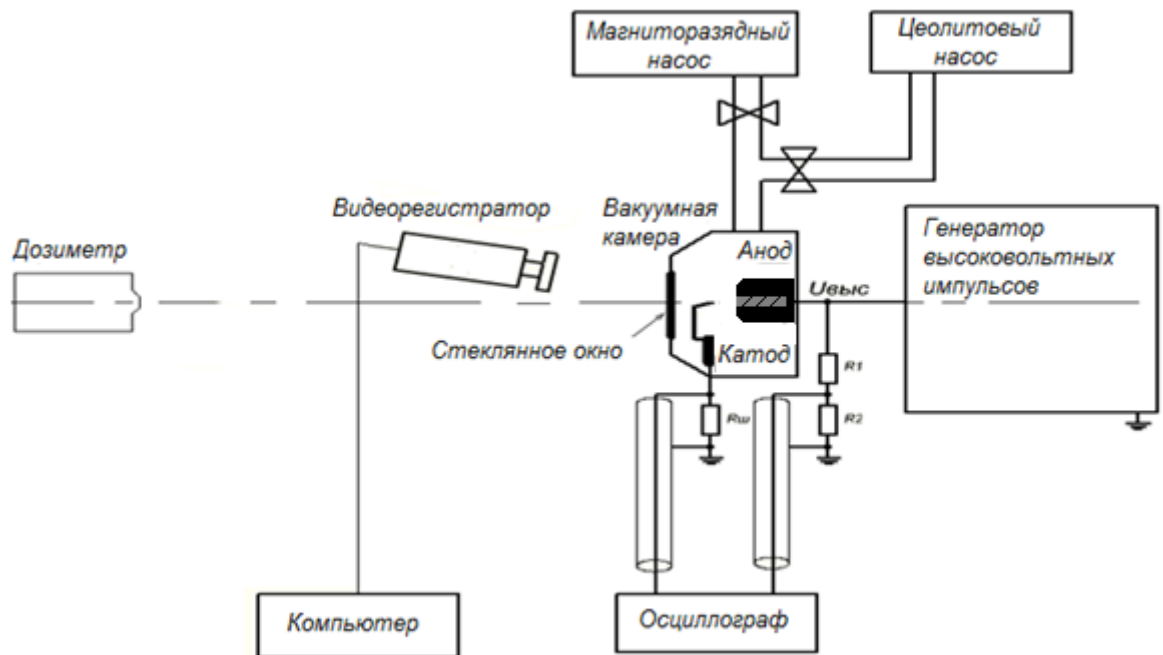


Рисунок 3.13 – Схема экспериментальной установки

Регистрация импульсов напряжения и тока рентгеновской трубки осуществляется осциллографом Tektronix TDS 620 В с полосой пропускания 500 МГц. Каналы регистрации тока и напряжения согласованы с точностью не хуже 0,1 нс. Дозовые характеристики регистрируются с помощью дозиметра ДКС-АТ1123, сертифицированный Росреестром как средство измерения импульсов излучения наносекундной длительности. С помощью видеокамеры производится наблюдение за тепловыми процессами, происходящими на аноде, с временным разрешением 20 мс.

С целью получения размеров области, бомбардируемой электронным пучком, проведен эксперимент, в котором с помощью камеры-обскуры определен размер эффективного фокусного пятна исследуемой трубки, рисунок 3.14. Анод трубки представлен на рисунке 3.12, катод, установленный на одной оси напротив анода, представляет собой тонкостенную трубку диаметром 1 мм.

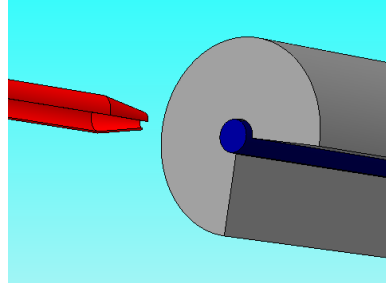


Рисунок 3.14 – Конструкции взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с вольфрамографитовым анодом.

Схема эксперимента показана на рисунке 3.15. Диаметр фокусного пятна определен по формуле:

$$\frac{\varnothing_2}{\varnothing_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad (3.16)$$

Изображение фокусного пятна получено на цифровой плоскопанельный детектор CARESTREAM DRX-1. Расстояния $D_2 = 600$ мм, $D_1 = 100$ мм, таким образом, увеличение диаметра фокусного пятна происходит в 6 раз.

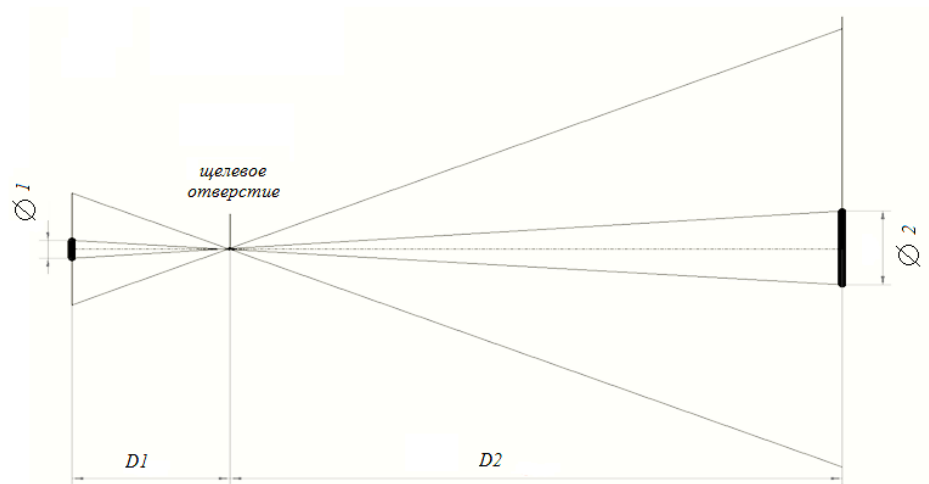


Рисунок 3.15 – Схема измерения фокусного пятна рентгеновской взрывоэмиссионной трубки.

Анализ размера и формы фокусного пятна показывает, что наибольшее значение хорды автографа электронного пучка составляет 3,2 мм, при этом максимальная плотность пучка лежит в области диаметром 1,5 мм, рисунок 3.16.

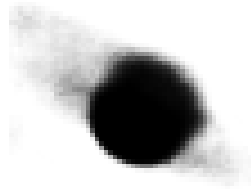


Рисунок 3.16 – Форма эффективного фокусного пятна на поверхности вольфрамографитового анода.

Таким образом, наблюдается генерация рентгеновского излучения не только с поверхности вольфрамового прутка, но и с прилегающей к вольфраму графитовой части анода. Но интенсивность данного излучения очень слабая. Обязательным требованием при эксплуатации рентгеновских аппаратов является установка фильтров, отсекающих низкоэнергетичную составляющую излучения. Согласно ГОСТ 26140-84, например, для аппаратов напряжением 100-125 кВ толщина общего фильтра должна быть эквивалентна 4 мм алюминия, а для напряжений 70-80 кВ необходимо применение фильтра толщиной 2 мм. Установка алюминиевого фильтра толщиной 2 мм привела к полному поглощению излучение с поверхности графита, как видно на рисунке 3.17. Данное изображение фокусного пятна имеет четкие контрастные границы.

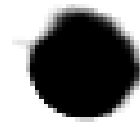
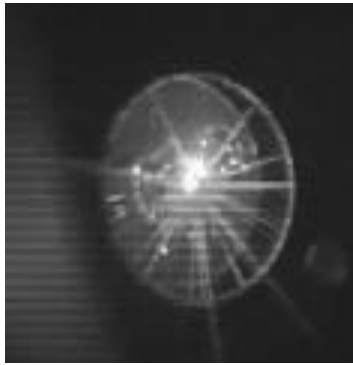


Рисунок 3.17 – Форма эффективного фокусного пятна на поверхности вольфрамографитового анода при общем фильтре толщиной 2 мм алюминия.

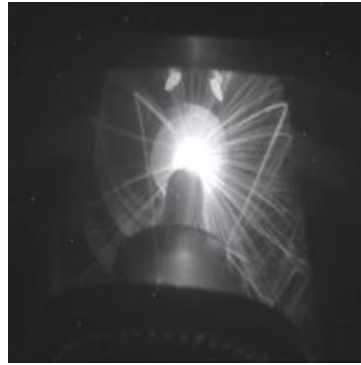
Измерение размеров эффективного фокусного пятна для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с комбинированным вольфрамографитовым анодом показывает, что его диаметр составляет 1,5 мм, что соответствует диаметру вольфрамового стержня. Таким образом, предложенная конструкция анода позволяет создать острофокусные рентгеновские трубки, с размером фокусного пятна вплоть до 0,1 – 0,3 мм без использования систем фокусировки электронного пучка.

На рисунке 3.18 показано изображение, зарегистрированное на цифровой плоскопанельный детектор CARESTREAM DRX-1 при использовании рентгеновской взрывоэмиссионной трубки с комбинированным вольфрамографитовым анодом.



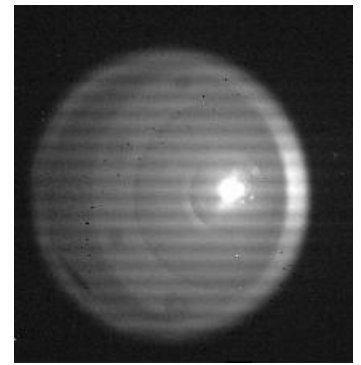
а) анод без радиатора

$P = 0,15$ кВт, $t = 0,5$ с



б) анод с медным радиатором

$P = 1,5$ кВт, $t = 0,5$ с



в) вольфрамо-графитовый анод

$P = 3$ кВт, $t = 0,5$ с

Рисунок 3.19 – Видеокадры различных типов анодов во время работы
а), б) заметен разлет материала анода, в) стабильная работа.

P - средняя мощность, рассеиваемая на аноде, t – время экспозиции.

На рисунках 3.19.а, 3.19.б показаны видеокадры анодов взрывоэмиссионных РТ в момент работы, когда превышена допустимая тепловая мощность, а на рисунке 3.19.в показан видеокадр стабильной работы РТ. Стабильная работа РТ наблюдается для случая, когда используется комбинированный вольфрамографитовый анод. При испытании на допустимую тепловую нагрузку, комбинированный вольфрамографитовый анод, как и ожидалось, демонстрирует лучшие характеристики. При установленном времени экспозиции эрозия анода, сопровождающаяся разлетом материала, наблюдается для РТ с вольфрамовым анодом без радиатора при мощности 0,15 кВт, для РТ с медным удаленным радиатором 1,5 кВт. РТ с вольфрамографитовым анодом достигнута мощность 3 кВт, при этом эрозия анода не наблюдается.

Оценка ресурса работы определена путем измерения мощности дозы излучения после наработки РТ нескольких серий по $1 \cdot 10^5$ импульсов в повторно-кратковременном режиме работы, то есть при средней мощности, подводимой к РТ – 3,0 кВт, и времени экспозиции 0,5 с. После наработки $2 \cdot 10^6$ импульсов мощность дозы снизилась на 2 % от первоначального значения, наблюдается незначительная эрозия поверхности анода. За срок службы трубки принимается такое количество включений трубки на типовом повторно-кратковременном режиме работы, за которое доза излучения уменьшится не более чем на 30% [100]. Таким образом, можно сделать вывод, что трубка отработает 10^7 импульсов и доза излучения снизится примерно на 20 – 25 %. Проведен контроль массы материала, унесенной с анода, после наработки РТ с вольфрамографитовым анодом $2 \cdot 10^6$ импульсов. Значение унесенной массы не превышает 0,01 % от массы вольфрамовой части анода, это подтверждает, что износ анода за данное число импульсов практически не происходит.

После наработки РТ с вольфрамографитовым анодом $2 \cdot 10^6$ импульсов при средней мощности 3 кВт и времени каждой экспозиции 0,5 с, получена осциллограмма напряжения и

тока, приведенная на рисунке 3.20. Включение трубки наступает при напряжении близком к максимальному, как видно из рисунка 3.20.а и 3.20.б, длительность тока на полувысоте составляет 10 нс, амплитуда импульса тока – порядка 300 А. Такие значения данных величин характеризуют стабильную работу РТ.

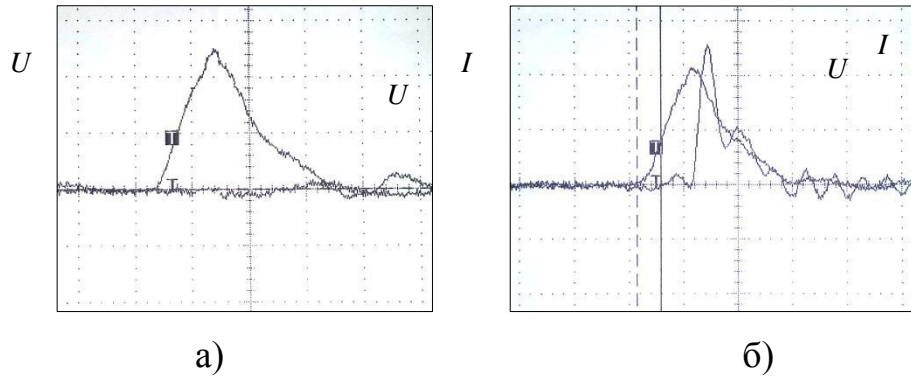


Рисунок 3.20 – Осциллограммы импульсов тока I и U ; а) импульс напряжения на нагрузке 51 кОм, $U = 130$ кВ, б) импульс напряжения на рентгеновской трубке после наработки $2 \cdot 10^6$ импульсов, $U = 115$ кВ, $I = 300$ А. Развертка по горизонтали 20 нс/дел.

