

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»**

На правах рукописи

Полосков Артём Викторович

**Повышение надежности электронного диода ускорителя
субмикросекундной длительности с инжекцией электронного пучка
в атмосферу**

**1.3.18. Физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника**

**Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Егоров Иван Сергеевич**

Томск – 2026

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Конструкции диодов импульсных ускорителей электронов со взрывоэмиссионным катодом.....	11
1.1 Диоды импульсных ускорителей.....	11
1.2 Высоковольтный проходной изолятор	20
1.3 Взрывоэмиссионные катоды	27
1.4 Анодный узел	32
1.5 Применение ускорителей наносекундной и субмикросекундной длительности	37
Выводы	41
Глава 2. Экспериментальный стенд	43
2.1 Частотный импульсный ускоритель Астра-М.....	43
2.2 Диагностическое оборудование.....	45
2.3 Стабилизация характеристик генератора	46
Выводы	48
Глава 3. Высоковольтный секционированный изолятор вакуумного электронного диода	49
3.1 Конструкция секционированного изолятора.....	49
3.2 Испытания способа распределения напряжения по секционированному изолятору.....	51
Выводы	60
Глава 4. Катод вакуумного электронного диода.....	61
4.1 Планарные катоды из металлокерамики и пористой меди.	61
4.2 Катод с конструктивной дискретной эмиссионной поверхностью из углеродно-эпоксидных трубок.....	64
4.3 Катод со сплошной эмиссионной поверхностью из углеродного волокна	67
Выводы	72
Глава 5. Инжекция электронного пучка в атмосферу и его применение	73
5.1 Конструкция анодного узла	73
5.2 Измерение параметров электронного пучка выведенного в атмосферу.....	80
5.3 Обеззараживание E.Coli в водной среде	84
Выводы	88
Заключение	89
Список сокращений и условных обозначений	91
Список литературы	92

Введение

На текущий момент наблюдается стремительный рост населения и активное развитие всех сфер промышленности и сельского хозяйства, особую актуальность приобретает необходимость решения насущных экологических проблем. В этой связи крайне важно внедрять инновационные энергосберегающие и экологически чистые технологии, которые отличаются низкой материалоемкостью и энергозатратами [1–4]. Такие технологии не только способствуют устойчивому развитию, но и позволяют более эффективно использовать ресурсы, минимизируя негативное воздействие на окружающую среду. Это становится возможным благодаря применению передовых научных разработок, которые открывают новые возможности в области экологически безопасного производства и потребления. Ускорители, производящие ионизирующее излучение (такое как электронные пучки, тормозное рентгеновское излучение, синхротронное излучение, нейтроны, сверхвысокочастотное излучение и активные возбуждённые частицы), представляют собой современный высокотехнологичный инструмент. Этот инструмент обладает рядом значительных преимуществ по сравнению с традиционными технологиями в таких областях, как производство новых материалов и изделий, металлургия, медицина, народное хозяйство, энергетика и экология [1–7]. Благодаря своей универсальности и эффективности, он предоставляет новые возможности в этих сферах, способствуя развитию инновационных решений и улучшению существующих процессов. Использование излучений, генерируемых ускорителями, становится ключевым фактором в продвижении науки и техники на новый уровень. Ускорители электронов наилучшим образом соответствуют требованиям, предъявляемым в ключевых областях применения радиационно-пучковых технологий. Благодаря своим уникальным характеристикам и возможностям, они находят широкое применение в различных сферах, таких как производство новых материалов с улучшенными свойствами, металлургия, где способствуют улучшению качества и эффективности процессов, а также в медицине, где используются для диагностики и терапии. В народном хозяйстве ускорители электронов играют важную роль в обработке и стерилизации различных материалов, что способствует повышению их долговечности и безопасности. В энергетике они позволяют разрабатывать и совершенствовать технологии, связанных с использованием радиационных пучков. В экологии такие ускорители применяются для решения проблем по очистке воды и воздуха, а также обработке отходов. Таким образом, ускорители электронов становятся незаменимым инструментом в реализации передовых радиационно-пучковых технологий, способствуя их внедрению и развитию в различных отраслях науки и промышленности.

Анализ литературы показывает, что в настоящий момент, наиболее широкое применение в хозяйственных целях получили линейные ускорители «выпрямительного» типа и линейные

высокочастотные импульсные ускорители. Приведенные виды ускорителей выпускаются с широким спектром параметров, как в России, так и за рубежом. Линейные ускорители выпрямительного типа [8,9] отличаются тем, что разность потенциалов между катодом и анодом создает ускоряющее электроны электрическое поле. Через заземленный анод осуществляется вывод пучка в атмосферу из вакуумной камеры ускорителя, а катод находится под высоким напряжением. Размеры проходных изоляторов в диоде таких ускорителей могут достигать более 4 м, так как они должны обеспечивать электрическую изоляцию в вакуумном диоде при постоянном напряжении, соответствующим энергии ускоренных электронов. При этом для стабильной работы катодного узла в вакуумном диоде рабочее давление обеспечивается на уровне $10^{-4} - 10^{-5}$ Па. К данному типу относятся промышленно выпускаемые ускорители из серии ЭЛВ, которые могут генерировать электронные пучки с энергиями от 0,2 до 2,5 МэВ, током пучка до 400 мА и до 400 кВт мощности в пучке [8,9]. Электроны, эмитированные катодом, на выходе из ускорительной трубки имеют полную энергию и проходя сквозь элементы вакуумной системы попадают в выпускное устройство, где с помощью электромагнитной развертки равномерно распределяются по фольге для вывода в атмосферу. Облучаемый материал транспортируется под рамкой выпускного окна.

Если для ускорения электронов применяется высокочастотное переменное электрическое поле МГц-ого диапазона, то такие ускорители относятся к линейным высокочастотным импульсным ускорителям (серия ИЛУ [10–13]). Такой способ ускорения позволил сократить высоту ускорителя почти в 2 раза по сравнению с ускорителями типа ЭЛВ, для одной энергии электронов. Ускорители типа ИЛУ могут генерировать электронные пучки с энергиями от 0,7 до 10 МэВ, средним током пучка от 15 до 30 мА, мощности в пучке до 50 кВт при длительности тока пучка около 0,5 мс и частоте до 50 Гц [11,14].

С одной стороны, современные линейные ускорители постоянного тока и высокочастотные импульсные модели обладают рядом существенных преимуществ, таких как высокая надёжность рабочих компонентов и стабильность характеристик генерируемого ионизирующего излучения. Однако существуют и определённые ограничения при их использовании в промышленности. Прежде всего, стоит отметить их крупные габариты, что требует строительства специальных помещений для размещения оборудования и обеспечения биологической защиты персонала и окружающей среды. К технологическим особенностям таких установок относятся повышенные требования к вакуумной системе, в частности к поддержанию определённого уровня давления в вакуумной камере. Это существенно увеличивает затраты на эксплуатацию и делает экономически нецелесообразным использование мощных ускорителей на небольших производствах [15]. В подобных ситуациях более оправданным решением становится

применение компактных ускорителей с пониженной средней мощностью в диапазоне (0,1-10 кВт). Такие устройства обеспечат необходимую производительность для маломощных производств при значительно меньших капитальных затратах на их установку, эксплуатацию и обслуживание.

Актуальность работы

Решением, способствующим увеличению доступности радиационных технологий и ускорительной техники для внедрения в различные области хозяйственной деятельности человека, является разработка и внедрение импульсных ускорителей электронов субмикросекундного и наносекундного диапазона, отличающихся своей компактностью по сравнению с линейными ускорителями «выпрямительного» типа и линейными высокочастотными импульсными ускорителями. Уменьшение размеров достигается за счет уменьшения изоляционных промежутков и изоляторов, так как электрическая прочность изоляции увеличивается при уменьшении длительности импульса прикладываемого напряжения [16,17]. Импульсная мощность ускорителей может составлять сотни МВт, а оперативная регулировка частоты повторения импульсов позволяет задавать необходимую среднюю мощность в пучке. Ограничение максимальной кинетической энергии электронов в пучке на уровне 500 кэВ позволит уменьшить требования к местной биологической защите [5]. Применение взрывоэмиссионных катодов позволит обеспечить наибольшие плотности тока, требуемые для ряда применений [18]. Вывод пучка электронов в атмосферу обеспечит наиболее технически доступное промышленное применение таких ускорителей. Генерация и вывод в атмосферу происходит в вакуумном диоде ускорителя, поэтому совершенствование диодов ускорителей напрямую влияет на эффективность их применения [19]. Основные научно-технические проблемы вакуумных электронных диодов, которые ограничивают ресурс и применимость импульсных ускорителей электронов, сформулированы далее. К ним относят пробой высоковольтного изолятора диода. Наиболее частая причина - неравномерность распределения напряжения по секциям высоковольтного импульсного изолятора во время длительности импульса, которая приводит к перенапряжению на отдельных секциях, их пробую, перераспределению полного напряжения по оставшимся секциям, как результат – к пробую всего изолятора. Другая проблема – снижение тока эмиссии, как правило, взрывоэмиссионного катода при многократном приложении импульса напряжения [20]. А также прорыв фольги выводного окна ускорителя, обеспечивающего транспортировку энергии к области применения с требуемыми характеристиками и ресурсом.

Диссертационная работа посвящена оптимизации конструкции, с целью повышения надежности, узлов вакуумного электронного диода со взрывоэмиссионным катодом и выпуском

пучка в атмосферу для частотного субмикросекундного ускорителя на основе импульсного трансформатора для практического использования.

Цель – минимизировать факторы, ограничивающие работоспособность и снижающие надежность вакуумного диода электронного ускорителя субмикросекундной длительности на основе импульсного трансформатора при скорости нарастания импульса ускоряющего напряжения $\approx 2,5 \cdot 10^{12}$ В/с с выпуском пучка в атмосферу для практического применения путем оптимизации конструкции отдельных его узлов и режимов работы.

Поставленные задачи

1. Определить факторы, влияющие на работоспособность и надежность узлов вакуумного диода электронного ускорителя субмикросекундной длительности (500 нс);
2. Создать стенд с высокой стабильностью (± 5 %) параметров (ускоряющее напряжение, частота повторения импульсов, энергия в импульсе) высоковольтного субмикросекундного импульса, для проведения исследований работы вакуумного электронного диода;
3. Обеспечить равномерность распределения напряжения (в диапазоне ± 10 %) по секциям высоковольтного проходного изолятора вакуумного диода на протяжении всей длительности субмикросекундного импульса ускоряющего напряжения;
4. Исследовать стабильность параметров вакуумного электронного диода с различными взрывоэмиссионными катодами в частотных режимах работы импульсного ускорителя на основе импульсного трансформатора с емкостным накопителем энергии;
5. Оптимизировать конструкцию анодного узла вакуумного электронного диода со взрывоэмиссионными катодами ускорителя на основе импульсного трансформатора с емкостным накопителем энергии для повышения ресурса фольгового выпускного окна при выводе электронного пучка в атмосферу;
6. Продемонстрировать техническую возможность использования ускорителя с разработанными узлами диода, генерирующего пучок с широким энергетическим спектром для обеззараживания водных растворов в ограниченном объеме.