На рисунках 3.21 и 3.22 с семикратным увеличением показаны фотографии внешнего вида комбинированного вольфрамографитового анода и анода, выполненного в виде вольфрамового стержня, полученные до и после эксперимента.

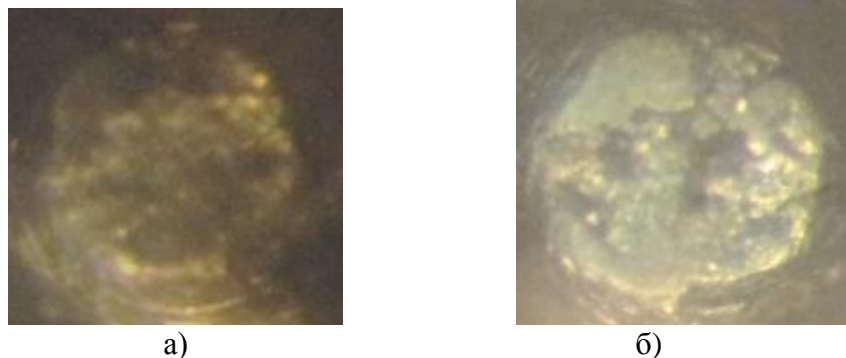


Рисунок 3.21 – Вольфрамографитовый анод; а) до эксперимента; б) после наработки $2 \cdot 10^6$ импульсов при мощности 3 кВт и времени экспозиции 0,5 с.

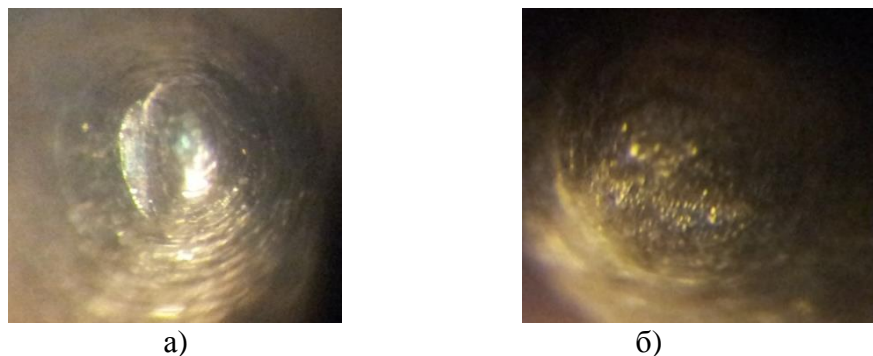


Рисунок 3.22 – Анод в виде вольфрамового стержня без радиатора, а) до эксперимента, б) после наработки $2 \cdot 10^4$ импульсов при мощности 0,3 кВт и времени экспозиции 0,5 с.

Можно отметить, что поверхность фокуса в вольфрамографитовом аноде после наработки $2 \cdot 10^6$ импульсов практически не имеет следов оплавления или массивных разрушений, хотя данный анод работал при мощности 3 кВт и времени каждой экспозиции 0,5 с. Для сравнения показан анод в виде вольфрамового стержня, поверхность которого после наработки $2 \cdot 10^4$ импульсов при средней мощности менее 0,3 кВт существенно оплавлена. Как видно на фото, след риски глубиной несколько сотен микрон, который присутствует на фото (рисунок 3.21.б) до эксперимента, практически исчез после работы.

Таким образом, комбинированный вольфрамографитовый анод имеет предел по допустимой тепловой мощности гораздо выше, чем другие аноды для взрывоэмиссионных рентгеновский трубок. Предположительный ресурс работы данного анода составляет не менее 10^7 импульсов при средней мощности до 3 кВт. Для медицинской рентгеновской диагностики времена $t < 1$ с являются оптимальными, как для получения качественного снимка, так и целесообразности дозовой нагрузки на пациентов и медицинский персонал.

3.5 Выводы по главе

Разработана принципиально новая анодная система для взрывоэмиссионной острофокусной импульсной РТ. Благодаря комбинированному вольфрамографитовому аноду средняя мощность рентгеновской трубки в повторно кратковременном режиме увеличена до 3 кВт.

Произведен оценочный расчет допустимой тепловой мощности для взрывоэмиссионных анодов, которые имеют размер эффективного фокусного пятна 1,5 мм, трех видов: анода в виде вольфрамового стержня, острейного вольфрамового анода с медным радиатором, комбинированного вольфрамографитового анода. Расчеты и эксперименты показали, что по допустимой тепловой нагрузке вольфрамографитовый анод в 2 – 3 раза превосходит анод с медным радиатором и в десятки раз анод, выполненный в виде вольфрамового стержня без радиатора.

Размер эффективного фокусного пятна РТ с вольфрамографитовым анодом определяется только размером части анода, изготовленной из вольфрама, что позволяет создавать мощные острофокусные рентгеновские трубки. Данная анодная система обладает повышенной износостойкостью в сравнении с остальными.

Экспериментально установлено, что ресурс работы в повторно кратковременном режиме вольфрамографитового анода составляет при рассеиваемой мощности до 3 кВт и времени экспозиции 0,5 секунды более $2 \cdot 10^6$ импульсов. Расчетные оценки ресурса работы

показывают, что вольфрамографитовый анод будет стабильно работать свыше 10^7 импульсов в типовом повторно-кратковременном режиме при средней мощности до 3 кВт.

Глава 4 Компактный импульсный рентгеновский генератор с регулировкой эффективной энергии рентгеновского излучения мощностью до 3 кВт при частоте следования импульсов до 5 кГц.

Открытие и разработка твердотельного прерывателя тока (SOS-диод) позволила создать серию компактных импульсных рентгеновских аппаратов с индуктивными накопителями энергии [105], сочетающих в себе лучшие характеристики, как аппаратов постоянного тока, так и импульсных рентгеновских аппаратов, в схемах высоковольтных генераторов которых применяются емкостные накопители энергии.

В традиционной схеме высоковольтных импульсных аппаратов применяется емкостной накопитель энергии с обязательным использованием газонаполненного разрядника-обострителя высокого давления [53]. Такая схема позволяет создавать устройства с минимальными массо-габаритными показателями среди всех видов рентгеновских генераторов, при сравнимых уровнях высокого напряжения [106]. Однако, аппараты такого типа генерируют импульсы рентгеновского излучения с частотами 10 – 20 Гц, а их выходная мощность не превышает 300 Вт, к тому же разброс по напряжению высоковольтных импульсов составляет более 30%. Эти ограничения приводят к тому, что данные рентгеновские аппараты применяют лишь в ограниченных областях народного хозяйства. Например, они нашли широкое применение в дефектоскопии, где длительность экспозиции не является решающим фактором при проведении работ, тогда как в медицинской диагностике время исследования, зависящее от допустимой средней выходной мощности – один из важнейших показателей, определяющих качество снимка. Особенно остро вопрос высокой выходной мощности встает при использовании цифровых детекторов рентгеновского излучения, которые имеют ограничение по времени накопления дозы. В результате, серийно выпускаемые импульсные аппараты с емкостными накопителями энергии из-за низкой выходной мощности не применяются в составе мобильных цифровых рентгеновских, как медицинских, так и дефектоскопических комплексов.

В сравнении с аппаратами постоянного тока с термоэмиссионными трубками, в импульсных аппаратах отсутствует система накала катода, а генерация рентгеновского излучения осуществляется в виде серии импульсов наносекундной длительности. Малая длительность импульсов позволяет резко снизить требования к изоляционным промежуткам, и в результате импульсные аппараты в разы легче, чем аппараты постоянного тока соответствующего напряжения. Применение взрывоэмиссионного катода позволяет генерировать импульсы с амплитудой тока в сотни ампер, достигать мегаваттного уровня мощности в импульсе, при длительностях импульсов менее 100 нс. Существенным недостатком импульсных аппаратов является нерегулируемое выходное напряжение, что обусловлено

особенностью традиционно используемой схемы питания взрывоэмиссионной трубки в аппаратах с емкостным накопителем энергии. В тоже время, при работе с рентгеновизуализирующими цифровыми системами импульсные рентгеновские аппараты демонстрируют снижение дозы, требующейся для получения изображения, в десятки раз [89, 107] по сравнению с аппаратами постоянного тока, что открывает широкую перспективу для наносекундных генераторов излучения.

В данной главе будет показано, что разработанная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка с комбинированными электродами позволяет реализовать оперативную регулировку эффективной энергии рентгеновского излучения в импульсных аппаратах с индуктивным накопителем энергии. Также исследована работа данного типа аппаратов с цифровыми плоскопанельными детекторами рентгеновского излучения. Описано создание малогабаритного генератора рентгеновского излучения с допустимой средней рассеиваемой мощностью до 3 кВт.

4.1 Генератор высоковольтных импульсов наносекундной длительности с частотой следования до 5 кГц.

Импульсные генераторы с индуктивными накопителями энергии и полупроводниковыми прерывателями тока представляют собой полностью твердотельную систему. Данные генераторы характеризуются высокой частотой следования импульсов высокого напряжения, с амплитудной стабильностью не хуже 1%, при средней выходной мощности до 5 кВт при напряжении до 120 кВ, что позволяет использовать импульсные рентгеновские источники на основе таких высоковольтных генераторов в медицинской диагностике [90]. На рисунке 4.1 приведена принципиальная схема генератора такого типа ранее созданного нами. Для данного генератора частота следования импульсов достигает 4 кГц, а выходная мощность – 1,5 кВт. Ключевыми узлами схемы являются: тиристорное зарядное устройство, магнитный компрессор, обостритель напряжения – SOS-диод и нагрузка, в качестве которой использована взрывоэмиссионная рентгеновская трубка.

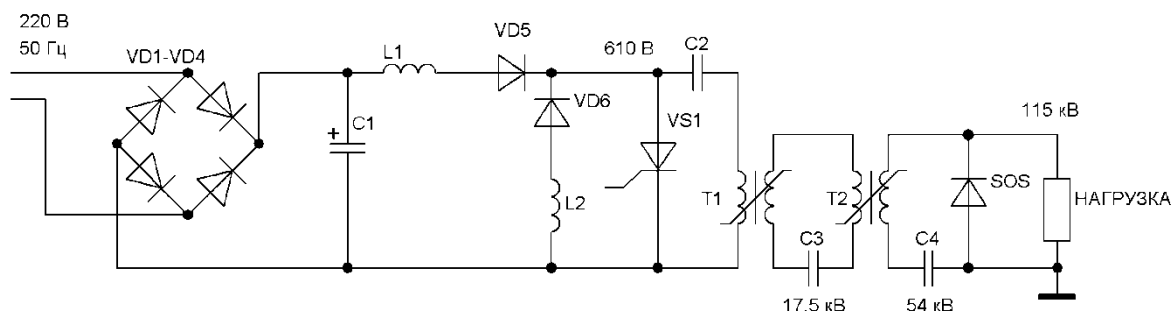


Рис. 4.1 – Электрическая схема генератора с двумя звеньями магнитного сжатия. VD1 – VD6 – КД203Г; VS1 – ТЧИ100-7; SOS – полупроводниковый прерыватель тока; C1 - REC-350-470мкФ (6 штук); C2 – Еrcos B32654A6684J1000 -630-0,68 мкФ (6 штук); C3 - КВИ-3-6800пФ-12кВ (2 штуки); C4 - КВИ-3-1000пФ-16кВ (4 штуки); L1, L2 – индуктивности; T1, T2 – магнитные ключи.

Принцип действия генераторов высокого напряжения с индуктивным накопителем энергии основан на том, что амплитуда выходного импульса напряжения прямо пропорционально зависит от амплитуды тока в индуктивном накопителе и длительности обрыва тока:

$$U \sim L \cdot di/dt, \quad (4.1)$$

где U – выходное напряжение, L – индуктивность, di/dt – скорость обрыва тока.

Одним из способов изменения амплитуды импульса тока является введение системы подмагничивания магнитопроводов высоковольтных ключей сжатия магнитного компрессора. Данная система решает задачу контролируемого насыщения сердечников магнитных ключей при различных уровнях напряжения конденсатора соответствующего звена, что приводит к изменению амплитуды импульса тока. Существенным недостатком данной системы является сложность ее реализации в высоковольтных генераторах, как с точки зрения сохранения электрической прочности конструкции, так и существенного возрастания потребляемой энергии. Также известен способ регулировки выходного напряжения путем изменения значения индуктивности выходного контура генератора. Таким способом осуществляется регулировка напряжения в импульсном частотном наносекундном генераторе, описанном в работе [108] и созданном в нашей лаборатории, с мощностью в импульсе до 500 МВт, напряжением до 520 кВ. Длительность импульса на полувысоте регулируется от 15 до 60 нс путем замены катушки индуктивности. При данном способе регулировки длительности и амплитуды импульса напряжения необходима замена катушки индуктивности в выходной схеме, из-за сложности замены катушки такие генераторы применяются в ограниченных сферах, например, в научной деятельности.