Научная новизна

1. Экспериментальные исследования подтвердили, что в генераторе импульсов высокого напряжения гальваническая связь витков вторичной обмотки высоковольтного импульсного трансформатора с градиентными кольцами выходного секционированного изолятора позволяет на всем протяжении импульса субмикросекундной длительности (500 нс) снизить отклонение напряжения на градиентных кольцах изолятора до 3,4 % от равномерного распределения.

2. На основании экспериментальных исследований для катода из углеродного волокна (Урал ТМ-4-22) и скорости нарастания напряжения $\approx 2,5 \cdot 10^{12}$ В/с установлено, что при увеличении частоты повторения с 5 до 15 имп./с снижение амплитуды тока на 25 % от максимального значения происходит через меньшее количество импульсов тока пучка (в 4,75 раза).

3. Формирование вакуумного зазора (4-5 мм) между медной анодной решеткой (прозрачностью 92%) и мембраной (Ti 60 мкм) выпускного окна диаметром 90 мм обеспечивает работоспособность анодного узла в течение не менее 10^6 импульсов тока пучка при частоте следования 40 имп./с и плотности мощности выведенного пучка ≤ 6 Вт/см².

4. Экспериментально подтверждено, что зависимость степени обеззараживания водного раствора E. Coli (исходная концентрация 10^8 КОЕ/мл) сохраняется при изменении равномерности (по соотношению $D_{\min}/D_{\max}$) распределения поглощенной дозы по глубине с 87 % до 6 % и сохранении средней поглощенной дозы облучения электронным пучком субмикросекундной длительности с широким энергетическим спектром ($E_{\text{ср}} \approx 150$ кэВ, $E_{\text{max}} \leq 250$ кэВ).

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы продемонстрирована применением импульсного электронного ускорителя с разработанным диодом с инжекцией пучка в атмосферу для объемного обеззараживания водных растворов.

Разработанная коническая конструкция изолятора, которая в сравнении с цилиндрической, обеспечивает снижение напряженности электрического поля между заземленным основанием и высоковольтным электродом, а также позволяет увеличить скорость откачки остаточной атмосферы. Предложенный способ распределения напряжения применим для конструкций высоковольтных изоляторов в целом.

По результатам экспериментальных исследований определены катоды для генерации пучка в коротких сериях и долговременной работе для реализации практических применений.

Предложенная конструкция анодного узла с анодной решеткой, термически несвязанной с самонесущей выводной мембраной, обеспечивает работоспособность $>10^6$ импульсов с выводом пучка в атмосферу.

Положения, выносимые на защиту

1. Увеличение электрической прочности секционированного изолятора при равномерном распределении напряжения по секциям на протяжении всей длительности импульса достигается гальванической связью градиентных колец изолятора с витками обмотки высоковольтного импульсного трансформатора, генерирующего прикладываемое к диоду напряжение.

2. Увеличение частоты повторения импульсов приводит к уменьшению количества импульсов тока пучка до снижения амплитуды тока на 25 % от максимального значения при скорости нарастания напряжения $\approx 2,5 \cdot 10^{12}$ В/с для планарного катода из углеродного волокна (Урал ТМ-4-22).

3. Создание вакуумного зазора между анодной решеткой и выводной мембраной приводит к повышению работоспособности и надежности выпускного окна вакуумного электронного диода субмикросекундного электронного ускорителя.

4. Обеззараживание водных растворов происходит в определяющей степени за счет радиационно-стимулированных химических процессов при облучении электронным пучком субмикросекундной длительности с широким энергетическим спектром ($E_{\text{ср}} \approx 150$ кэВ, $E_{\text{max}} \leq 250$ кэВ), обеспечивающим заведомо неравномерное распределение поглощенной дозы по глубине.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Обоснованность и достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, определяется использованием общеизвестных методик с применением стандартных средств измерения для получения массива экспериментальных данных. Результаты и выводы диссертационной работы не противоречат и дополняют данные других исследователей.

Основные положения и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на научном семинаре Научно-производственной лаборатории Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий Инженерной Школы Новых Производственных Технологий НИ ТПУ, г. Томск, на международных конференциях и конференциях студентов и молодых учёных: Международный конгресс «Потоки энергии и радиационные эффекты» (EFRE); Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «Высокие Технологии в Современной Науке и Технике»; International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications"; Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Российский и международный опыт подготовки кадров.

Работа выполнялась в рамках проектов/договоров/грантов:

2013 год – х/д № 3-295/2013У Разработка технологии и оборудования очистки и обеззараживания промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод;

2016 год – Грант РФФИ № 16-38-00055 – Исследование процесса диссипации энергии импульсного электронного пучка в газовых композициях на основе гексафторида серы;

2017 год – х/д № 17.17-339/2017к «Разработка, изготовление и поставка элементов ускорителя для генерации электронных пучков»;

2018 год – Грант РФФИ № 18-32-00184 – Исследование распределения энергии импульсного электронного пучка наносекундной длительности с широким энергетическим спектром (до 500 кэВ) в объёме газов, жидкостей и твердых тел;

2020 год – ВИУ-НРИИ-161/2020 – Субмикросекундные ускорители электронов.

Публикации

Основные результаты работы опубликованы в 10 печатных работах (из них 2 в журналах из перечня ВАК, 8 из перечня SCOPUS и 7 из перечня WOS).

Личный вклад автора

Диссертационная работа является результатом работ по оптимизации параметров частотного импульсного электронного ускорителя для практического применения. Автор принимал непосредственное участие в формулировании задач исследования по теме диссертации, подготовке и проведении научных экспериментов, обработке, анализе и интерпретации полученных данных. Подготовка публикаций, формулировка выводов и основных положений диссертационной работы проводились при непосредственном участии автора.

Результаты исследований являются оригинальными и получены лично автором или при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит введение, пять глав, заключение, список литературы из 231 наименований. Работа изложена на 105 страницах машинописного текста, включая 65 рисунков и 2 таблицы.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы, поставлены задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту положения.

В **первой главе** приведён анализ результатов литературного обзора по теме диссертации, на основе которого сформулированы рекомендации по разработке и оптимизации узлов электронного диода с выводом пучка в атмосферу частотного ускорителя субмикросекундной длительности с целью повышения ресурса.

Во **второй главе** приведено описание конструкции, принципа действия, состав диагностического оборудования и параметры работы экспериментального стенда на основе частотного электронного ускорителя «АСТРА-М».

В третьей главе проводится сравнение конструкций высоковольтного вакуумного изолятора, и исследуется способ распределения напряжения по изолятору с гальванической связью градиентных колец с витками импульсного трансформатора.

В четвертой главе показаны результаты исследования характеристик электронного диода с взрывоэмиссионными катодами из металлокерамики ($\text{BaTiO}_3 + \text{Cu}$, в пропорции 1:1), пористой меди (40% пористость) и углеродного волокна с дискретным и планарным исполнением эмитирующей поверхности. Генерация и инъекции пучка электронов в атмосферу проводились непрерывными сериями импульсов с частотой повторения импульсов до 20 имп./с.

В пятой главе приводятся конструкции анодного узла, анализ характеристик пучка, выведенного в атмосферу и демонстрация возможности обеззараживания водных растворов с *E.Coli* при частичной и полной обработке.

В заключении сформулированы основные научные результаты, полученные в диссертационной работе.

Глава 1. Конструкции диодов импульсных ускорителей электронов со взрывоэмиссионным катодом

В наносекундных и субмикросекундных ускорителях прямого действия преобразование электрической энергии в энергию пучка заряженных частиц происходит в конструктивном узле, называемым диодом. Функциональная структура диода, как правило, состоит из: проходного вакуумного изолятора, отделяющего высоковольтный генератор от объема с пониженным давлением – вакуумной камеры, катода – эмиттера заряженных частиц; вакуумной камеры; анодного узла – в зависимости от применения ускорителя может быть в виде выводного окна для инъекции электронного пучка в атмосферу или с применением в вакуумной камере, источником СВЧ-излучения, тормозного рентгеновского излучения. Диод ускорителя, его импеданс, геометрические размеры, конфигурация электродов и другие его характеристики определяются конкретными условиями применения ускорителей. Далее рассмотрены некоторые примеры исполнения диодов наносекундных и субмикросекундных ускорителей. В рассмотренных примерах сделан акцент на скорость нарастания ускоряющего напряжения в диоде (отношение максимального значения ускоряющего напряжения к длительности фронта импульса напряжения), на импеданс (отношение значения ускоряющего напряжения к значению полного тока в диоде в момент максимума тока) и ресурс диода. Ресурс диода и ускорителя в целом является характеристикой, определяющей возможность применения на практике. Количество импульсов тока пучка, доступное для применения ограничивается как критическими изменениями параметров генерируемых импульсов, так и выходом из строя узлов ускорителя.

1.1 Диоды импульсных ускорителей

Ускоритель Руслан [21,22] имеет простую функциональную схему формирования импульсов напряжения – генератор Аркадиева-Маркса напрямую подключается к вакуумному диоду с взрывоэмиссионным катодом. Диодная система ускорителя представлена на рисунке 1. В длительном режиме работы генератора на частоте 200 имп./с выходная мощность составила 86 кВт. Ресурсные испытания проводились с зарядкой одной ступени генератора Маркса и последующей разрядкой через испытательный разрядник на нагрузочный резистор с проточной водой. При средней мощности 5 кВт, частоте следования импульсов 330 имп./с при ежедневной непрерывной работе в течение 8 часов срок службы разрядников составлял порядка 10^8 импульсов и определялся износом электрода разрядников. Электрические параметры ускорителя представлены в таблице 1.

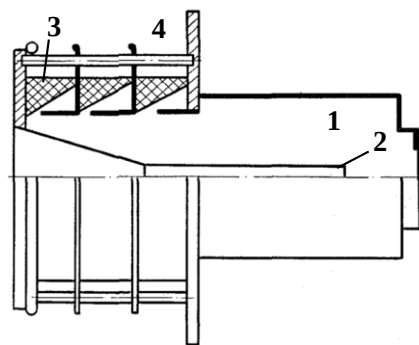


Рисунок 1 – Диод ускорителя Руслан: 1 – вакуумный объем; 2 – катододержатель;
3 – секционированный проходной изолятор; 4 – масляный объем

На рисунке 2 представлена блок-схема сильноточных ускорителей наносекундных импульсно-периодических ускорителей Синус [23,24] с СВЧ рупором в качестве нагрузки. В схеме зарядным устройством является трансформатор Тесла, накопителем энергии является длинная коаксиальная линия с масляной изоляцией, выполняющая роль линии формирования импульса, высоковольтный ключ - двух- или трехэлектродный газовый разрядник, линия передачи представляет собой длинную неоднородную линию, выполняющую роль волнового преобразователя. Вакуумный электронный диод - планарной или коаксиальной формы с магнитной изоляцией и холодным взрывоэмиссионным катодом. Электрические параметры ускорителя представлены в таблице 1.

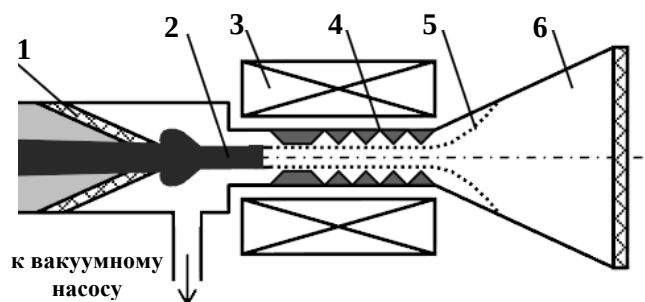


Рисунок 2 – Схема диода ускорителя семейства Синус: 1 – высоковольтный изолятор;
2 – катододержатель со взрывоэмиссионным катодом; 3 – соленоид; 4 – электродинамическая
система СВЧ-генератора; 5 – сильноточный релятивистский электронный пучок;
6 – излучающий СВЧ рупор с вакуумным окном

На рисунке 3 представлен диод сильноточного ускорителя наносекундных импульсно-периодических ускорителей Синус-6 [25] с выводным окном для инжекции пучка в атмосферу. Данный импульсный ускоритель наносекундного диапазона применялся для разработки технологии по сушке лакокрасочных покрытий на древесине и генерировал ленточный ($6 \times 60 \text{ см}^2$) электронный пучок. Ускоритель был создан для разработки технологического процесса сушки

лакокрасочных покрытий на древесине ленточным электронным пучком наносекундной длительности. Применяемые металлические многоострийные взрывэмиссионные катоды из танталовой ленты 12 мкм и титановые выводные окна обеспечивали ресурс 10^7 импульсов при частоте 100 имп./с. За 10^8 импульсов пучка были зафиксированы поломки только в генераторе ускорителя при штатной работе диодной системы. Электрические параметры ускорителя представлены в таблице 1.

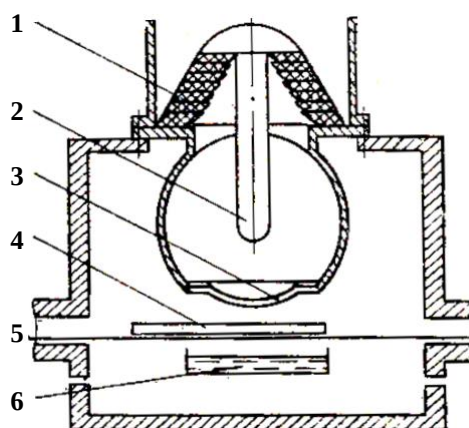


Рисунок 3 – Конструктивная схема диода ускорителя семейства Синус-6:

1 – секционированный вакуумный изолятор; 2 – катод; 3 – выходное окно; 4 – облучаемый объект; 5 – транспортер; 6 – коллектор

Подобные ускорители на основе формирующих линий и трансформаторов Тесла представлены так же и за рубежом, как пример IEBA [26], HEART-20 [27], основные параметры диодов ускорителей представлены в таблице 1.

Компактной версией ускорителей на основе формирующих линий и трансформаторов Тесла являются ускорители серии РАДАН [28–30]. Конструкция газонаполненного диода показана на рисунке 4, катодом служила трубка из стальной фольги толщиной 50 мкм и диаметром 6 мм. Зазор между катодом и анодом регулировалось в пределах 13–20 мм. Вывод электронного пучка осуществлялся через окно, в качестве мембраны которого использовалась AlBe фольга толщиной 40 мкм, Al фольга толщиной 10 мкм или сетка с прозрачностью 0,5. Уменьшения габаритов удалось достичь путем замены вакуумной среды диода на смесь инертных газов. Электрические параметры ускорителя представлены в таблице 1.

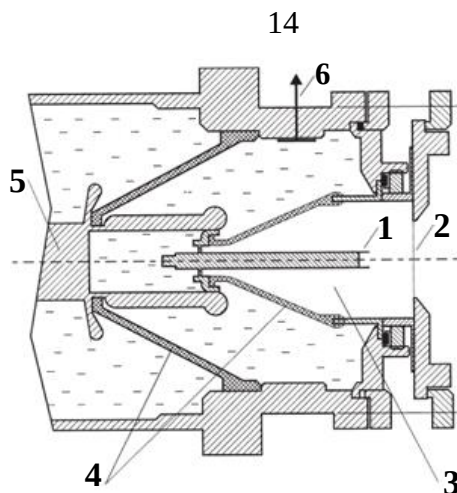


Рисунок 4 – Конструктивная высоковольтного вывода генератора и газового диода ускорителя РАДАН-220: 1 – катод; 2 – выводная фольга или сетка; 3 – газовый диод; 4 – изоляторы; 5 – потенциальный электрод генератора; 6 – емкостной делитель напряжения

В литературе встречаются импульсные электронные ускорители на основе двойной формирующей линии с подключением формирующей линии к диоду напрямую [23,24,26,31] и через трансформатор [32–35].

Одним из примеров ускорителей на основе формирующих линий, подключенных к диоду через трансформатор, является ускоритель, описанный в [34], в нём ферромагнитная система из двенадцати тороидальных сердечников с одновитковой обмоткой, разделенных кольцевыми изоляторами из органического стекла, заключенная в корпус вакуумного диода, позволяет параллельно подключить шесть двойных формирующих линий к диоду (рисунок 5).

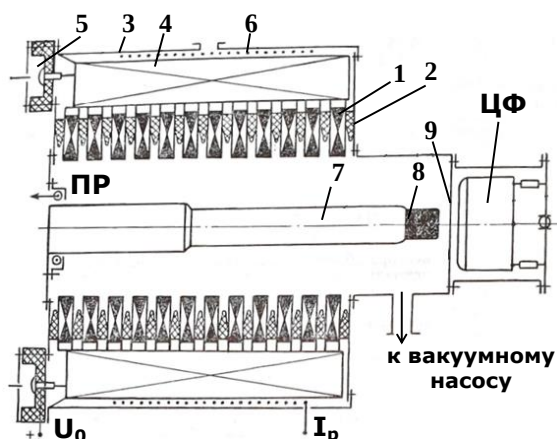


Рисунок 5 – Конструкция диода ускорителя на основе магнитных ключей: 1 – ферромагнитный сердечник; 2 – изолятор; 3 – корпус; 4 – импульсный генератор (д.ф.л.); 5 – многоканальный разрядник; 6 – спиральная катушка; 7 – катододержатель; 8 – катод; 9 – анодная фольга; ПР – пояс Роговского; ЦФ – цилиндр Фарадея; U_0 – зарядное напряжение; I_p – ток размагничивания

Представленная конструкция с планарным графитовым катодом и алюминиевыми анодными фольгами при остаточном давлении 10^{-4} Торр генерировала пучки электронов 6,5 кА с энергией до 700 кэВ и частотой до 10 имп./с. В более мощном зарубежном ускорителе описанная схема выступает промежуточным звеном микросекундного диапазона для заряда формирующей линии подключенной к диоду через линейный сумматор индукционного напряжения [35]. Электрические параметры ускорителей представлены в таблице 1.

Другим примером ускорителя на основе формирующих линий, подключенных к диоду через трансформатор, является ускоритель ТЭУ-500 [32,33]. В такой схеме двойная формирующая линия подключается к диоду через двухвитковый автотрансформатор и позволяет формировать пучок электронов с энергией в импульсе 150...200 Дж, кинетической энергией электронов 450...500 кэВ и длительностью импульса на полувысоте 60 нс. Разработанный наносекундный генератор обеспечивал стабильную работу в режиме генерации электронного тока. Были выполнены исследования стабильности работы ускорителя на частоте 5 имп./с в течение 1,5 мин. В качестве катода (рисунок 6) применяется планарный взрывоэмиссионный графитовый катод.

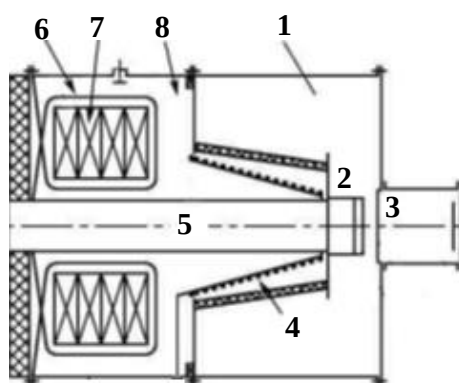


Рисунок 6 – Схема ускорителя ТЭУ-500: 1 – диодная камера; 2 – катод; 3 – реакционная камера; 4 – защитная индуктивность на высоковольтном изоляторе; 5 – катододержатель; 6 – витки размагничивания; 7 – согласующий (авто)трансформатор; 8 – маслonaполненная камера

Применение согласующего трансформатора позволило работать с диодом импедансом 60-100 Ом катодом диаметром 60 мм и зазором анод-катод 15-18 мм при давлении 0,1-0,01 Па (10^{-4} - 10^{-5} Торр), обеспеченном паромасляным диффузионным насосом. Выводное окно выполнено из алюминиевой фольги 120 мкм с поддерживающей решеткой из нержавеющей стали, толщиной 4 мм и оптической прозрачностью 75 %. Для устранения пробоев выводной фольги на послеимпульсе ускоряющего напряжения, было предложено и апробировано применение кольцевого защитного электрода [36] на анодном фланце, с ним ресурс анодной фольги удалось

повысить с 10^3 до 10^5 импульсов при частоте 2 имп./с, суммарные потери тока электронного пучка при этом не превышали 25 %. Ускоритель [37], построенный по подобной схеме с конвертором тормозного рентгеновского излучения в роли анода, обладал схожими электрическими параметрами и стабильно работал с частотой 2 имп./с, и 10 имп./с в пачках по 1000 импульсов. Электрические параметры ускорителей представлены в таблице 1.

Ускоритель Астра-М [38], выполненный на основе емкостных накопителей с псевдоискровым разрядником и повышающим импульсным трансформатором, подключённым напрямую к электронному диоду (рисунок 7) с планарным металлокерамическим взрывоэмиссионным катодом диаметром 40 мм и выводным окном из титановой фольги 60 мкм анод-катодный зазор ~ 23 мм позволил обеспечить импеданс диода ~ 265 Ом и устойчивую генерацию пучка при 40 имп./с при давлении 10^{-6} Торр, полученном с помощью откачной системы на основе криогенного вакуумного насоса. Диод ускорителя, разработанного по подобной схеме [39], с катодом из углеродного волокна диаметром 45 мм и анод-катодным зазором 55 мм обеспечил импеданс 300 Ом и устойчивую работу до 5 имп./с. Электрические параметры ускорителя представлены в таблице 1.