Для портативных рентгеновских аппаратов нами создан импульсный генератор, в котором момент насыщения сердечников магнитных ключей регулируется другим способом —

изменением уровня заряда первичного низковольтного накопителя C_2 , работающего при напряжении ниже 1000 В, что влияет на момент насыщения высоковольтных магнитопроводов всех звеньев сжатия генератора [109]. Снижение напряжения заряда конденсатора C_2 в звене сжатия магнитного компрессора генератора импульсов приводит к тому, что сердечник магнитного ключа переходит в насыщенное состояние не в момент завершения передачи энергии из предыдущего звена, а несколько позже. Таким образом, к моменту насыщения ключа магнитного звена сжатия, конденсатор этого звена уже успевает несколько разрядиться через обмотку ключа, находящегося в ненасыщенном состоянии, что приводит к уменьшению амплитуды импульса тока разряда этого конденсатора, после перехода сердечника магнитного ключа в насыщенное состояние и, соответственно, уменьшению амплитуды импульса выходного напряжения.

Эксперименты по регулировке выходного напряжения импульсного высоковольтного наносекундного генератора были проведены с помощью лабораторного трансформатора, которым регулировалось напряжение питания генератора.

Типичные осциллограммы приведены на рисунках 4.2, 4.3. В качестве нагрузки был использован резистор ТВО-60 с сопротивлением 1 кОм.

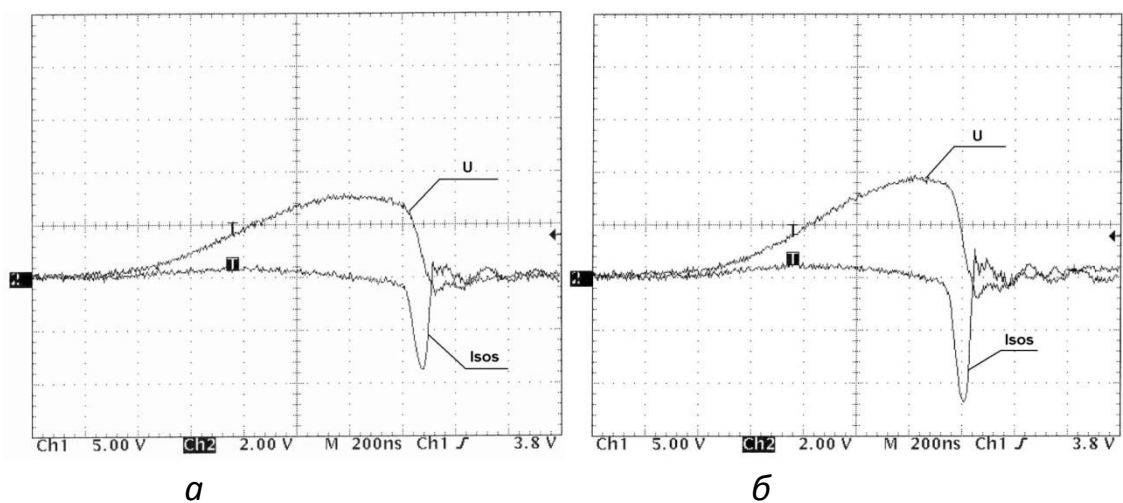


Рисунок 4.2 – Осциллограмма напряжения U на конденсаторе последнего звена магнитного сжатия C_4 и тока полупроводникового прерывателя $Isos$ генератора с двумя звеньями магнитного сжатия. а) напряжение первичного накопителя – 520 В; амплитуда напряжения C_4 – 36,5 кВ; амплитуда тока обратной накачки прерывателя – 158 А; б) напряжение первичного накопителя – 600 В; амплитуда напряжения C_4 – 47,3 кВ; амплитуда тока обратной накачки прерывателя – 207 А.

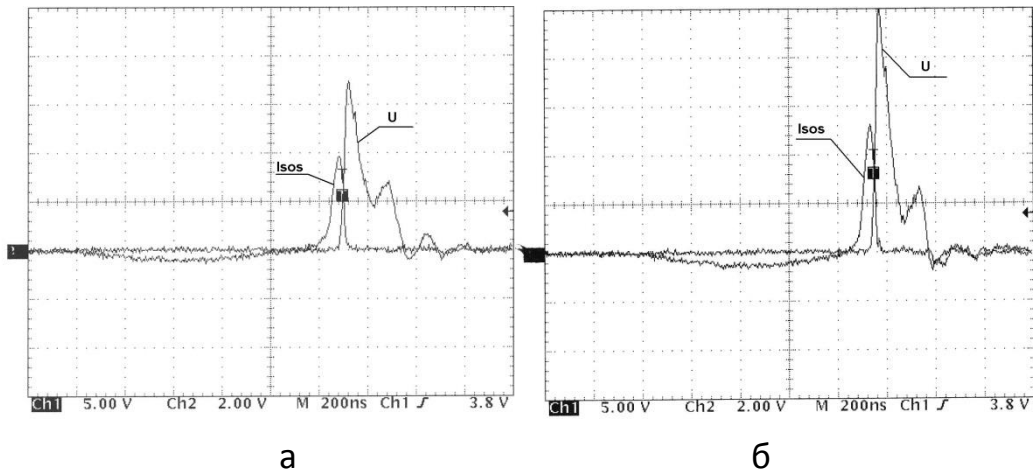


Рисунок 4.3 – Осциллограмма выходного напряжения U на нагрузке 1 кОм и тока полупроводникового прерывателя $Isos$ генератора с двумя звеньями магнитного сжатия. а) напряжение первичного накопителя – 520 В ; амплитуда напряжения на нагрузке – $85,5\text{ кВ}$; амплитуда тока обратной накачки прерывателя – 158 А ; б) напряжение первичного накопителя – 600 В ; амплитуда напряжения на нагрузке – $112,4\text{ кВ}$; амплитуда тока обратной накачки прерывателя – 207 А .

Таким образом, получена зависимость выходного напряжения от напряжения на первичном накопителе, результаты эксперимента приведены на рис. 4.4.

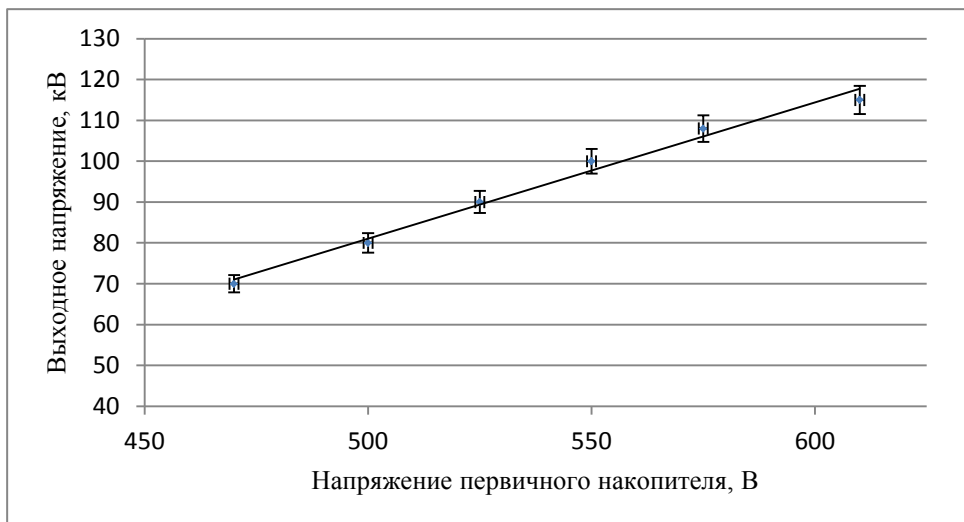


Рисунок 4.4 – Зависимость выходного напряжения генератора с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока на нагрузке 1 кОм в зависимости от напряжения первичного накопителя.

Как видно из приведенного рисунка, изменение напряжения конденсатора первичного накопителя $C2$ от 450 до 610 В приводит к пропорциональному изменению выходного напряжения от 70 до 120 кВ . Диапазон изменения напряжения имеет границы. Дальнейшее снижение напряжения первичного накопителя ниже 450 В приводит к выходу контуров магнитного генератора из согласованного режима. Повышение напряжения свыше 630 В не

проводилось, так как конденсатор $C2$ имеет максимально допустимое рабочее напряжение: 630 В.

Система оперативной регулировки выходного напряжения генератора импульсов.

Во вновь созданном генераторе высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии реализация данного метода регулировки напряжения выполнена с помощью блока управления, который контролирует работу транзистора $VT1$, как показано на рисунке 4.5. Также с помощью блока управления задается частота следования импульсов и время экспозиции. Генератор имеет следующие выходные параметры: максимальное напряжение на нагрузке 1 кОм – 120 кВ, энергия в импульсе – 0,6 Дж, максимальная частота следования импульсов – 5 кГц, средняя выходная мощность до 3 кВт.

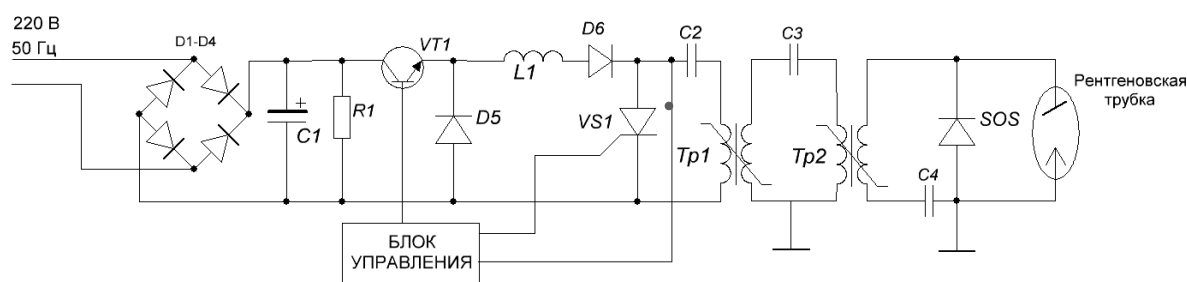


Рисунок 4.5 – Принципиальная схема ГВИ с блоком управления

Принципиальная схема регулятора приведена на рисунок 4.6.

На контакты $K1$ и $K2$ подается напряжение управления MOSFET транзистором $VT1$.

На контакт $K3$ подается сигнал разрешения включения транзистора $VT1$.

На контакт $K4$ подается аналоговый сигнал, соответствующий напряжению ГВИ.

На контакты $K5$ и $K6$ подается напряжение питания низковольтной части схемы (драйвер ключа с оптоэлектронной гальванической развязкой $D1$, компаратор $D2$ и аналоговый оптрон с открытым коллектором $D3$).

На контакты $K7$ и $K8$ подается выпрямленное сетевое напряжение.

На контакт $K9$ подается сигнал включения тиристора $V4$.

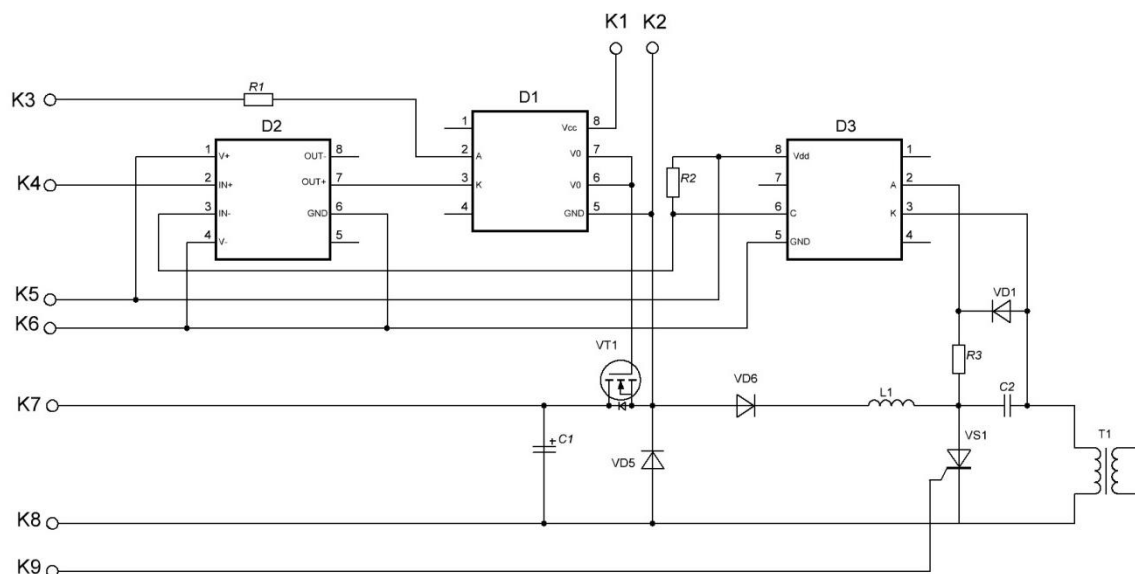


Рисунок 4.6 – Принципиальная электрическая схема системы регулирования выходного напряжения импульсного высоковольтного наносекундного генератора с индуктивным накопителем энергии и твердотельной системой коммутации.