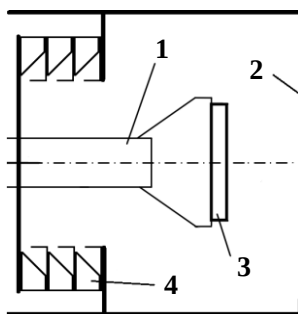


Рисунок 7 – Диод ускорителя Астра-М: 1 – катододержатель; 2 – выпускное окно;
3 – взрывоэмиссионный катод; 4 – секционированный проходной изолятор

Ускорители на основе индуктивных накопителей энергии, созданные по схеме тиратрон – импульсный трансформатор – полупроводниковый прерыватель тока, представлены ускорителями серии УРТ [40]. Узлы электрической схемы ускорителя и электронный диод изолированы с помощью трансформаторного масла и расположены в металлическом корпусе с водяной рубашкой для охлаждения [15,41]. Рассмотрим конструкцию таких ускорителей на примере УРТ-0,5. Электронный диод ускорителя (рисунок 8), работал при давлении в вакуумной камере около 10^{-4} Торр, полученном с помощью диффузионного вакуумного насоса. Изолятор вакуумного диода имел секционированную конструкцию с экранированной поверхностью диэлектрических колец и представляет собой шесть колец из полиметилметакрилата высотой 30 мм. В качестве источника электронов применялся МДМ (Металл-Диэлектрик-Металл)

катод [42,43]. Анодный узел выполнен в виде выводного окна диаметром 100 мм алюминиевой опорная решетка с прозрачностью 85 % в качестве анода, выводная мембрана состоит из 2 слоев алюминиевой фольги по 15 мкм. Охлаждение осуществляется водой по круговому каналу по периметру решетки [6]. Электрические параметры ускорителя представлены в таблице 1.

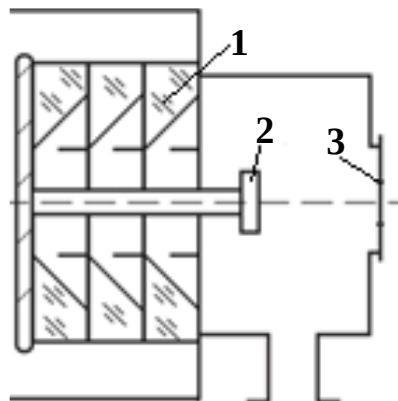


Рисунок 8 – Схема диода ускорителя УРТ-0,5: 1 – секционированный проходной изолятор; 2 – взрывоэмиссионный катод; 3 – выводное окно

Генератор ускорителя Малахит малогабаритной версии [44] ускорителей с индуктивным накопителем энергии размещался в герметичном корпусе диаметром 500 мм и высотой 500 мм и работал при давлении в вакуумной камере 1 Па ($7,5 \cdot 10^{-3}$ Торр). Изолятор выполнен в виде диска из органического стекла толщиной 3 см. В генераторе используется планарный диод (рисунок 9) с металлодиэлектрическим катодом.

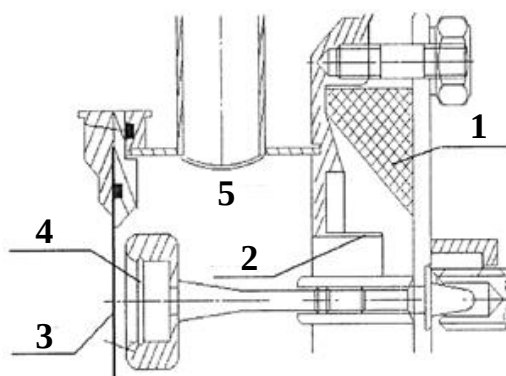


Рисунок 9 – Диод ускорителя Малахит: 1 – изолятор; 2 – экранирующий электрод; 3 – мишень; 4 – взрывоэмиссионный катод; 5 – вакуумная камера

Зазор между катодом и анодом можно плавно регулировать в диапазоне от 0 до 20 мм. Выходное окно имеет диаметр 45 мм. В зависимости от цели эксперимента в выходное окно может быть установлена либо фольга (50 мкм алюминия) для вывода электронного пучка в атмосферу, либо танталовая пластина для генерации тормозного рентгеновского излучения.

Охлаждение рабочих узлов осуществлялось с помощью промышленного вентилятора. Испытания ускорителя на резистивную нагрузку и вакуумный диод, показали стабильную непрерывную (безостановочную) работу с частотой 25 имп./с в течение 13 часов, и безотказную работу в течении 12 месяцев, совершив $\approx 10^7$ импульсов. Электрические параметры ускорителя представлены в таблице 1.

Другая мобильная версия сильноточного ускорителя электронов на основе индуктивного накопителя с прерывателем тока представлена в [45]. Ускоритель разрабатывался для проведения исследований в области очистки атмосферного воздуха и дымовых газов от различных токсичных примесей. Катод (рисунок 10) представляет собой дюралюминиевый стержень длиной 80 см в котором закреплены два ряда керамических пластин и два ряда металлических острий, находящихся в упругом контакте с керамическими пластинами. Анод представляет собой медную решетку с выводной алюминиево-магниевой фольгой толщиной 50 мкм и размером 8×85 см. Газовая система содержит форвакуумный насос ЗНВР-5ДМ, служащий для предварительной откачки вакуумной камеры, диффузионный паромасляный насос Н-160, создающий остаточное давление в камере $\sim 10^{-3}$ Торр. Электрические параметры ускорителя представлены в таблице 1.

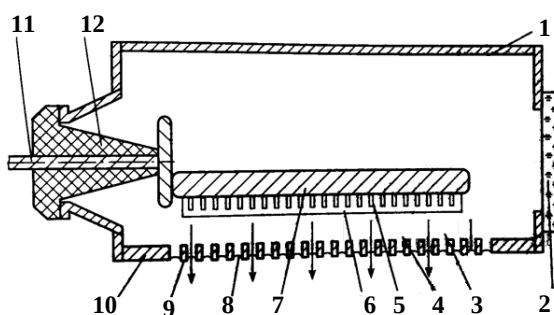


Рисунок 10 – Устройство вакуумного диода [45]: 1 – вакуумная камера; 2 – окно из оргстекла; 3 – ускоряющий промежуток; 4 – ускоряемые электроны; 5 – ряд металлических острий; 6 – ряд керамических пластин; 7 – взрывоэмиссионный катод; 8 – выводная фольга; 9 – медная решетка; 10 – опорная плита; 11 – высоковольтный токоввод; 12 – проходной вакуумный изолятор

Таблица 1 – Параметры наносекундных и субмикросекундных ускорителей электронов

Название ускорителя	$U_{\text{уск}}^{\text{Мах}}, \text{кВ}$	$I_{\text{диода}}, \text{кА}$	$E_{\text{имп}}, \text{Дж}$ ($U_{\text{ускМах}} \cdot I_{\text{диод}} \cdot t_{\text{имп}}$)	$t_{\text{имп}}$ при $U_{\text{уск}}$ на полувысо-те, нс	$dU_{\text{уск}}/dt_{\text{ф}}, \cdot 10^{12} \text{ В/с}$	Импеданс диода при $I_{\text{мах}}, \text{Ом}$	Частота, имп./с	$P_{\text{диода}}, \text{Вт}$	Ресурс, имп (ч. непр. работы)	Лит-ра
РАДАН–220	110	5,5	1,21	2	730	20	до 100	121	$>10^7$	[30,46]
СИНУС–5	700	6	21	5	~560	115	100	2100	-	[25]
СИНУС–200	350 (200)	3,5 (2)	3,7	3	~460	100	0,1(1000)	0,37	-	[24]
РАДАН–303	200	4	3,6	4 – 5	340	50	до 100	360	$>10^7$	[30,46]
–	700	5	35	10	200	120	100	3500	$>10^8 (>3\text{ч})$	[31]
СИНУС–7	2000 (1500)	20 (15)	1600	40	~200	100	0,1(100)	160	-	[24]
СИНУС–700	1000 (800)	10(8)	300	30	~133	100	0,1(200)	30	-	[24]
IEBA	550	11	212	35	120	42	100	21200	$>6 \cdot 10^6$	[26]
RHEPP-II	2200	25	3850	70	73	88	100	385000	-	[35]
–	700	6,5	182	40	70	110	10	1820	-	[34]
СИНУС–6	400	8	80	25	~64	50	100	8000	10^7	[25]
РИТА–150	150	0,5	0,75	10	~60	300	15	11.25	-	[25]
–	450	9,5	342	80	24	45	2(10)	684	$>5 \cdot 10^4$	[37]
HEART-20	421	40,1	1215	72	21	10	5	6075	-	[27]
УРТ–1М–300	950	~0,93	~80	90	19	~1021	300	24000	$>1,4 \cdot 10^7$	[6,47]
ТЭУ–500	350	12	252	60	17	30	1(5)	252	-	[32,33]
УРТ–1	900	~1,78	~80	50	13.8	~505	50	4000	-	[6,41,47]
-	400	0,25	4	40	13.3	1160	200	800	-	[45]
Ruslan	700	5	175	50	9,7	200	100	17500	$>10^8$	[21,22]
Малахит	220	0,41	2.4	27	8.5	365	50	120	$>10^7$	[44]
УРТ–0.5	450	~1,1	~25	50	8	~410	200	5000	-	[6,47,48]
УРТ–0.2	200	0,236	1,6	35	5	850	125(700)	200	-	[6,47,49]
Астра–М	450	1,7	91,8	120	4,5	265	40	3672	$>10^7$	[38]
–	475	1,5	178	250	1.9	300	5	890	-	[39]

Примечания

1 (*) – Значения для кратковременного режима работы.

2 (~) – Расчетные значения, полученные из мощности выведенного пучка.