Работа данной схемы реализуется следующим образом. При подаче напряжения на контакты $K7$ и $K8$ конденсатор $C1$ заряжается до амплитудного значения сетевого напряжения. На анод драйвера ключа с оптоэлектронной гальванической развязкой $D1$ с контакта $K3$ подается высокий уровень.

Конденсатор $C2$ не заряжен, и входной ток драйвера ключа $D1$ равен 0, а напряжение на его коллекторе равно напряжению питания. Это напряжение поступает на инвертирующий вход компаратора $D2$, а на неинвертирующий вход поступает напряжение управления с контакта $K4$. Так как напряжение на инвертирующем входе компаратора $D2$ больше, чем на неинвертирующем входе, то напряжение на выходе компаратора $D2$ равно нулю. Этот сигнал подается на катод драйвера ключа с оптоэлектронной гальванической развязкой $D1$. Через входной диод драйвера $D1$ протекает ток, величина которого определяется напряжением на контакте $K3$ и сопротивлением резистора $R1$. Этот ток вызывает открывание драйвера ключа $D1$, и на затвор транзистора $VT1$ поступает напряжение с клеммы $K1$, вызывая его открывание.

Транзистор $VT1$ открывается и через индуктивность $L1$ начинает заряжаться конденсатор $C2$ по цепи: конденсатор $C1$, сток – исток транзистора $VT1$, диод $VD6$, конденсатор $C2$, первичная обмотка трансформатора $T1$, до величины напряжения конденсатора $C1$.падением напряжения на транзисторе $VT1$, диоде $VD6$ и первичной обмотке трансформатора $T1$ в силу малых значений можно пренебречь. При достижении напряжения $U_{C2} = U_{C1}$ напряжения ток через индуктивность $L1$ прекращается, и запасенная в индуктивности $L1$ энергия передается в конденсатор $C2$ по той же цепи. Таким образом, напряжение U_{C2} становится равным напряжению U_{C1} плюс ЭДС самоиндукции. Величина индуктивности $L1$ существенно больше

индуктивности первичной обмотки трансформатора $T1$, поэтому форма тока заряда конденсатора $C1$ определяется в основном значениями емкости $C1$ и индуктивности $L1$.

Напряжение на конденсаторе $C2$ вызывает протекание тока через аналоговый оптрон $D3$, величина которого определяется этим напряжением и сопротивлением резистора $R3$. Этот ток вызывает изменение напряжения на выходе оптрона $D3$. При равенстве этого напряжения с напряжением управления на контакте $K4$ на выходе компаратора $D2$ напряжение становится равным напряжению питания последнего, вызывая запирающие драйвера ключа $D1$ и транзистора $VT1$, соответственно.

При подаче на контакт $K9$ импульсного сигнала включения тиристора $VS1$ он открывается, и конденсатор $C2$ разряжается через тиристор $VS1$ и первичную обмотку трансформатора $T1$. При этом амплитуда импульса прямо пропорциональна напряжению заряда конденсатора $C2$.

На контакт $K3$ подается импульсный сигнал на время, определяемое максимальным временем заряда конденсатора $C2$. Это нужно для предотвращения процесса генерации, вызванного саморазрядом конденсатора $C2$.

Диод $VD1$ служит для защиты входа оптрона $D3$ от отрицательного напряжения. Диод $VD5$ служит для защиты транзистора $V2$.

Изменяя сопротивление $R3$ можно регулировать уровень заряда конденсатора $C2$.

4.2 Регулировка напряжения включения двухэлектродной взрывозамиссионной рентгеновской трубки в зависимости от скорости нарастания напряжения.

Известно, что электрическая прочность промежутка определяется не только напряженностью поля, но и длительностью действия поля в данном межэлектродном зазоре. Совокупность этих факторов приводит к тому, что неуправляемые двухэлектродные рентгеновские трубки могут работать в достаточно широком диапазоне напряжений, зависящем от длительности приложения импульса высокого напряжения.

Исследования особенностей работы созданного генератора показали, что изменение амплитуды импульсов тока, проходящих через полупроводниковый прерыватель, влияют и на временные характеристики формирующегося импульса напряжения. Уменьшение амплитуды тока приводит к увеличению длительности импульса и переднего фронта, рисунок 4.7.

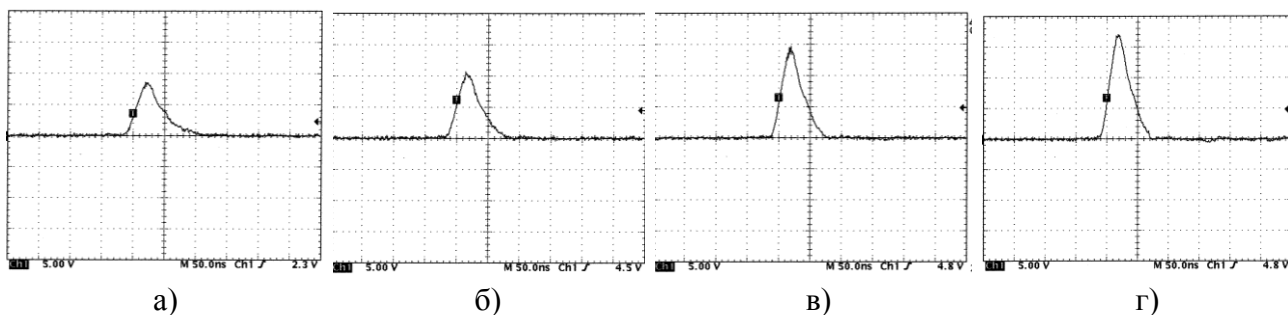


Рис. 4.7 – Осциллограммы напряжения при разном уровне заряда конденсаторов первичного контура: а) $U_{C2} = 470$ В, $dU/dt = 2,5 \cdot 10^{12}$ В/с, $U_{max} = 70$ кВ; б) $U_{C2} = 520$ В, $dU/dt = 4,5 \cdot 10^{12}$ В/с, $U_{max} = 85$ кВ; в) $U_{C2} = 550$ В, $dU/dt = 7 \cdot 10^{12}$ В/с, $U_{max} = 100$ кВ; г) $U_{C2} = 630$ В, $dU/dt = 10^{13}$ В/с, $U_{max} = 125$ кВ. U_{C2} – амплитудное значение напряжения первичного накопителя, dU/dt – скорость нарастания выходного напряжения, U_{max} – максимальное значение выходного напряжения.

Подключение разработанной трубки показало, что во всем диапазоне напряжений происходит стабильная генерация рентгеновского излучения, рисунок 4.8.

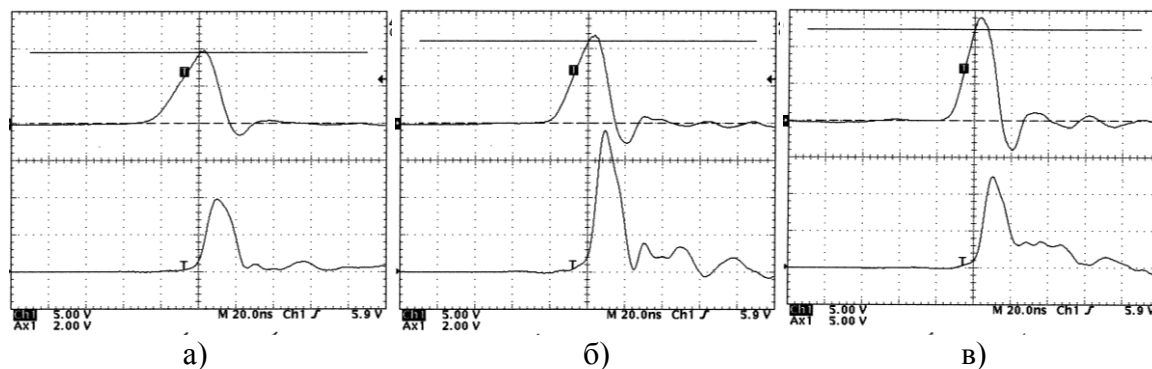


Рисунок 4.8 – Осциллограммы напряжения (сверху) и тока (снизу) рентгеновской трубки при различной скорости нарастания импульса напряжения а) $U_{C2} = 470$ В, $dU/dt = 2,5 \cdot 10^{12}$ В/с, $U_{max} = 70$ кВ, $I_{max} = 100$ А; б) $U_{C2} = 520$ В, $dU/dt = 4,5 \cdot 10^{12}$ В/с, $U_{max} = 85$ кВ; $I_{max} = 175$ А; в) $U_{C2} = 630$ В, $dU/dt = 10^{13}$ В/с, $U_{max} = 120$ кВ; $I_{max} = 300$ А. U_{C2} – амплитудное значение напряжения первичного накопителя, dU/dt – скорость нарастания выходного напряжения, U_{max} – максимальное значение выходного напряжения, I_{max} – максимальное значение выходного тока.

Дозиметрические измерения (рисунок 4.9) доказали работоспособность трубки в широком диапазоне частот от 500 до 5000 Гц. При поддержании выходного напряжения на одном уровне наблюдается пропорциональный рост мощности излучения с сохранением дозы единичного импульса. Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения дозы при работе в режимах измерения непрерывно и кратковременно действующего излучения ± 15 %, при работе в режиме измерения импульсного излучения ± 30 %.

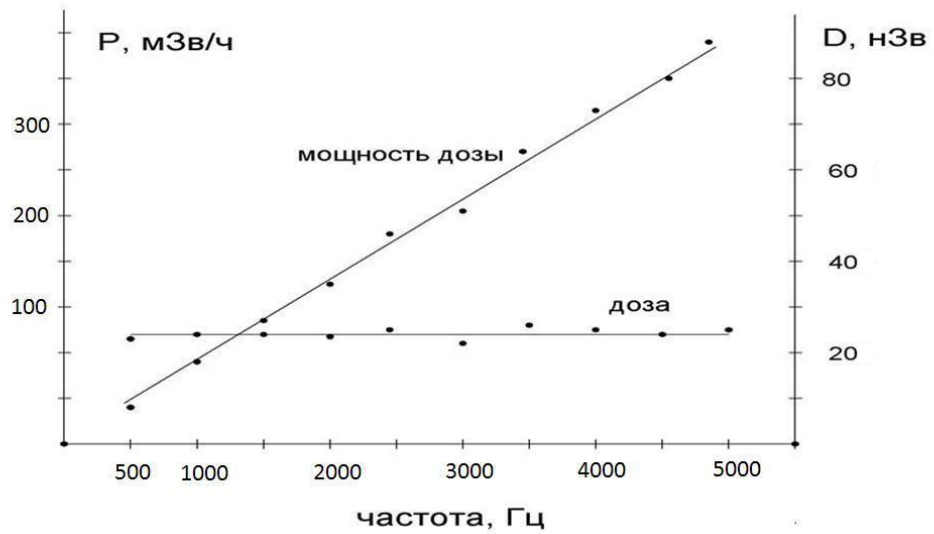


Рис. 4.9 – Зависимость мощности дозы излучения и дозы за импульс от частоты следования импульсов.

Кроме того, сравнительные испытания разработанной трубки с комбинированными электродами и трубки с металлодиэлектрическим катодом дали интересный результат, рисунок 4.10.

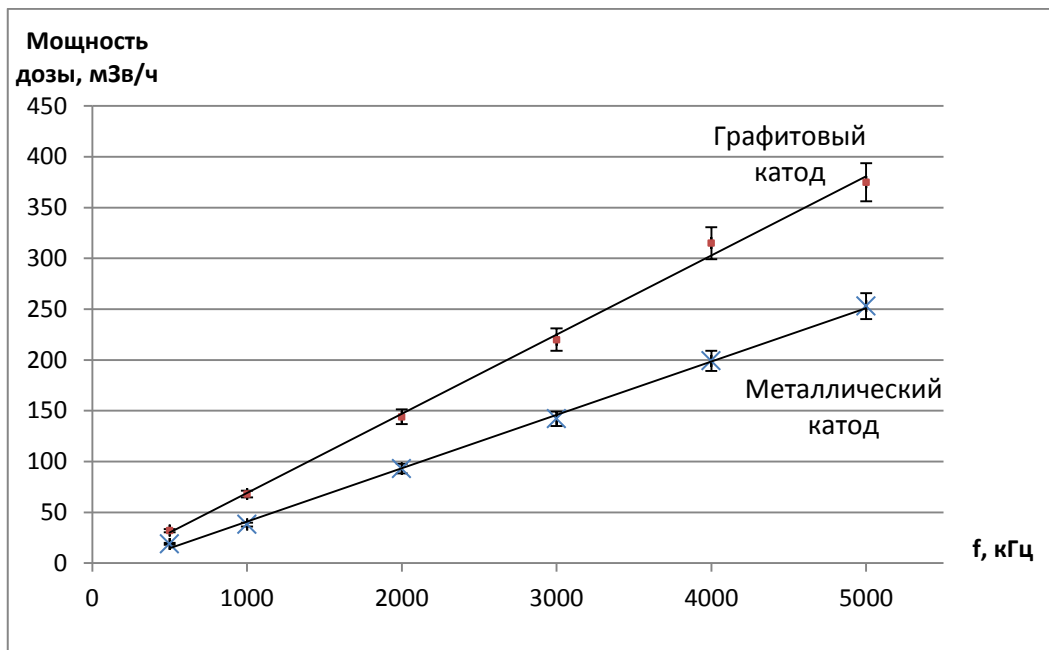


Рисунок 4.10 – Зависимость мощности дозы облучения от типа катода.

Для обеих трубок характерен линейный рост мощности дозы облучения с увеличением частоты следования импульсов, но при использовании графитового катода мощность дозы выше в полтора раза. В главе II дается обоснование данной закономерности, по мнению автора, это связано с тем, что максимум интенсивности излучения в случае применения графитового катода смещен в область более высоких энергий.

Эксперименты с биологическими объектами наглядно показали важность регулировки напряжения включения РТ, рисунки 4.11, 4.12

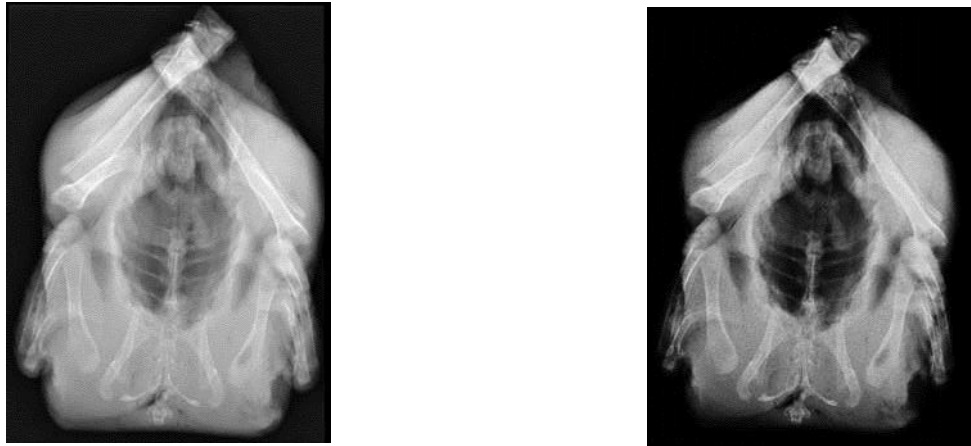


Рисунок 4.11 – Изображение биологического объекта при напряжении 70 кВ (слева) и 120 кВ (справа).

Как видно, изображение объекта, содержащего области, мало отличающиеся по рентгеновской плотности, получается более контрастным при низком уровне напряжения. Ниже приведены гистограммы данных изображений. Гистограмма изображения, полученного при напряжении 70 кВ, характеризуется смещением распределения пикселей в область средних тонов, в отличие от гистограммы изображения, полученного при напряжении 120 кВ.

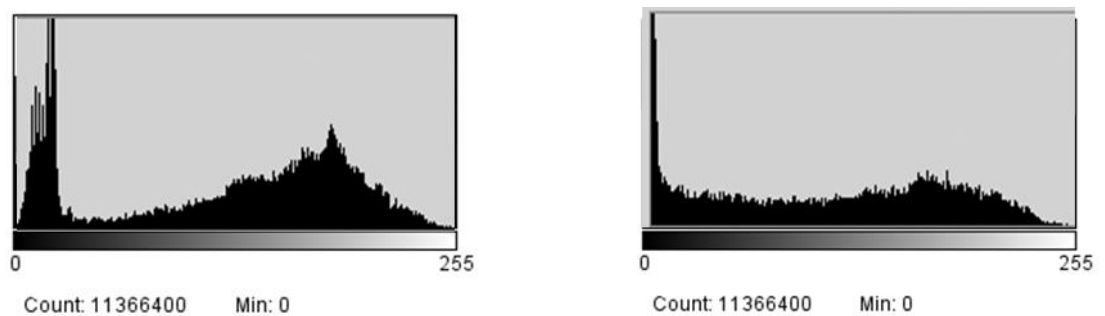


Рисунок 4.12 – Гистограммы изображений при 70 кВ (слева) и 120 кВ (справа)

4.3 Особенности работы импульсных рентгеновских аппаратов с цифровыми приемниками излучения в рентгенографическом режиме.

Для определения особенностей работы импульсного рентгенодиагностического комплекса (ИРК), в состав которого входят частотный наносекундный рентгеновский аппарат, генератор высоковольтных импульсов которого выполнен по схеме с индуктивным накопителем энергии,

и плоскопанельный детектор Carestream DRX-1, проведено сравнительное исследование с серийно выпускаемыми рентгенодиагностическими комплексами на базе рентгеновских аппаратов с трубками постоянного тока и плоскопанельными приемниками излучения, аналогичные детектору Carestream DRX-1. В качестве таковых рассмотрены мобильный рентгенодиагностический аппарат Definium AMX 700 с плоскопанельным детектором производства General Electric (США) и стационарный рентгенодиагностический комплекс Evolution HV производства STEPHANIX с плоскопанельным детектором Canon CXDI-40ЕС. Характеристики комплексов приведены в таблице 4.1.

Измерение радиационного выхода аппаратов проведено широкодиапазонным прибором для дозиметрии непрерывного и импульсного рентгеновского и гамма-излучений «ДКС-АТ 1123» и дозиметром универсальным для контроля характеристик рентгеновских аппаратов «Unfors Xi».

Для изучения качества снимков получено 20 диагностических изображений органов грудной клетки (передняя прямая проекция) с помощью ИРК, которые сравнивались с выбранными из компьютерной базы данных генератором случайных чисел 30 изображениями (передняя прямая проекция), полученными на цифровом мобильном рентгенодиагностическом аппарате Definium AMX 700 с плоскопанельным детектором 41 x 41 см производства GE (США) и 30 изображениями (передняя прямая проекция), полученными на рентгенодиагностическом комплексе Evolution HV производства STEPHANIX с плоскопанельным детектором CANON CXDI-40ЕС.

Таблица 4.1. Характеристики рентгенодиагностических комплексов

	ИРК	Definium AMX 700, (мобильный)	Evolution HV, (стационарный)
Анодное напряжение, кВ	100 – 110	50 – 125	40 – 150
Диапазон экспозиций, мАс	0,10 – 15,0	0,44 – 200	0,10 – 500
Потребляемая мощность, кВт	4	12,5	100
Масса, кг	45	468	-
Напряжение питания, В	220	220	380
Приемник излучения	Плоскопанельный Carestream DRX-1	Плоскопанельный GE	Плоскопанельный CANON CXDI

Изображения оценивались субъективно – тремя рентгенологами (независимо друг от друга), с оценкой по пятибалльной шкале: отлично, хорошо, удовлетворительно, неудовлетворительно, крайне неудовлетворительно, в сравнении с изображениями полученными на цифровом мобильном рентгенодиагностическом аппарате Definium AMX 700 GE (США) и рентгенодиагностическом комплексе Evolution HV производства STERHANIX. Результаты, полученные при субъективной оценке, представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 Субъективная оценка рентгенограмм полученных на различных аппаратах

Аппарат	Врач 1 (средняя оценка)	Врач 2 (средняя оценка)	Врач 3 (средняя оценка)
ИРК	4,65	4,75	4,7
Definium AMX 700	4,75	4,6	4,7
Evolution HV	5	5	5

Таким образом, по субъективной оценке, изображения органов грудной клетки в передней проекции, полученные при использовании импульсного аппарата, не уступают по качеству изображениям, полученным при использовании мобильного цифрового рентгенодиагностического аппарата Definium AMX 700 GE (США) и совсем незначительно уступают качеству изображений, полученных на стационарном рентгенодиагностическом комплексе Evolution HV производства STERHANIX.

Диагностические изображения, полученные на ИРК, позволяют выявить все основные синдромы поражения легких: затенения и просветления легочного поля или его части, изменения легочного рисунка, наличия газа или жидкости в плевральной полости, рисунок 4.13.



Рисунок 4.13 – Рентгенограмма органов грудной клетки, полученная с помощью ИРК

Для проведения дозиметрических измерений использовались широкодиапазонный прибор для дозиметрии непрерывного, кратковременно действующего и импульсного рентгеновского и гамма-излучений «ДКС-АТ 1123» (предел допускаемой основной относительной погрешности

измерения дозы при работе в режимах измерения непрерывно и кратковременно действующего излучения $\pm 15\%$, при работе в режиме измерения импульсного излучения $\pm 30\%$) и дозиметр универсальный для контроля характеристик рентгеновских аппаратов «Unfors Xi» (предел допускаемой основной относительной погрешности измерения дозы $\pm 10\%$). Измерения проводились с уставками, соответствующими получению качественного снимка среднестатистического пациента, для каждого из аппаратов. Для имитации тела пациента за детектором дозиметра устанавливался водный фантом толщиной 25 см, фокусное расстояние до детектора составляло 120 см. Результаты дозиметрического контроля приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3. Эквивалентные дозы.

Название аппарата	Область исследования	Эквивалентная доза (мЗв)	Относительная доза
ИРК	Легкие (передняя проекция)	0,027	1
Definium AMX 700	Легкие (передняя проекция)	0,569	21,1
Evolution HV	Легкие (передняя проекция)	0,721	26,7

Таким образом, дозиметрические измерения, проведенные в ходе исследования, демонстрируют, что использование импульсных рентгеновских аппаратов для проведения медицинских рентгенографических исследований с цифровым приемником излучения ведет к снижению дозовой нагрузки на пациента по сравнению с комплексами на базе трубок постоянного тока более чем на порядок, что многократно превышает погрешность измерений дозы, и не может быть объяснено недостоверностью проведенных измерений.

Объяснение снижения дозы при рентгенодиагностике, когда используется наносекундный импульсный аппарат, как мы предполагаем, заключается в следующем: облучение люминофоров (усиливающих слоев в детекторах рентгеновского излучения) мощными наносекундными импульсами с энергией электронов до 200 кэВ и плотностью тока 100-1000 А/см² возбуждает люминесценцию, пиковая интенсивность которой на 4-6 порядков выше интенсивности традиционной стационарной люминесценции [110]. В случае использования рентгеновских аппаратов с трубками постоянного тока мощность трубки не превышает 0,1 МВт, а длительность экспозиции не менее 1 мс, в этом случае интенсивность свечения люминофора линейно пропорциональна интенсивности рентгеновского излучения [111]. Таким образом, в рентгеновских трубках с термоэмиссионным катодом не используется эффект нелинейного увеличения свечения люминофора, за счет увеличения пиковой мощности рентгеновского излучения при использовании сильноточных импульсов наносекундной длительности.

Также важным обстоятельством, влияющим на формирование качественного изображения, является частота следования импульсов. Длительность послесвечения большинства рентгенолюминофоров таких, как $Gd_2O_5:Tb$, $CaWO_4$, $Y_2O_3:S:Tb$, $ZnCdS:Ag$, $LaOBr:Tb$ составляет 1 мс [112]. При этом интенсивность свечения усиливающих рентгенолюминесцентных экранов (Kodak lanex, Ренэкс ЭУ-Г3, Ренэкс ЭУ-Г300, Ренэкс ЭУ-И4), изготовленных из этих люминофоров, снижается до уровня 0,35-0,3 от интенсивности свечения в момент прекращения возбуждения люминесценции за 0,5-0,6 мс [107]. Таким образом, облучение рентгенолюминофоров наносекундными импульсами рентгеновского излучения в диапазоне частот от 1 кГц до 5 кГц позволяет работать в режиме постоянного свечения люминофоров, тем самым сохраняя высокое отношение сигнал/шум, что обеспечивает получение качественного изображения [113].

Таким образом, с помощью импульсных наносекундных рентгеновских аппаратов при пиковых мощностях трубки более 1 МВт формируется пакет рентгеновских импульсов, причем длительность паузы между импульсами в пакете выбирается из условия снижения интенсивности медленной компоненты послесвечения рентгенолюминофора до 0,2 от интенсивности свечения в момент прекращения возбуждения люминесценции, что обеспечивает получение рентгеновского качественного изображения при высоком отношении сигнал/шум. На рисунке 4.14 изображен характер послесвечения люминофора, после возбуждения рентгеновскими импульсами наносекундной длительности и мощностью несколько МВт.