На основе представленной информации можно сделать вывод, что диоды наносекундных и субмикросекундных ускорителей электронов прямого действия несмотря на разный импеданс и электрические характеристики функционально имеют схожую конструкцию и

функциональный состав. При увеличении длительности импульса ускоряющего напряжения присутствуют тенденции увеличения импеданса диода и уменьшения скорости нарастания напряжения. Наибольшая скоростью нарастания напряжения наблюдается, когда электронный диод подключен напрямую к формирующей линии, такие диоды обладают минимальными значениями длительности импульса ($\approx$ единицы нс), импеданса (≤ 50 Ом), а ускорители отличаются компактностью и мощностью пучка в диоде $\approx$ сотни Вт. Увеличение мощности (единицы кВт) ускорителей на такой схеме показано на диодах с импедансом ≈ 100 Ом и длительностью импульса (≤ 30 нс), обладающих меньшей скоростью нарастания напряжения. Кроме того, заметное уменьшение скорости нарастания напряжения наблюдается при подключении диода к формирующей линии генератора через согласующий трансформатор. Такое решение позволяет при увеличении импеданса диода в 1,5-2 раза (≤ 100 Ом) на порядок увеличить длительность импульса прикладываемого напряжения (≈ 50 нс) при мощности в диоде ($\leq$ кВт). Диоды ускорителей с индуктивным накопителем энергии при сохранении длительности импульса прикладываемого напряжения (≈ 50 нс) и скорости нарастания напряжения отличаются наибольшими значениями импеданса диода ($\approx 0,5-1$ кОм) при мощности в диоде (единицы-десятки кВт). Средними значениями импеданса (≈ 300 Ом) с наибольшей длительностью (120-250 нс) и наименьшей скоростью нарастания напряжения ускоряющего импульса при мощности в диоде (единицы кВт) демонстрируют диоды ускорителей на основе повышающего импульсного трансформатора. Генераторы ускорителей с такими диодами (при скорости нарастания напряжения $\leq 5 \cdot 10^{12}$ В/с) имеют хорошо изученные электрические схемы и конструкции, а отечественной промышленностью выпускаются основные компоненты, следовательно, диод именно для таких ускорителей имеет наибольшие шансы массового применения в рамках мощности в диоде единицы кВт.

1.2 Высоковольтный проходной изолятор

Функционально, изоляторы применяются в электроустановках для разделения элементов конструкций, находящихся под разным потенциалом. Материалы, среда, размер и форма изоляторов определяются как абсолютным значением разности потенциалов, так и длительностью приложения напряжения. Применение импульсного напряжения позволяет увеличить электрическую прочность до 4 раз для отдельных материалов при уменьшении длительности импульса прикладываемого напряжения, по сравнению с постоянным напряжением, и за этот счет значительно уменьшить размеры изоляторов [50,51].

В работах [52–58] приведены основные законы развития вакуумного электрического пробоя для импульсного напряжения на изоляторах, с зависимостями от формы диэлектрических частей и полярности напряжения. Положительный угол наклона диэлектрической вставки в 20-

45° (широкая часть у отрицательного электрода) позволяет увеличить импульсную поверхностную электрическую прочность до 5 раз, в зависимости от материала диэлектрика. Кроме того, у разных диэлектрических материалов разное значение газоотделения в предпробойных стадиях [59], что так же влияет на электрическую прочность. Качество обработки поверхности самого диэлектрика оказывает значительное влияние на электрическую прочность его поверхности, так тщательная полировка образца из органического стекла привела к снижению на 30-40 % напряжения пробоя по поверхности по сравнению с образцом с заданной шероховатостью на поверхности диэлектрика [60].

Напряженность электрического поля в области контакта электрода с диэлектриком в вакууме [58]:

$$E_k = \frac{U \cdot \varepsilon}{L}, \quad (1)$$

где U – полное напряжение между электродами; ε – диэлектрическая проницаемость; L – зазор между электродами.

Соответственно, с одной стороны, чем ниже диэлектрическая проницаемость образца, тем выше пробивное напряжение, поэтому имеет смысл применять диэлектрики с низким ε , либо покрывать диэлектрики пленкой из материала с низким значением ε . С другой стороны, оказывает большое влияние форма сочленения электродов с диэлектриком на качество изоляции. В [61,62] улучшение качества изоляции достигается в тех случаях, когда в месте сочленения изолятора и электрода имеется область для электронов, которая препятствует прохождению их вдоль поверхности изолятора параллельно силовым линиям электрического поля.

Материал, форма и состояние поверхности электродов так же имеют важное значение при проектировании и изготовлении вакуумных изоляторов. Электроды из обработанной нержавеющей стали показывают максимальное пробивное напряжение и время запаздывания вакуумного пробоя [56,58,63–65].

Примером простого проходного высоковольтного изолятора служит радиальный изолятор в виде полиэтиленового диска (рисунок 11), применяемый в ускорителе ТЕМП-4М [66] и разделяющий объем между деионизованной водой двойной формирующей линии и вакуумной камерой с давлением 10^{-5} Торр. Изолятор обеспечивает работу ускорителя при напряжении 250 кВ и частоте 1 имп./с. Изолятор выполнен из полиэтиленового диска и при длине поверхности 200 мм обеспечивает электрическую прочность по вакуумной стороне 1,5 кВ/мм.

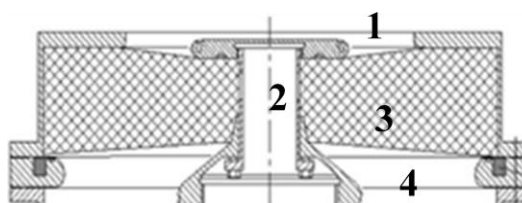


Рисунок 11 – Высоковольтный изолятор ускорителя Темп-4М: 1 – объем с деионизованной водой; 2 – токовод; 3 – диэлектрик; 4 – вакуумный объем

Конический вариант (рисунок 12) исполнения монолитных проходных изоляторов позволяет увеличить площадь поверхности изолятора. Примерами наносекундных ускорителей с такими изоляторами являются ЭСУ-1 [67] и Импульс [68]. При длине поверхности изолятора 300 мм поверхностная электрическая прочность достигала 6,7 кВ/мм, Высоковольтный изолятор выполнен в виде вакуумно-плотного перехода от коаксиальной линии, заполненной глицерином ($\epsilon = 40$), к вакуумной камере с давлением 10^{-5} Торр. Наличие в формирующей линии диэлектрика с большим ϵ и с достаточно высокой проводимостью позволило равномерно распределить напряжение вдоль поверхности изолятора со стороны вакуумной части, однако со стороны жидкого диэлектрика на половине длины изолятора напряжение в 1,5 раза превышает значение, соответствующее равномерному распределению.

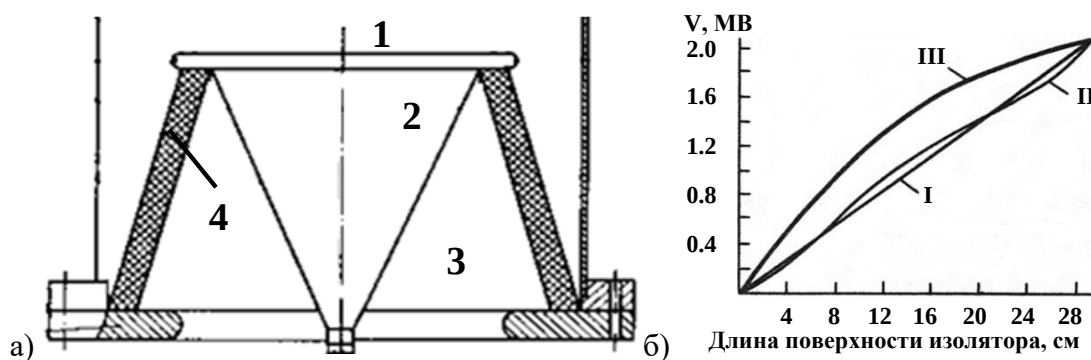


Рисунок 12 – а) конструкция проходного изолятора ускорителя ЭСУ-1: 1 – вакуумный объем; 2 – токовод; 3 – объем с жидким диэлектриком; 4 – диэлектрик; б) распределение напряжение по поверхности изолятора: I – равномерное распределение; II – по поверхности изолятора в вакууме; III – по поверхности изолятора в глицерине

Монолитные высоковольтные вакуумные изоляторы в импульсных электроустановках не обеспечивают равномерное деление напряжения по всей поверхности изолятора, что приводит к пробоям [69]. Данный процесс более ярко выражен при частотной генерации импульсов напряжения в длительных режимах работы ускорителей. Повреждение материала диэлектрика в результате частичного пробоя изолятора диода приводит к повышению давления в вакуумной камере, короткому замыканию ускоряющего промежутка, прорыву мембраны выходного

окна [70] и выходу из строя самого вакуумного электронного диода. Повышение ресурса проходного изолятора - актуальная задача, определяющая срок службы ускорителей в целом.

Применение секционирования изоляторов позволяет повысить диэлектрическую прочность и ресурс [71] изоляторов за счет снижения локальных напряженностей электрического поля [53]. В литературе широкое распространение получили секционированные цилиндрические изоляторы стоповой конструкции [72], представленной на рисунке 13. Цилиндрический изолятор представляет собой стопу из диэлектрических колец диаметром 61 см толщиной 4,45 см и градиентных алюминиевых шайб толщиной 0,64 см, чередующихся друг за другом. Изолятор стянут нейлоновыми стержнями. Диэлектрические кольца имели скос по 45° к оси изолятора. При работе в изоляторе поддерживалось давление 10^{-5} Торр. Изолятор выдерживал 800 кВ при средней электрической прочности не более 1,6 кВ/мм.

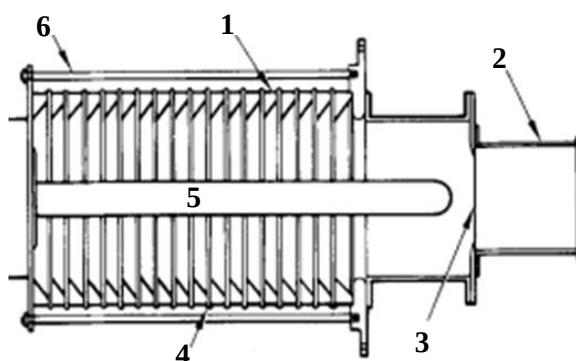


Рисунок 13 – Проходной секционированный цилиндрический изолятор: 1 – оргстеклянное кольцо; 2 – камера дрейфа; 3 – анод; 4 – алюминиевое градиентное кольцо; 5 – катод; 6 – нейлоновая стяжка

Однако, секционирование само по себе не позволяет в полной мере равномерно распределить напряжение по изолятору [58,73]. Как видно из рисунка 14 [58] распределение напряжения отличается от равномерного, так на кольца №1 и №21 приходится по $\geq 15\%$ от общего напряжения, что превышает оптимальное значение более чем в 3 раза. Поэтому потенциал по градиентным кольцам распределяют принудительно, различными способами.