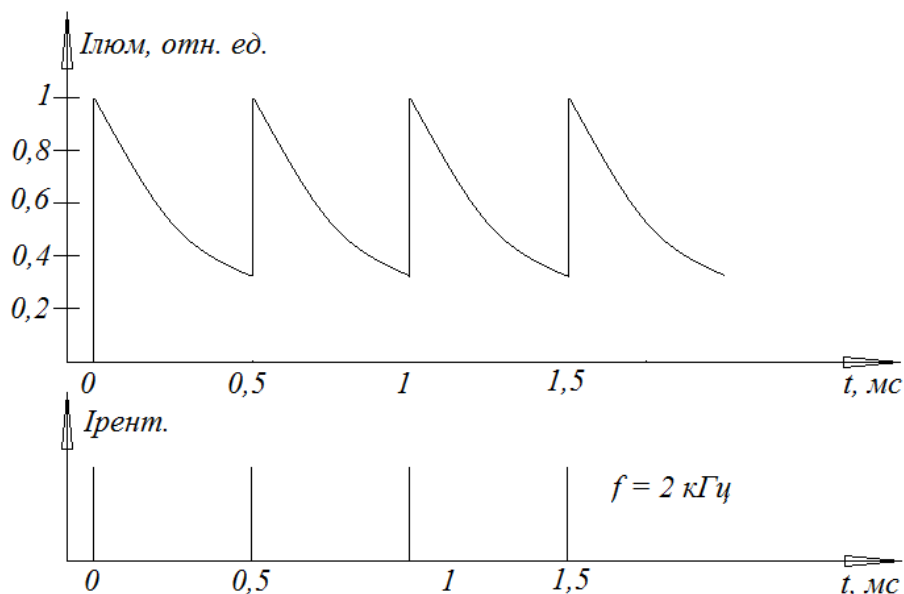
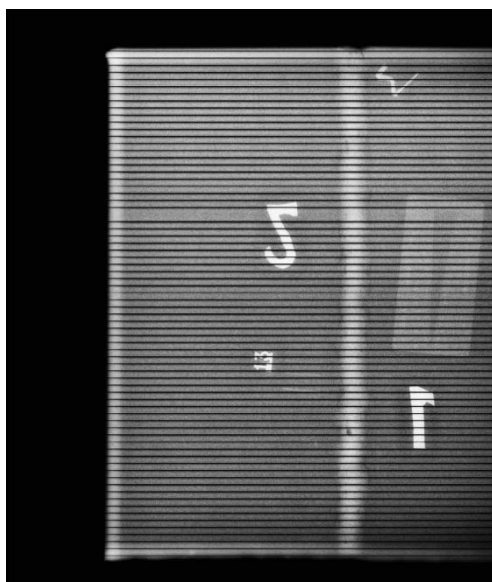


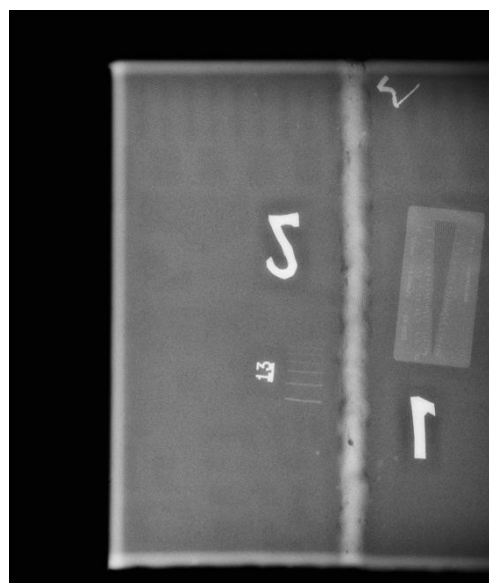
Рисунок 4.14 – Характер генерации рентгеновского излучения и свечения люминофора при частоте следования импульсов 2 кГц.

4.4. Импульсные аппараты при работе с цифровыми приемниками рентгеновского излучения, работающими в видеорежиме.

Произведено сравнение импульсного рентгеновского аппарата с индуктивным накопителем энергии, твердотельной системой формирования импульсов и взрывоэмиссионной трубкой, работающий при частоте следования импульсов до 5 кГц, с импульсной установкой АРИНА-3, в которой применяется емкостной накопитель энергии и газовый разрядник-обостритель высокого давления, частота следования импульсов 10 Гц. В качестве объекта исследования использован сварной шов стальной трубы с толщиной стенки 16,5 мм, при условии одинаковой дозы в плоскости входного окна рентгеновизиализирующего устройства. Обе установки работают в мегаваттном диапазоне пиковой мощности, импульсное напряжение 180 кВ. Приемник излучения: плоскопанельный детектор PerkinElmer Dexela 1512NDT с рентгенолюминофором $Gd_2O_3:Tb$. Изображение, полученное с помощью установки, работающей на частоте 10 Гц, характеризуется более низким контрастом, наличием чередующихся черных полос, занимающих 20% поля изображения, признано негодным для проведения дефектоскопии, рисунок 4.15.а. Изображение, полученное с помощью импульсного рентгеновского аппарата с индуктивным накопителем, соответствует всем требованиям нормативной документации по радиографическим методам контроля, рисунок 4.15.б.



а)



б)

Рисунок 4.15 – Рентгеновские изображения, полученные на цифровой плоскопанельный рентгеновский детектор PerkinElmer Dexela 1512NDT.

- а) импульсный аппарат с емкостным накопителем энергии Арина-3, $f = 10$ Гц,
 б) импульсный аппарат с индуктивным накопителем, $f = 5$ кГц.

При работе в видео режиме аппарат с индуктивным накопителем энергии дает качественное изображение без горизонтальных полос при частоте следования импульсов выше

500 Гц без применения дополнительных устройств синхронизации цифрового приемника и импульсного источника излучения. С учетом повышенной мощности, достигнутой на взрывоэмиссионной рентгеновской трубке с искусственными углеродными материалами, удается получать качественное видеоизображение, вполне конкурентоспособное в сравнении с рентгенодиагностическими комплексами, где применяются аппараты постоянного тока.

Важен факт, что доза облучения на аппаратах с индуктивным накопителем энергии на порядок ниже, чем на аппаратах постоянного тока при одинаковом качестве получаемого видео изображения. При проведении хирургических операций под контролем рентгена (рентгеноскопия) на медицинских диагностических аппаратах типа С-дуга это является определяющим фактором в пользу выбора импульсного аппарата.

4.5 Выводы по главе.

Разработана система регулировки выходного напряжения импульсного высоковольтного наносекундного генератора с индуктивным накопителем энергии и твердотельной системой коммутации. Изменение выходного напряжения генератора высоковольтных импульсов обеспечивается путем регулировки напряжения заряда первичного накопителя.

Для импульсного рентгеновского аппарата достигнута плавная регулировка выходного напряжения в диапазоне 70-120 кВ. Соответствующее повышение частоты следования импульсов при снижении напряжения импульса позволит сохранить среднюю выходную мощность рентгеновского источника.

Создан компактный импульсный рентгеновский генератор с регулировкой эффективной энергии рентгеновского излучения мощностью до 3 кВт при частоте следования импульсов до 5 кГц.

Снижение дозовой нагрузки на пациента при использовании рентгенодиагностического комплекса, состоящего из импульсного рентгеновского аппарата с индуктивным накопителем энергии и цифрового плоскопанельного детектора рентгеновского излучения, составляет от 20 до 25 раз (в зависимости от исследуемых органов) по сравнению с традиционными рентгенодиагностическими комплексами, в которых применяются аппараты с РТ постоянного тока. При этом диагностическая ценность полученных рентгеновских изображений не уступает снимкам, получаемым с помощью комплексов на базе рентгеновских аппаратов с трубками постоянного тока.

Снижение дозы облучения особенно важно при создании и эксплуатации рентгенохирургических аппаратов типа С-дуга, так как, позволяет существенно увеличить длительность проведения процедур под рентгеновским контролем, снизить дозовую нагрузку

не только на пациента, но и медицинский персонал. Импульсные рентгеновские аппараты с индуктивными накопителями энергии, в отличие от импульсных аппаратов с емкостными накопителями энергии, за счет высокой частоты следования импульсов, могут применяться с рентгеновскими детекторами, работающими в видео режимах, которые используются, например, в комплексах типа С-дуга.

Кроме того, ИРК характеризуется малым энергопотреблением, что дает возможность использовать автономные источники питания [114], система может использоваться как полностью портативная.

Заключение

1. Установлено, что в процессе работы конструкционных высокопрочных графитов в качестве холодных катодов при давлении в вакуумной камере $10^{-7} - 10^{-6}$ торр происходит смена типа связей между поверхностными атомами углерода за счет бомбардировки ионами остаточных газов, что приводит к росту эмиссионного тока.

2. Разработан взрывоэмиссионный графитокерамический катодный узел для импульсной высокочастотной рентгеновской трубки, позволяющий получать стабильную эмиссию электронов при снижении скорости нарастания напряжения на трубке до $2,5 \cdot 10^{12}$ В/с, тогда как катод в серийно выпускаемых рентгеновских трубках РИА-1 стабильно работает при скорости нарастания напряжения не менее 10^{13} В/с.

3. Установлено, что при прочих равных условиях для рентгеновской трубки с графитокерамическим катодным узлом спектр рентгеновского излучения смещен в область большей энергии по сравнению с трубками, в которых используется гребенчатый металлодиэлектрический катод.

4. Разработан комбинированный вольфрамографитовый анод для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки со средней мощностью, рассеиваемой на аноде, до 3 кВт при работе в повторно-кратковременном режиме.

5. Показано, что размер эффективного фокусного пятна рентгеновской трубки с толщиной общего фильтра 2 мм алюминия и более, при использовании комбинированного вольфрамографитового анода, в диапазоне напряжений 70 – 120 кВ не зависит от размера области графитового радиатора, бомбардируемой электронным пучком, а определяется только диаметром вставки, изготовленной из вольфрама.

6. Разработана импульсная частотная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка с частотой следования импульсов до 5 кГц и со средней выходной мощностью, рассеиваемой на аноде, до 3 кВт при работе в повторно-кратковременном режиме в течение $2 \cdot 10^6$ импульсов.

7. Показано, что разработанная острофокусная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка с комбинированными электродами позволяет регулировать напряжение включения трубки в диапазоне от 70 до 120 кВ при импульсном токе до 300 А, средней выходной мощности до 3 кВт.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность к.т.н. С. Р. Корженевскому за ценные советы и плодотворное обсуждение возникающих идей и полученных результатов, всестороннюю помощь и поддержку, коллегам Д. С. Скоморохову, В. А. Бессоновой, В. А. Криницину, Л. А. Парамонову, А. В. Пономареву, А. С.Чепусову, В.А.

Мотовилову, В. В. Уварину, С. В. Щербинину за многолетнее сотрудничество, помощь в проведении работы и моральную поддержку. Навсегда останутся в памяти д.т.н. В.Л. Кузнецов и д.т.н. А. Л. Филатов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Filatov, A.L. Compact repetitive generators for medical x-ray diagnostics / A. L. Filatov, S. R. Korzhenevskii, Yu. A. Kotov // Proc. XI Intern. Conf. on High Power Particle beams. – 1996. – P. 909 – 912.
2. Котов Ю. А. Твердотельный прерыватель тока для генерирования мощных наносекундных импульсов / Ю. А. Котов, Г. А. Месяц, С. Н. Рукин, А. Л. Филатов // Докл. РАН. – 1993. – Т. 330. - № 3. – С. 315 – 317.
3. Корженевский С.Р. Высокочастотные наносекундные генераторы для интроскопии и селективного разрушения твердых тел микронных размеров: дис. ... канд. техн. наук / Корженевский Сергей Романович. – Екатеринбург. – 2008. – 135 с.
4. Шешин, Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов / Е. П. Шешин. – М.: МФТИ, 2001. – 274 с.
5. Кислов Е. А. Установка для измерения вольт-амперных характеристик углеродных материалов / Е. А. Кислов, В. Л. Кузнецов, В. А. Терентьева, Д. С. Скоморохов, А. Л. Филатов // Международный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2010. - №3. – С. 40 – 43.
6. Кислов Е. А. Исследование углеродных автокатодов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Е. А. Кислов, А. А. Комарский, В. Л. Кузнецов, Д.С. Скоморохов, А. С. Чепусов // Сборник тезисов, материалы Восемнадцатой Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых (ВНКСФ-18, г. Красноярск). – 2012. – С. 132 – 133.
7. Скоморохов, Д. С. Острофокусная двухэлектродная импульсная рентгеновская трубка / Д. С. Скоморохов, В. Л. Кузнецов, С. Р. Корженевский // Патент RU 2479883. – 20.04.2013.
8. <http://www.plasmalabs.ru/files/products/obostriteli.pdf>
9. Röntgen, W. C. Ueber eine neue Art von Strahlen (II mittheilung) / W. C. Röntgen // Sitzungsberichte der physikalischmedizinischen zu Würzburg. – 1896. – V.1, P. 6 – 11.
10. Lilienfeld, J. E. // Am. J. Roentgenology. – 1922. – 9. – 192.
11. Месяц, Г. А. Взрывная электронная эмиссия / Г. А. Месяц. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2011. – 280 с.
12. Литвинов, Е. А. Автоэмиссионные и взрывоэмиссионные процессы при вакуумных разрядах / Е. А. Литвинов, Г. А. Месяц, Д. И. Проскуровский // Успехи физических наук. – 1983. – Т. 139. – № 2. – С. 255 – 302.