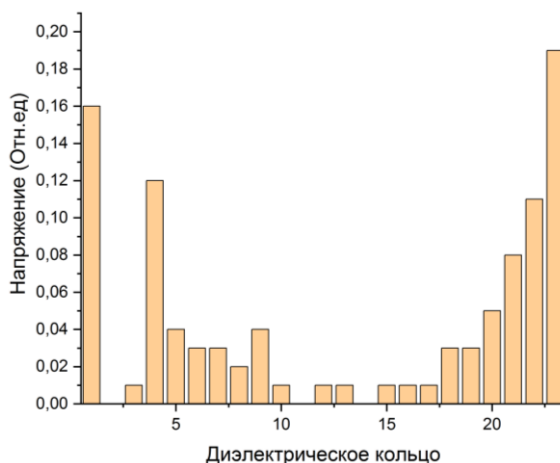


Рисунок 14 – Теоретическое распределение потенциала, по секционированному цилиндрическому изолятору [58]

Это обстоятельство особенно важно при разработке малогабаритных импульсных источников ионизирующего излучения, конструктивные размеры которых не могут обеспечивать кратный запас по электрической прочности изолирующих промежутков [74,75].

В литературе описаны примеры применения резистивных сопротивлений (рисунок 15) для распределения напряжения по изолятору, как для постоянного [76,77], так и для импульсного [25,37,78] ускоряющего напряжения.

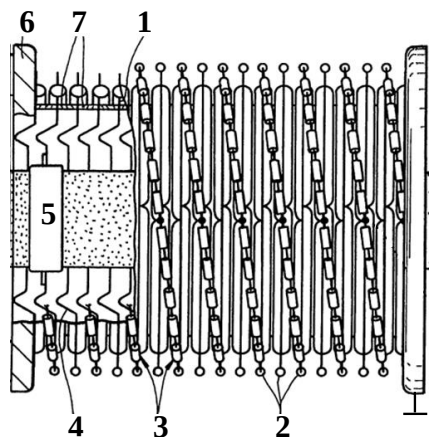


Рисунок 15 – Пример секционированного цилиндрического изолятора с резистивным распределением напряжения по изолятору: 1 – градиентное кольцо; 2 – экранирующий электрод; 3 – низкоиндуктивный резистор; 4 – экранирующий электрод; 5 – токовод; 6 – высоковольтный электрод; 7 – диэлектрические кольца

Такой способ позволяет равномерно распределить напряжение по изолятору и увеличить прочность всего изолятора [78]. В качестве резистивного делителя напряжения по изолятору может применяться в том числе материал самого изолятора, например, резина с заданной

проводимостью [79]. Такой способ распределения зависит от параметров резистивного сопротивления, значит выход из строя одного сопротивления, под действием электрического напряжения или вторичного рентгеновского излучения, скажется на электрической прочности всего изолятора.

Также в литературе [73] описан способ применения дополнительных эмиссионных поверхностей (рисунок 16), которые позволили равномерно распределить напряжение, однако этот способ применим для узкого диапазона назначений характеристик генератора (амплитуда напряжения, время нарастания, длительность импульса, амплитуда тока) и сложен в настройке. При импульсе напряжения между высоковольтным электродом, экранами градиентных колец и экранами между собой развивается паразитный электронный пучок, что в процессе эксплуатации приводит к увеличению дозы облучения диэлектрического материала изолятора, а также к деградации экранных поверхностей.



Рисунок 16 – Распределение напряжения с помощью эмиссионных поверхностей

В модернизированной конструкции ускорителя «Тандем» [80,81] источник высокого напряжения размещается внутри изолятора ускорителя с закрепленными на нем высоковольтным и промежуточными электродами. Это позволяет равномерно поделить напряжение по градиентным кольцам проходного изолятора за счет самого генератора прикладываемого напряжения и, как следствие, повышает надежность и электрическую прочность секционированного изолятора. Однако для реализации подобного метода источник напряжения должен быть ступенчатым и количество ступеней должно соответствовать количеству градиентных колец.

Важным параметром классического стопового проходного секционированного изолятора является зазор между катододержателем и радиальными гранями градиентных колец. С одной стороны это влияет на электрическую прочность вакуумного промежутка, а с другой на скорость откачивания остаточной атмосферы из полостей изолятора, максимально удаленных от вакуумного насоса [58]. Кроме того, форма/размер электродов и время приложения импульса напряжения также оказывают существенное влияние на электрическую прочность вакуумного промежутка (рисунок 17).

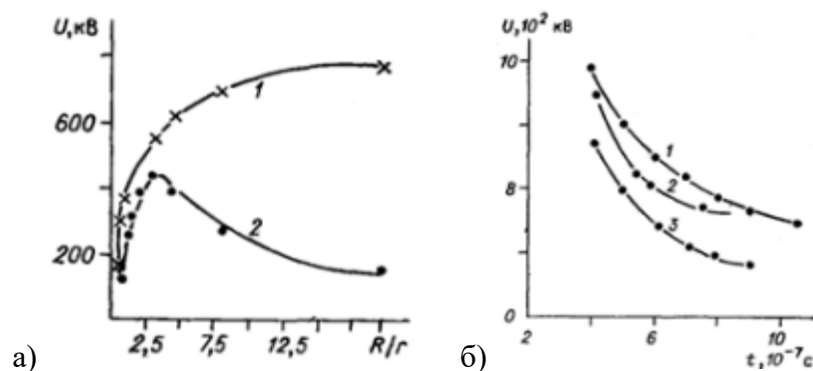


Рисунок 17 – Пробивное напряжение: а) зависимость пробивного напряжения коаксиального вакуумного промежутка от соотношения радиусов электродов (радиус внешнего цилиндра 6 см; 1 – центральный электрод положительный; 2 – центральный электрод отрицательный); б) зависимость пробивного напряжения коаксиального вакуумного промежутка со стальными электродами от времени воздействия косоугольного импульса напряжения (центральный электрод отрицательный; $R/r=2,7$; 1 – $R=5$ см; 2 – $R=4$ см; 3 – $R=2$ см)

В литературе описаны попытки распределения напряжения по изолятору с помощью токовода/катододержателя с переменным диаметром (утолщение у основания) [73], за счет регулировки емкости между катододержателем и градиентными кольцами. Равномерно распределить напряжение по изолятору не удалось – на верхний (ближайший к высоковольтному электроду) приходилось 40 % от общего напряжения, а на остальные по 20 %. Подобная конструкция была описана [4] для диода ускорителей серии УРТ-1 и протестирована в частотном режиме генерации пучка. Результаты испытаний показали, что производительность вакуумной системы оказалась недостаточной для длительной работы ускорителей на больших частотах (более 50 имп./с). Длительная работа приводит к критическому повышению давления в вакуумной камере, при котором происходит пробой в парах газа и становится невозможной генерация электронного пучка. Применение простого цилиндрического катододержателя (без утолщения у основания) и уменьшение диаметра катододержателя с 60 до 30 мм позволило решить проблему. Таким образом, можно утверждать, электрическая прочность изолятора для частотных режимов работы ускорителей в том числе обеспечивается скоростью откачки остаточной атмосферы в диоде [4].

В работах [78,82,83] наглядно показано влияние экранирующего электрода (рисунок 18) на пробивное напряжение вакуумного промежутка. Дополнительная конструктивная экранировка поверхностей диэлектрика изолятора от первичных электронов и электромагнитного излучения оказывает существенное влияние на электрическую прочность всего изолятора, особенно в частотных режимах работы. Изменением степени экранировки путем перемещения экранов удалось увеличить пробивное напряжение изолятора с 700 кВ до 1520 кВ.

Распределение напряжения по секциям изолятора осуществлялось с помощью постоянных непроволочных резисторов.

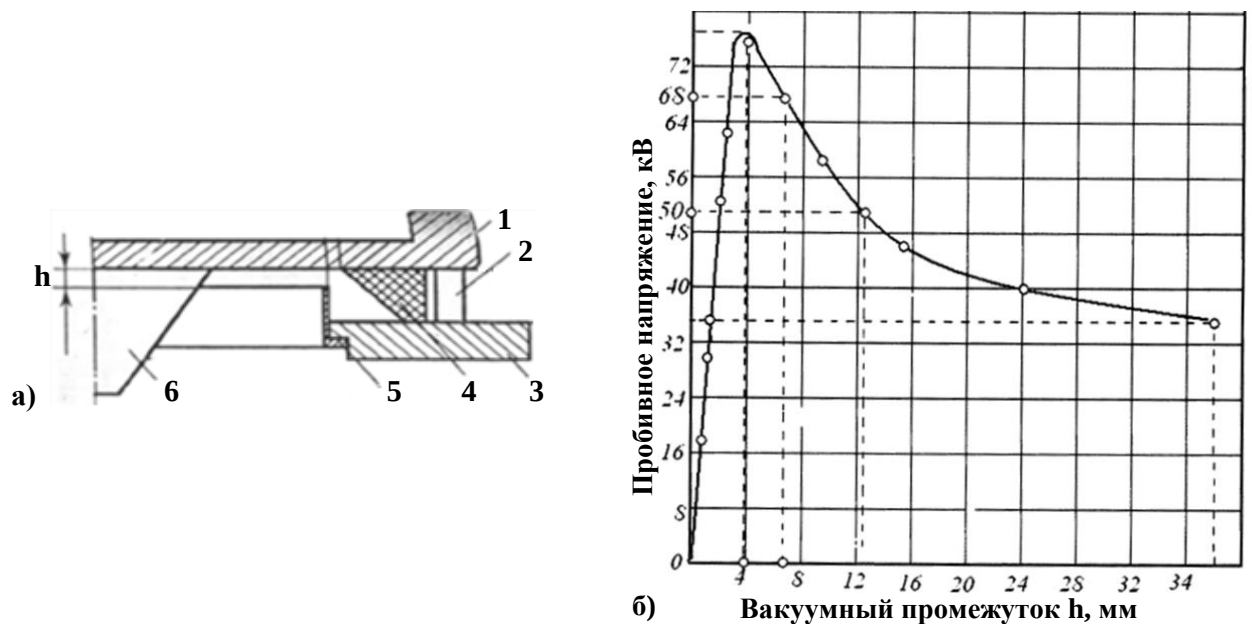


Рисунок 18 – Конструктивная экранировка: а) секция вакуумного изолятора с экранированием поверхности диэлектрика: 1 – высоковольтный электрод; 2 – капролоновая шпилька; 3 – заземлённый электрод; 4 – полиэтиленовое кольцо; 5 – экран; 6 – катододержатель; h – зазор между экраном и градиентным кольцом; б) зависимость пробивного напряжения изолятора от вакуумного промежутка.

Представленные данные показывают, что вакуумный изолятор диодов наносекундных ускорителей, может быть, как монолитным, так и секционированным. Секционирование с принудительным распределением напряжения по градиентным кольцам позволяет увеличить равномерность распределения напряжения по рабочей поверхности изолятора. Экранировка диэлектрических частей от первичных и вторичных электронов и электромагнитного излучения, генерируемых в диоде увеличивает напряжение поверхностного пробоя. Материал и качество поверхности диэлектрика и электродов, геометрия места контакта электрода с диэлектриком, и угол наклона изолирующей поверхности диэлектрика так же влияют на напряжение поверхностного пробоя. Кроме того, в частотных режимах работы определяющую роль играет скорость откачивания остаточной атмосферы из вакуумных зазоров в диоде.