13. Проскуровский, Д. И. Эмиссионная электроника: Учеб. пособие для вузов / Д. И. Проскуровский. – 2-е изд., испр. и доп. – Томск: Томский государственный университет, 2010. – 288 с.
14. Fowler, R. Electron Emission in Intense Electric Fields / R. Fowler, L. Nordheim // Proceedings of the Royal Society A 119. – 1928. – P. 173–181. doi:10.1098/rspa.1928.0091
15. Шредник, В. Н. Теория автоэлектронной эмиссии. Ненакаливаемые катоды / Под ред. М. И. Елинсона. – М.: Сов. радио, 1974. С. 165-177.
16. Фурсей, Г. Н. Предельные плотности тока АЭЭ и предвзрывные эффекты / Г. Н. Фурсей, В. М. Жуков, Л. М. Баскин // Эмиссионная сильноточная электроника: Сб. Статей / АН СССР, Сиб. Отделение, ИСЭ; Отв. Ред. Г. А. Месяц. – Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние. – 1984. С. 21 – 41.
17. Barbour, J. P. Space-Charge Effectc in field emission / J. P. Barbour, W. W. Dolan, J. K. Trolan at. al. // Phys. Rev. – 1953. – V. 92. – №1. – P. 45 – 51.
18. Dyke, W. P. The field emission initiated vacuum arc. I. Experiments on arc initiated / W. P. Dyke, J. K. Trolan, E. E. Martin, J. P. Barbour // Phys. Rev. – 1953. – V. 91. – № 5. – P. 1043 – 1054.
19. Dolan, W. W. The field emission initiated vacuum arc. II. The resistively heated emitter / W. W. Dolan, W. P. Dyke, J. K. Trolan // Phys. Rev. – 1953. – V. 91. – № 5. – P. 1054 – 1057.
20. Горьков, В. А. Теоретическое и эспериментальное исследование преддуговых явлений при автоэлектронной эмиссии / В. А. Горьков, М. И. Елинсон, Г. Д. Яковлева // Радиотехника и электроника. – 1962. – Т. 7. – № 9. – С. 1501 – 1510.
21. Елинсон, М. И. Исследование импульсной автоэлектронной эмиссии при высоких плотностях токов / М. И. Елинсон, В. А. Горьков, А. А. Яспонская, Г. А. Кудинцева // Радиотехника и электроника. – 1960. – Т. 5. – № 8. – С. 1495 – 1500.
22. Фурсей, Г. Н. Автоэлектронная эмиссия с монокристалла вольфрама, предшествующая развитию вакуумной дуги / Г. Н. Фурсей // Радиотехника и электроника. – 1961. – Т. 6. – № 2. – С. 298 – 302.
23. Елинсон, М. И. Автоэлектронная эмиссия / М. И. Елинсон, Г. Ф. Васильев. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. – 274 с.
24. Бугаев, С. П. Электронно-оптическое наблюдение инициирования и развития импульсного пробоя короткого вакуумного промежутка / С. П. Бугаев, А. М. Искольдский, Г. А. Месяц, Д. И. Проскуровский // ЖТФ. – 1967. – Т. 37. – Вып. 12. – С. 2206 – 2208.
25. Месяц, Г. А. Исследования по генерированию наносекундных импульсов большой мощности: дис. ... докт. техн. наук / Месяц Геннадий Андреевич. – Томск: ТПИ, 1966. – 249 с.

26. Карцев, Г. К. Исследования временных характеристик перехода автоэлектронной эмиссии в вакуумную дугу / Г. К. Карцев, Г. А. Месяц, Д. И. Проскуровский и др. // ДАН СССР. – 1970. – Т. 192. – № 2. – С. 309 – 312.
27. Сокольская, И. Л. Изучение явлений, предшествующих разрушению вольфрамовых эмиттеров импульсами автоэлектронного тока большой плотности / И. Л. Сокольская, Г. Н. Фурсей // Радиотехника и электроника. – 1962. – Т. 7. – Вып. 9. – С. 1474 – 1483.
28. Бугаев, С. П. Исследования механизма импульсного пробоя по поверхности диэлектрика в вакууме. II. Неоднородное поле / С. П. Бугаев, Г. А. Месяц // ЖТФ. – 1967. – Т. 37. – Вып. 10. С. 1861 – 1869.
29. Kofoed M. J. Phenomena at the metal-dielectric junction of high-voltage insulators in vacuum and magnetic field / M. J. Kofoed // AIEE Trans. – 1960. – V. 79. – pt. III. – P. 991 – 1004.
30. Бугаев, С. П. Исследования механизма импульсного пробоя по поверхности диэлектрика в вакууме. I. Однородное поле / С. П. Бугаев, А. М. Искольдский, Г. А. Месяц // ЖТФ. – 1967. – Т. 37. – Вып. 10. – С. 1855 – 1860.
31. Бондаренко, Б. В. Изменение структуры углеродоволоконных автокатодов в процессе формовки / Б. В. Бондаренко, Е. С. Баканова, А. Ю. Черепанов, Е. П. Шешин // Тезисы докладов XIX Всесоюзной конференции по эмиссионной электронике, секция III, IV, V. – Ташкент. – 1984. – С. 30
32. Бондаренко, Б. В. Автоэлектронные эмиттеры с развитой рабочей поверхностью / Б. В. Бондаренко, В. И. Макуха, Е. П. Шешин // Электронная техника. – Сер. 1: Электроника СВЧ. – 1984. – № 10. – С. 44 – 47.
33. Бондаренко, Б. В. Влияние шероховатости поверхности автокатодов на их эмиссионные характеристики / Б. В. Бондаренко, В. И. Макуха, Ю. Л. Рыбаков, В. Б. Шаров, Е. П. Шешин // Радиотехника и электроника. – 1987. – Т. 32. – № 12. – С. 2606 – 2610.
34. Бондаренко, Б. В. Автокатоды с большой рабочей площадью / Б. В. Бондаренко, Е. П. Шешин, В. И. Макуха, Ю. В. Титов // Электронная техника; Сер. 1: Электроника СВЧ. – 1986. – Вып. 4. – С. 47 – 51.
35. А. с. 1294188 СССР, Кл. H01J 1/30 от 11.03.85. Автоэлектронная пушка / Б. В. Бондаренко, В. И. Макуха, Е. П. Шешин, Ю. В. Кудряшов, В. Н. Уласюк, Ю. В. Петрушенко.
36. Елецкий, А. В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства / А. В. Елецкий // УФН. – 2002. – Т. 172. – № 4. – С. 401 – 438.
37. Yue, G. Z. Generation of continuous and pulsed diagnostic imaging x-ray radiation using a carbon-nanotube-based field-emission cathode / G. Z. Yue, Q. Qiu, Bo Gao, Y. Cheng, J. Zhang, H. Shimoda, S. Chang, J. P. Lu, O. Zhou // Appl. Phys. Lett. – 2002. – Vol. 81. – P. 355 – 357.

38. Sugie, H. Carbon nanotubes as electron source in an x-ray tube / H. Sugie, M. Tanemura, V. Filip, K. Iwata, K. Takahashi, F. Okuyama // *Appl. Phys. Lett.* – 2001. – Vol. 78. – № 17. – P. 2578 – 2580.
39. Ерошкин, П. А. Маломощные рентгеновские трубки с автоэмиссионным катодом на основе наноструктурированных углеродных материалов / П. А. Ерошкин, В. А. Романько, Е. П. Шешин // *Нано- и микросистемная техника.* – 2012. - № 9. – С. 11 – 15.
40. Forbes, R.G. Field penetration into amorphous-carbon films: consequences for field-induced electron emission / R. G. Forbes, J. P. Xanthakis // *Surf. Interface Anal.* – 2007. – Vol. 39. – P. 139–145.
41. Фурсей, Г. Н. Низкопороговая автоэлектронная эмиссия из углеродных нанокластеров, полученных методом холодной деструкции графита / Г.Н. Фурсей, В.И. Петрик, Д.В. Новиков // *ЖТФ.* – 2009. – Т. 79. – вып. 7. – С. 122 – 126.
42. Фурсей, Г. Н. Автоэлектронная и взрывная эмиссия из графеноподобных структур / Г. Н. Фурсей, М.А. Поляков, А.А. Кантонистов, А.М. Яфясов, Б.С. Павлов, В.Б. Божевольнов // *ЖТФ.* – 2013. – Т. 83. – вып. 6. – С. 71 – 77.
43. Фурсей, Г. Н. Новый класс портативных рентгеновских аппаратов на основе катодов из нанокластеров углерода / Г.Н. Фурсей, М. А. Поляков, А. А. Бегидов, А. А. Подымский, А. А. Якуб, Б. П. Меркулов, И. И. Закиров, Д. А. Фомин // II Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники. Программа и материалы конференции. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2015. – С. 10 – 15.
44. Фурсей, Г.Н. Рентгеновская трубка / Г.Н. Фурсей, Л.А. Широкин, П.Н. Беспалов // Патент № 2308781. МПК H01J 35/00 – 20.10.2007.
45. Месяц, Г. А. Импульсная энергетика и электроника / Г.А. Месяц. - М.: Наука, 2004. - 704 с.
46. Абрамян Е.А. Генератор коротких импульсов жесткого рентгеновского излучения высокой интенсивности / Е. А. Абрамян, С. Б. Вассерман, В. Н. Долгушин, Л. А. Моркин, О. П. Печерский, В. А. Цукерман. – ДАН СССР, 1970. – 192. – С. 76.
47. Abramyan, E. A. On possibilities of transformer type accelerators / E. A. Abramyan // *Nucl. Instr. and Methods.* – 1968. – 59. – P. 22-28.
48. Абрамян Е.А. Генератор мощных импульсов электронных пучков и рентгеновского излучения (РИУС-5) / Е. А. Абрамян, С. Б. Вассерман, В. М. Долгушин, Л. А. Моркин, О. П. Печерский, В. А. Цукерман. – Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1970. – 24 с.
49. Месяц, Г. А. Мощные наносекундные импульсы рентгеновского излучения / Г. А. Месяц, С. А. Иванов, Н. И. Комяк, Е. А. Пеликс. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 165 с.

50. Цукерман, В. А. Новые источники рентгеновских лучей / В. А. Цукерман, Л. В. Тарасова, С. И. Лобов // УФН. 1971. – Т. 103. – вып. 2. – С. 319 -337.
51. Ковалева, Е. Ю. Портативные рентгеновские аппараты «СПЕКТРОФЛЭШ» для контроля качества различных металлоконструкций в полевых условиях / Е. Ю. Ковалева // II Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники. Программа и материалы конференции. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2015. – С. 58 – 61.
52. Меркулов, Б. П. Импульсный генератор рентгеновского излучения / Б. П. Меркулов, Е.А. Пеликс, В. Г. Самородов // Патент № RU 2251230. – 2005.
53. <http://www.spectroflash.ru/>
54. Grekhov, I. V. Physical Basis for High-Power Semiconductor Nanosecond Opening Switches // I. V. Grekhov, G. A. Mesyats // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2000. – V. 28. - № 5. – P. 1540 – 1544.
55. Kotov, Yu. A. A novel nanosecond semiconductor opening switch for megavolt repetitive pulsed power technology: Experiment and Applications / Yu. A. Kotov, G. A. Mesyats, S. N. Rukin // Proc. IX IEEE Intern. Pulsed Power Conf. Albuquerque. – 1993. – Vol. 1. – P. 134 – 139.
56. Грехов И. В. Полупроводниковый генератор наносекундных импульсов / И. В. Грехов, В. М. Ефимов, А. Ф. Кардо-Сысоев, С. В. Коротков // Патент 2009611 РФ. – Бюл. Изобрет. 1994. – № 5.
57. Denholm, A. S. High voltage technology / A. S. Denholm // IEEE Trans, Nucl. Sei. – 1965. - NS-12. – P. – 780.
58. Mühlentfordt, J Verfahren zur Erzeugung kurzzeitiger Röntgenbitze / J. Mühlentfordt // Pat. 748185 DR. – 1939.
59. Фольрат, К. Физика быстропротекающих процессов / К. Фольрат, Г. Томер. Пер. с нем. под ред. Н.А. Златина. – М.: Мир, 1971. – 516 с.
60. Slack, C. M. Field emission x-ray tube / C. M. Slack, L. F. Ehrke //J. Appl. Phys. -1941. – V. 12. - № 2. – P. 165 – 168.
61. Schaaffs W., Erg. Exact. Naturw. – 1954. – 28.
62. Цукерман, В. А. Источники коротких рентгеновских вспышек для исследования быстропротекающих процессов / В. А. Цукерман, М. А. Монакова // ЖТФ. – 1957. – Т. 27. – вып. 2. – С. 391 – 403.
63. Комяк Н.И. Генераторы наносекундных рентгеновских вспышек ИРА-3 и ИРА-5 / Н.И Комяк, Е.А. Пеликс // Дефектоскопия. – 1971. - №3. – С. 127-131.
64. Иванов С.А. Рентгеновские трубки технического назначения / С.А. Иванов, Г.А. Щукин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 200 с.

65. Комяк Н. И. Импульсные рентгеновские аппараты серии МИРА / Н.И. Комяк, Л.Я. Морговский, Е.А. Пеликс // Дефектоскопия. – 1978. - № 3. - С. 108-110.
66. Морговский, Л. Я. Импульсная рентгенография / Л.Я.Морговский, Е.А.Пеликс // Санкт-Петербург. – Импульсная рентгенография. Аппараты серии «Арина», ООО«Спектрофлэш». – 1999.
67. Лойко, Т.В. Миниатюрная импульсная рентгеновская трубка / Т.В. Лойко, Н. Г. Макеев, Н. Г. Павловская, С. М. Тресков, М. П. Юткин // Патент РФ №2160480. – 2000.
68. Меркулов, Б. П. Импульсная рентгеновская трубка с взрывной эмиссией / Б. П. Меркулов, В. Г. Самородов // Патент 2010123760. – 2010.
69. Филатов, А. Л. Острофокусная двухэлектродная импульсная рентгеновская трубка / А. Л. Филатов, С. Р. Корженевский, С. В. Щербинин, М. Г. Боракова, В. А. Голубев // Патент RU 2174726. – 10.10.2001.
70. Davis, E. Handbook of Auger electron spectroscopy. / E. Davis, C. MacDonld, W. Palmberg, E. Riach, E. Weber. – Published by Physical Electronics Industries, Inc. – 1976.
71. Розанов, Л. Н. Вакуумная техника: Учебн. для вузов по спец. «Вакуумная техника». – 2-е изд. перераб. и доп. / Л. Н. Розанов. – М.: Высш. шк. – 1990. – 320 с.
72. Чепусов, А. С. Модернизация оже-спектрометра для исследования состояния поверхности / А. С. Чепусов, А. А. Комарский, В. А. Бессонова, С. Р. Корженевский // Сборник тезисов, материалы Двадцать первой Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых (ВНКСФ-21, г. Омск). – 2015. – С. – 236.
73. Бессонова, В. А. Автоматизация эксперимента с помощью устройства ввода-вывода RL-88АС / В. А. Бессонова, В. Л. Кузнецов, Д. С. Скоморохов, А. С. Чепусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – № 1. – Т. 13. – 2013. – С. 48 – 54.
74. Комарский, А. А. Автоэмиссионные свойства искусственных углеродных материалов / А. А. Комарский, А. С. Чепусов, Е.А. Кислов, В. Л. Кузнецов // Сборник тезисов, материалы XIII Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-XIII. г. Екатеринбург). – 2012. – С. 224.
75. Комарский, А.А. Восстановление эмиссионных свойств холодных катодов из промышленных марок графита / А. А. Комарский, В.А. Бессонова, С.Р. Корженевский, А.С. Чепусов // МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЖУРНАЛ. – 2014. – №11. – Ч. 1. – С. 30-32.
76. Гаврилов Н. В. Формирование нанокompозитных TiC/a-C:H покрытий методом магнетронного распыления Ti в Ar/C₂H₂ смеси, активируемой электронным пучком / Н. В.

Гаврилов, А.С. Каменецких, А.А. Комарский, А.М. Мурзакаев, А.В. Чукин // Поверхность. Рентгеновские, Синхротронные и нейтронные исследования. – 2014. – № 9. – С. 13–20.

77. Bagaev, S. N. CERAMICS WITH DISORDERED STRUCTURE OF THE CRYSTAL FIELD / S. N. Bagaev, V. V. Osipov, V. L. Kuznetsov, V. I. Solomonov, V. A. Shitov, R. N. Maksimov, A. N. Orlov, A. A. Komarskiy // Russian Physics Journal. – 2014. – V. 56. – № 11. – P. 1219-1229.

78. Карлсон, Т.А. Фотоэлектронная и Оже-спектроскопия / Т. А. Карлсон. – Л. – 1981. – 431с.

79. Кузнецов, В.Л. Влияние ионной бомбардировки на структуру поверхности автоэмиссионного катода / В. Л. Кузнецов, В. А. Терентьева, С. В. Петров, Д. С. Скоморохов, Е. А. Кислов, А. С. Чепусов, А. А. Комарский // Тезисы докладов, Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам конденсированного состояния вещества. – 2010. – С. 208.

80. Комарский А. А. Влияние ионной бомбардировки на автоэмиссионные свойства ИУМ / А. А. Комарский, Н. С. Безводинских, Е. А. Кислов, В. Л. Кузнецов, Д. С. Скоморохов, А. С. Чепусов, С. О. Чолах / Сборник тезисов, материалы Восемнадцатой Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых (ВНКСФ-18, г. Красноярск). – 2012. – С. - 266.

81. Chepusov, A. Surface modification of field emission cathodes made of artificial carbon-based material / A. Chepusov, S. Cholakh, E. Kislov, A. Komarskiy, V. Kuznetsov, S. Niculin, D. Skomorokhov // Phys. Status Solidi C. – 2013. – V. 10. – № 4. – P. 614–618.

82. Kislov, E. A. XPS studies on surfaces of field emission cathodes made of artificial carbon materials / E.A. Kislov, A.A. Komarskiy, V.L. Kuznetsov, S.P. Nikulin, D.S. Skomorokhov, A.S. Chepusov, and S.O. Cholakh.// Journal of applied spectroscopy. – 2013. – V. 80. – №2. – P. 216-220.

83. Chepusov, A. The influence of ion bombardment on emission properties of carbon materials / A. Chepusov, A. Komarskiy, V. Kuznetsov // Applied Surface Science. – 2014. – V. 306. – P. 94–97.

84. Dunaevsky, A. Emission properties of metal-ceramic, velvet, and carbon fiber cathodes / A. Dunaevsky, Ya. E. Krasik, A. Krokmal, A. V. Gunin, I. V. Pegel, S. D. Korovin // BEAMS. – № 30. – 2000. – P. 516-519.

85. Komarskiy, A. A. Reducing radiation dose by using pulse X-ray apparatus / A.A. Komarskiy, A.S. Chepusov, V.L. Kuznetsov, S.R. Korzhenevskiy, S.P. Nikulin, S.O. Cholakh // Journal of Biosciences and Medicines. – 2014. – V. 2. – № 2. – P. 17-21.

86. Чепусов, А.С. Установка для испытаний импульсных рентгеновских трубок с взрывоэмиссионными металлокерамическими катодами / А. С. Чепусов, А. А. Комарский, Е. А.

Кислов, В. Л. Кузнецов, Д. С. Скоморохов, С. О. Чолах // Сборник тезисов, материалы Восемнадцатой Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых (ВНКСФ-18, г. Красноярск). – 2012. – С. 278.

87. Комарский, А. А. Исследование кольцевых взрывоэмиссионных катодов / А. А. Комарский, А. С. Чепусов, С. Р. Корженевский, В. Л. Кузнецов, В. А. Бессонова, В. В. Криницин // Сборник тезисов, материалы XV Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-XV. г. Екатеринбург). – 2014. – С. 171.

88. Ключев, В. В. Рентгенотехника: Справочник в 2-х кн. Кн. 1 / В. В. Ключев, Соснин Ф. Р., Аертс В. И др.; Под общ. ред. Ключева В. В. – 2-е издание переработанное и доп. – М.: Машиностроение. – 1992. – 480 с.

89. Бессонова В. А. Снижение дозовой нагрузки на пациента при проведении диагностики с помощью цифровых импульсных наносекундных рентгеновских комплексов / В.А. Бессонова, П.В. Гаврилов, А.А. Комарский, С.Р. Корженевский, А.С. Чепусов // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2016. – Том 61.- №2. – С. 53 – 57.

90. Можарова, И. Э. «ЯСЕНЬ 01» в рентгенодиагностическом отделении госпиталя / И. Э. Можарова, А. Л. Филатов, В. Л. Кузнецов, С. Р. Корженевский // Поликлиника. – №1. – 2011. – С. 126 – 127.

91. Корженевский, С.Р. Импульсная наносекундная рентгеновская трубка с комбинированным вольфрамо-графитовым анодом / С. Р. Корженевский, А. А. Комарский, В. А. Бессонова, А. С. Чепусов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. - № 9. – С. 42-44.

92. Кузнецов, В. Л. Импульсная металло-керамическая рентгеновская трубка / В. Л. Кузнецов, С. Р. Корженевский, А. А. Комарский, А. С. Чепусов // Патент на полезную модель № 130135. 29.12.2012.

93. Thermal properties of matter / Thermal diffusivity ed by Touloukian Y S / N Y, W IFI/Plenum. – V10. – 1973. – 649 p.

94. Краев, О. А. Температуропроводность и теплопроводность металлов при высоких температурах / О.А. Краев, А. А. Стельмах // Исследования при высоких температурах. – Новосибирск: Наука. – 1966. – С. 55 – 74.

95. Зиновьев, В. Е. Температуропроводность и теплопроводность вольфрама в твердом и жидком состояниях / В. Е. Зиновьев, С. Г. Талуц // ФММ – 1985. – Т. 59, №1. – С. 79 – 84.

96. TPRC Data Book Series on Thermophysical Properties– Thermal Conductivity Plenum Pub Corp. – N. Y. – 1969. – V1 – 5.

97. Hust, J. G. Thermal conductivity and electrical resistivity standard reference materials tungsten (4 to 3000 K) / J. G. Hust // High Temper – High press. – 1976. – V 8. – PP. 377 – 381.
98. Пелецкий, В. Э. О корреляции температурных особенностей электронной теплопроводности и теплопроводности переходных металлов в области высоких температур/ В. Э. Пелецкий//ТВТ. – 1977. – Т. 15. С. – 278
99. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В. Е. Зиновьев. – М.: Металлургия. – 1989. – 384 с.
100. Блинов, Н. Н. Рентгенодиагностические аппараты / Н. Н. Блинов, Л. В. Владимиров, Г. П. Кочетова, Н. А. Туманов, А. З. Шварцман, А. М. Якобсон, В. Л. Ярославский. – М., «Медицина». – 1976. – 240 с.
101. Шмелев, В. К. Рентгеновские аппараты / В. К. Шмелев. – М.: Энергия, -1973. - 472с
102. Griffoul, R. Rotating anode X-ray tubes / R. Griffoul // «Le Vide». – 1960. – V. 88. – P. 342 – 354.
103. Kuntke, A Untersuchungen über die Änderung der Röntgenstrahlen. – Ausbeute an Drehanoden Röntgenröhren. – «Fortschr. Röntgenstrahlen». – 1957. – Bd 87. - №3. – P. 397 – 404.
104. Кожитов, Л. А. Технологическое вакуумное оборудование. Часть 1: Вакуумные системы технологического оборудования: учебник / Л. В. Кожитов, Н. А. Чиченев, В. А. Демин, П. А. Златин, С. Г. Емельянов, Ю. Н. Пархоменко, О. К. Курбатов. – М.: МГИУ. – 2010. – 444 с.
105. Комарский А. А. Импульсные рентгеновские аппараты с индуктивным накопителем энергии / Кузнецов В.Л., Корженевский С.Р., Бессонова В.А., Комарский А.А., Чепусов А.С., Бочков В.Д., Бочков Д.В., Панов П.В., Терешин В.И., Трубицын А.А., Грин М.Я., Солодов Д.Л. // Материалы II Всероссийской конференции производителей рентгеновской техники, С-Петербург. – 2015. – С. 74 – 78.
106. Кузнецов, В. Л. Моноблок портативного рентгеновского аппарата / В. Л. Кузнецов, С. Р. Корженевский, А. А. Комарский, А. С. Чепусов // Патент на полезную модель № 130179. 29.01.2013.
107. Баянкин С. Н. Применение импульсных частотных наносекундных рентгеновских аппаратов для диагностики / С. Н. Баянкин, И. Э. Можарова, В. Л. Кузнецов, С. Р. Корженевский, А. А. Комарский // Вестник рентгенологии и радиологии. – 2015. – №2. – С. 42-46.
108. Корженевский С.Р. Выбор режимов электрогидравлического селективного дробления кварцевой руды / С. Р. Корженевский, В. А. Бессонова, А. А. Комарский, В. А. Мотовилов, А. С. Чепусов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – №3. – С. 70 – 74.

109. Корженевский С.Р. Регулировка выходного напряжения импульсного высоковольтного наносекундного генератора с индуктивным накопителем энергии и твердотельной системой коммутации / Корженевский С.Р., Комарский А.А., Чепусов А.С., Бессонова В.А., Титов В.Н. // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – №1. – С. 52 – 55.
110. Соломонов В.И. Импульсная катодолуминесценция конденсированных сред: дис. ... докт. физ.-мат. наук / Соломонов Владимир иванович. – Екатеринбург: ИЭФ УрО РАН, 1996. – 267 с.
111. Казанкин О.Н. Неорганические люминофоры / О.Н. Казанкин, Л.Я. Марковский, И.А. Миронов Ф.М. Пекерман, Л.Н. Петрошина. – Л.: Химия. – 1975. – 192 с.
112. Социн Н.П. Многоэлементный детектор рентгеновского излучения, редкоземельный рентгенолюминофор для него, способ формирования многоэлементного сцинтиллятора и детектора в целом / Н.П. Социн, В.Н. Уласюк // Патент № 2420763 13.08.2009.
113. Корженевский С.Р. Устройство и способ облучения рентгенолюминофоров рентгеновизиализирующих устройств, работающих как в режиме рентгенографии, так и рентгеноскопии / М.Я. Грин, М.А. Дворцов, С.Р. Корженевский, Н.С. Корженевский, А.А. Комарский, Д.Л. Солодов, А.С. Чепусов, В.Н. Титов (RU) // Патент на изобретение № 2016122265/28. 06.06.2016.
114. Ponomarev A. V. 4-kW multi-phase battery powered power supply / A.V. Ponomarev, S.R. Korzhenevskiy, A.A. Komarskiy, A.S. Chepusov, Y.I. Mamontov, S.V. Ponomarev // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V. 830. – №1.