1.3 Взрывоэмиссионные катоды

Для наносекундных сильнотоочных электронных ускорителей наиболее часто используются холодные взрывоэмиссионные катоды. Эмиссионная поверхность пассивного катода – совокупность плазменных образований, возникающих под действием сильных

электрических полей за ограниченный промежуток времени [84,85]. Условия плазмообразования могут изменяться в результате изменения микрорельефа поверхности, температурных дефектов и др, в том числе формируемых на предимпульсах напряжения [20,86] и послеимпульсах. Как правило, это приводит к ограничению срока службы катода. На величину срока службы оказывают влияние и различные внешние факторы, такие как величина электрического поля в диоде, наличие внешнего магнитного поля, остаточное давление в диоде, материал катода, скорость изменения напряжения и др.

Явление взрывной электронной эмиссии заключается в следующем. При приложении к катод-анодному промежутку ускорителя электрического поля, на поверхности катода током автоэлектронной эмиссии происходит разогрев и последующий взрыв микроострий, напряженность электрического поля вблизи которых может усиливаться на несколько порядков [17]. Плазма, полученная в результате этих взрывов, выступает в роли источника электронов сильноточных ускорителей. А микрократеры от взрывов на рабочей поверхности катода могут служить новыми эмиссионными центрами для последующих импульсов. Взрыв может быть облегчен наличием на катоде диэлектрических пленок, включений и адсорбированного газа [18]. Такая эмиссия позволяет генерировать плотности тока недостижимые для других видов электронной эмиссии и достигающие свыше 10^9 А/см². Металлические катоды (медь, нержавеющая сталь, титан, молибден и др.), металл-диэлектрические, графитовые и катоды из углеродного волокна в основном используются в виде: острий, лезвий, планарных конструкций с развитой поверхностью, т.е. когда эмиссия происходит в тройных точках проводник-диэлектрик-вакуум. Работа импульсных сильноточных ускорителей с такими катодами сопровождается рядом специфических особенностей: влияние скорости нарастания напряжения на стабильность работы катода, неравномерность распределения эмиссионной поверхности по площади катода и нестабильность эмиссии от импульса к импульсу, особенно при частотных режимах работы. Связано это с самим механизмом образования новых эмиссионных центров от микровзрывов предыдущих импульсов и процессами распыления материала, как катода во время процессов взрывной эмиссии, так и анода под действием пучка электронов с последующим осаждением полученных продуктов на поверхности узлов диода [84,85].

Металлические взрывоэмиссионные катоды широко описаны в литературе, примеры конструкций представлены на рисунке 19. Катод из танталовой ленты [25] толщиной 12 мкм выдержал 10^7 импульсов без заметных изменений показывая наибольший ресурс при скорости нарастания напряжения $\approx 64 \cdot 10^{12}$ В/с и частоте до 100 имп./с. Медный многоострийный катод [17] в сравнении с никелем, молибденом и алюминием показал наибольший ресурс при скорости

нарастания напряжения $\approx 40 \cdot 10^{12}$ В/с и давлении в камере 10^{-7} Торр, причем при увеличении длительности импульса с 40 нс до 80 нс наблюдается заметная эрозия боковой поверхности (микрократеры), уменьшающаяся по мере удаления от вершины. Исследования металлических цилиндрических катодов [85] при скорости нарастания напряжения $\approx 100 \cdot 10^{12}$ В/с и частоте 50—100 имп./с показали, что для большинства катодных материалов (сталь, медь и др.) ресурс не превышает 10^4 – 10^5 импульсов, однако, механическая обработка катодов восстанавливала их эмиссионные свойства. Для цилиндрического графитового катода [85] с толщиной стенки 0,5–1 мм, срок службы составляет более 10^7 импульсов. В этой же работе также исследовались планарные конструкции катодов (из меди, бронзы, графита, углеграфитовой ткани и др.) при тех же условиях генерации. Эксперименты показали, что все исследованные катоды имеют сравнительно небольшой ресурс $\leq 10^3$ – 10^5 импульсов.

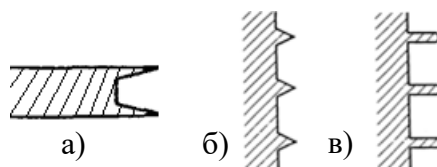


Рисунок 19 – Примеры конструкций кольцевого (а) и планарного (б, в) катодов

Композиционные катоды (рисунок 20), основанные на неполном электрическом разряде по поверхности диэлектрика показали более высокий ресурс [85]. В этих катодах диэлектрик (керамика с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 5$ –6) располагался в области неоднородного электрического поля вблизи металлических поверхностей. Измерения показали, что параметры электронного пучка, создаваемого металло-диэлектрическим катодом, остаются неизменными в течение более чем 10^8 импульсов. При уменьшении скорости нарастания напряжения до $19 \cdot 10^{12}$ В/с, и частоте следования импульсов до 250 имп./с так же показали хорошие результаты [87]. Однако исследования подобных катодов [88], при скорости нарастания напряжения $3,7 \cdot 10^{12}$ В/с и частоте ≤ 5 имп./с уже через $5 \cdot 10^3$ импульсов показали снижение тока пучка на 25 %.

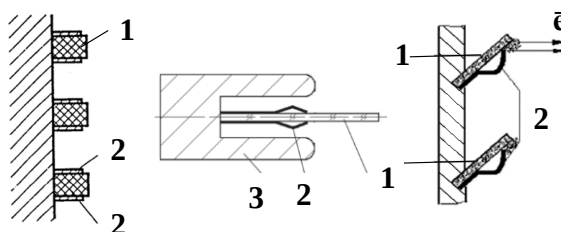


Рисунок 20 – Примеры конструкций металл-диэлектрических катодов: 1 – диэлектрическая пластина; 2 – металлическая гребенка; 3 – катододержатель

Другой вид металл-диэлектрических катодов [43] представляет собой диэлектрическое основание из оксидной нанокерамики с равномерно распределенными по объему металлическими частицами (рисунок). Из-за большой разницы температурных коэффициентов линейного расширения керамики и металлов постсинтезное охлаждение этой системы оставляет вокруг металлических частиц микропустоты, которые, вероятно, служат источниками газа при формировании плазмы на поверхности катода. Исследования проводились на установке УРТ-0,5 [6,48]. Изменением химического состава можно управлять временем задержки тока от напряжения в диоде (с 14 нс до 40 нс). Увеличение этой задержки привело к увеличению эффективности трансформации энергии от генератора в пучок ($\approx 10\%$). Испытания на ресурс выявили следующие особенности: для длительной работы необходима небольшая тренировка для того чтобы характеристики стабилизировались (стабильность сохраняется на протяжении 10^8 импульсов), после 10^8 импульсов пучка на керамической основе были обнаружены следы внедрения разряда вглубь керамики, что может сказаться на рабочих характеристиках катода. Применение планарной конструкции металл-диэлектрического катода, на основе металло-керамики, представляющего собой металлическое основание из меди, в состав которой равномерно распределены по объему керамические частицы (1:1) описано в [38,42]. Данный катод также показал существенную задержку тока от напряжения в диоде (≈ 80 нс). Ресурсные испытания при ускоряющем напряжении 450 кВ, скорости нарастания напряжения $4,5 \cdot 10^{12}$ В/с и частоте 40 имп./с показали снижение тока диода на 45 % за $3,3 \cdot 10^4$ импульсов.

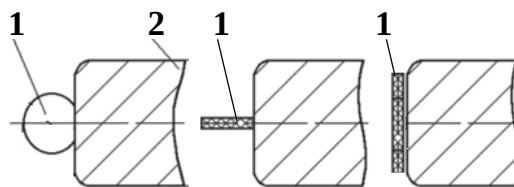


Рисунок 21 – Пример конструкций металл-диэлектрического катода на основе металлокерамики: 1 – металлокерамика; 2 – катододержатель

Так же в качестве катодов для импульсных вакуумных диодов на основе взрывной эмиссии электронов применяется углеродное волокно в разных его исполнениях [39,85,89–91]. Катоды из такого материала имеют малую задержку между плазмообразованием и прикладываемым напряжением, позволяют осуществлять устойчивый токоотбор при среднем значении электрического поля от ≥ 10 кВ/см и скорость нарастания напряжения $\geq 10^{12}$ В/с [88,92]. В работе [85] указано, при скорости нарастания напряжения $\approx 100 \cdot 10^{12}$ В/с и частоте 50 – 100 имп./с такие катоды обеспечивали $10^3 - 10^5$ импульсов. Для пучков длительностью 50 – 150 нс [88,89,93,94] при пиковых значениях плотности тока 130 – 300 А/см² указанные

катоды обеспечивают порядка 10^6 импульсов с уменьшением тока в диоде на 50 %. Нанесение различных покрытий на волокно позволяет регулировать характеристики плазмообразования: покрытие из CsI уменьшает скорость расширения эмиссионной границы катодной плазмы [95–100]; покрытие из Cs увеличило ток в диоде в $\approx 2,5$ раза [101] при прочих равных условиях; покрытие из TiO_2 приводит к увеличению коэффициента усиления поля (с 3144,81 для ZnO/Si , до 6681 для TiO_2), уменьшению скорости расширения эмиссионной границы катодной плазмы (с $1,5\text{--}2,0 \cdot 10^6$ см/с для углеродного волокна, до $1,0\text{--}1,5 \cdot 10^6$ см/с для TiO_2) и пороговых значений напряжения для начала плазмообразования (с $2,2 \cdot 10^4$ В/см для углеродного волокна, до $1,1 \cdot 10^4$ В/см для TiO_2) [102]. Влияние морфологии поверхности волокна на характеристики электронного диода также было обнаружено в работе [89] при плотностях тока $200\text{--}400$ А/см², частоте $20\text{--}50$ имп./с, $3,5 \cdot 10^6$ импульсов в режиме многократно повторяющихся пакетов импульсов с длительностью в единицы секунд, давление в камере поддерживалось на уровне 10^{-3} Торр турбомолекулярным насосом. Авторы работы [89] предположили, что изменение импеданса диода связано с изменением морфологии поверхности волокна и свойств материала. В работе [94] подобных изменений морфологии волокна не обнаружено, волокна только разрушаются, нет следов напыления и увеличения диаметра волокна при плотностях тока 200 А/см², частоте 1 имп./с, 10^4 импульсов в непрерывном режиме, давление в камере поддерживалось на уровне 10^{-9} Торр ионным насосом. Авторы связывают это с более низкими значениями частоты и количества импульсов в эксперименте, давления в вакуумной камере. В [103] катоды из углеродной ткани и пучков углеродных волокон применялись при скорости нарастания напряжения $\approx 2 \cdot 10^{12}$ В/с и частоте 5 имп./с, давление в камере поддерживалось на уровне $(2\text{--}4) \cdot 10^{-5}$ Торр диффузионным насосом. Полученная зависимость тока диода от числа импульсов генератора показала снижение тока диода всего на $\sim 9\%$ ($I_{N=100}=2,4$ кА и $I_{N=10k}=2,2$ кА). Временная задержка образования плазмы увеличивается с уменьшением скорости нарастания напряжения [103], что может быть полезно, поскольку электроны с низкой энергией не будут генерироваться на падающем фронте импульса напряжения. В работе [104], при скорости нарастания напряжения $\approx 5 \cdot 10^{12}$ В/с и единичных импульсах, с давлением в камере на уровне $(7,5\text{--}10) \cdot 10^{-5}$ Торр, лезвийный катод из углеродного волокна превзошел по ресурсу катоды из нержавеющей стали и вельвета.

Таким образом, основываясь на информации, полученной из литературных источников, можно сделать вывод, что взрывоэмиссионные катоды импульсных ускорителей изготавливаются из широкого списка материалов, имеют развитую поверхность и их эксплуатационные характеристики зависят, как от параметров генератора, формирующего импульс ускоряющего напряжения, так и от уровня давления и состава остаточной атмосферы в

вакуумной камере, геометрии и материала катода. Композитные катоды показали более стабильные характеристики и высокий ресурс по сравнению с металлическими. Катоды на основе углеродного волокна обладают схожими характеристиками с металлическими при скорости нарастания в десятки-сотни $\cdot 10^{12}$ В/с, а при скорости нарастания порядка 10^{12} В/с показали повышенный ресурс по сравнению с остальными материалами. Морфология поверхности углеродного волокна изменяет свойства таких катодов. Скорость нарастания напряжения существенно влияет на характеристики катодов: в среднем увеличивается импеданс диодов и уменьшается ресурс работы катода в непрерывном частотном режиме. Значительные изменения параметров катода при длительной непрерывной частотной работе существенно ограничивает внедрение ускорителей на основе таких катодов в промышленность. Этот эффект особенно явно выражен при скорости нарастания напряжения порядка 10^{12} В/с.

1.4 Анодный узел

Большая часть практических и научных применений ускорителей предполагается вывод пучка электронов в атмосферу, где будет происходить его взаимодействие с облучаемыми объектами [105–108]. В ускорителях прямого действия анод ускоряющего промежутка, как правило, является частью выпускного устройства. Эффективность применения всей ускорительной установки зависит от эффективности анодного узла, так как часть сгенерированных электронов, поглощаясь в конструктивных элементах узла, не только уменьшают полезную составляющую пучка, но и нагревают узел, что может привести к перегреву мембраны, спровоцировать нарушение её герметичности и выход установки из строя. Таким образом, при проектировании анодных узлов с выводом электронов необходимо обеспечить термическую и радиационную стойкость анода, механическую прочность герметизирующей фольги и поддерживающей её системы, с системой отвода тепловых потерь. Целесообразно анод делать сетчатой структуры с максимальной прозрачностью, обеспечивающей достаточную стойкость под действием импульсных электронных пучков, а мембраны из как можно более тонких и легких металлов [109], таких как алюминий, бериллий, титан и их сплавов для снижения доли поглощаемой энергии пучка. Рассмотрим более подробно основные конструкции, применяемых анодных узлов.

В работе [110], представлен сравнительный анализ материалов выводной фольги (Бериллий, Алюминий, Титан) и геометрии (круглое, прямоугольное), говорящий о наибольшей целесообразности применения титановых выводных окон прямоугольной конструкции. Чем меньше ширина окна, тем больше допустимый ток на единицу его длины, так как средний коэффициент теплопередачи увеличивается при уменьшении ширины окна. Однако, такая форма выводного окна не всегда может применяться на практике. Выводное окно [77] с самонесущей

выводной фольгой вогнутой формы (рисунок 22), для формирования ребра жесткости и уменьшения напряжения на фольге от давления внешней атмосферы применялось для облучения водных и воздушных потоков.

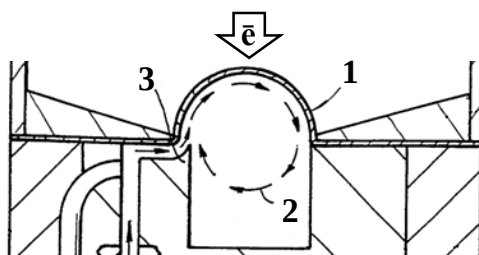


Рисунок 22 – Выводное окно с самонесущей фольгой: 1 – фольга; 2 – направление охлаждающего потока; 3 – реакционная камера

Выводное окно с охлаждаемой поддерживающей решеткой (рисунок 23) представлено в [111]. Конструкция безотказно проработала в течение сотен часов в линейном ускорителе выпрямительного типа с ускоряющим напряжением 150 – 280 кВ. Размеры окна данной конструкции могут достигать более 1300 мм в длину и 25-100 мм в ширину.

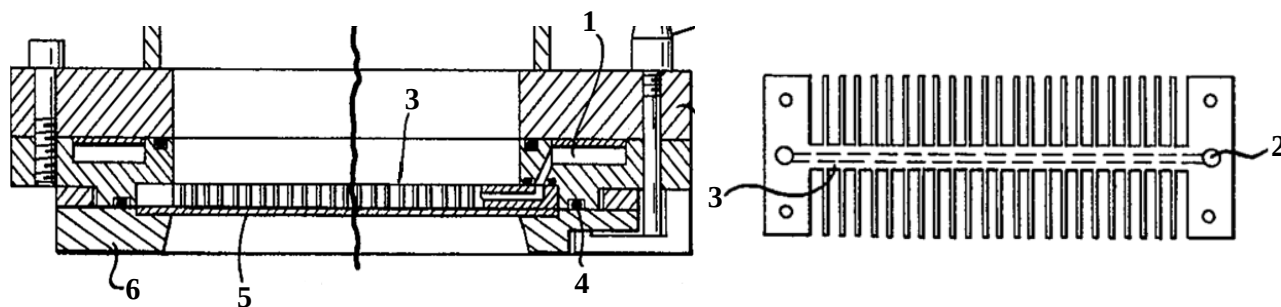


Рисунок 23 – Широкоопертурное выводящее окно с охлаждаемой поддерживающей решеткой: 1 – вода; 2 – канал с водой; 3 – поддерживающая решетка; 4 – уплотнение; 5 – выводная фольга; 6 – прижимной фланец

В качестве поддерживающей решетки также может применяться термостойкое углеродное волокно [112], окна с такими решетками известны как окна Ленарда (рисунок 24). Для того, чтобы избежать химических реакций между материалом сетки и фольгой, на вакуумной стороне фольги наносят барьерный слой, предпочтительно из оксида титана. Для сохранения круглой формы и натяжения нити углеродного волокна предварительно скручивается вдоль продольной оси.

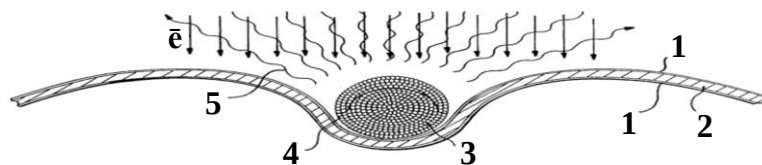


Рисунок 24 – Выводное окно с поддерживающими термостойкими углеродными стержнями:

1 – защитный слой; 2 – выводная фольга; 3 – нити углеродного волокна; 4 – направление скручивания; 5 – вторичное излучение

Для разделения тепловой нагрузки в выводных окнах могут применяться системы из нескольких поддерживающих решеток [113,114], термоизолированных друг от друга (рисунок). Это уменьшило тепловую нагрузку фольги, установленную на втором уровне решетки, несущей основную механическую нагрузку, за счет частичного перехвата тепловой мощности за счет прямой потери электронного пучка, который высвобождается на первом уровне, не испытывающем механической нагрузки. Окно тестировалось на ускорителе с постоянным напряжением, работающего в непрерывном режиме, при площади электронного пучка 500×400 мм, ускоряющем напряжении 185 кВ, давлении в вакуумной камере $5 \cdot 10^{-5}$ Торр и толщине фольги выходного окна 30 мкм (алюминиевый сплав АМг-2н) средняя плотность выводимого электронного пучка составила 80 мкА/см^2 , Опорная конструкция из хромистой бронзы с охлаждаемыми секциями, щелевой перфорацией и геометрической прозрачностью 62 %. Расчеты показали, что выходное устройство с двумя структурами позволяет первой структуре перехватывать примерно 78 % поглощаемой мощности и существенно снизить тепловую нагрузку на фольгу.

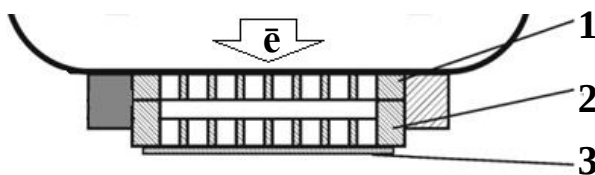


Рисунок 25 – Выводное окно с несколькими поддерживающими решетками: 1 – первая решетка; 2 – вторая решетка; 3 – фольга

Для повышения механической прочности фольги также применяются фольги, имеющие композитную структуру (рисунок). В качестве дополнительного слоя может выступать алмазное напыление [115] толщиной 5-8 мкм для защиты от коррозии и увеличения теплопроводности, такое алмазное покрытие выращивают путем осаждения из паровой фазы на внешнюю поверхность металлической фольги в вакууме при высокой температуре, слой обычно имеет толщину от 4-8 % толщины основной фольги и может увеличить теплопроводность выходного окна в 8 раз по сравнению с простой фольгой. В работах [116,117] представлено выводное окно

с самонесущей титановой фольгой (25 мкм) и напылением из TiN (0,8-1 мкм) со стороны атмосферы, такая фольга (Ti 25 мкм+TiN 1 мкм) по механическим свойствам была близка к фольге (Ti 50 мкм), при этом обладая меньшей толщиной позволила увеличить пропускную способность выводного окна. Однако, эксперименты с циклической откачкой вакуумной камеры показали частичное разрушение напылённого слоя под действием периодически повторяющейся разницы давлений и как следствие прорыв основной мембраны. В работе [118] в качестве выводной фольги предлагается применять фольгированную полиэфирную/лавсановую (Maylar/Kapton) пленку. Металлический слой обеспечивает передачу тепла, а полиэфирная пленка, которая в 3-4 раза прочнее металлического слоя, обеспечивает прочность и прозрачность для пучка электронов. Прочность фольги (25мкм Al) на разрыв увеличивается на 62 % при нанесении полиэфирной пленки. Однако, в работе [119] говорится о том, что подобная полимерная пленка теряет свои механические свойства после поглощенной дозы 1 ГГр.

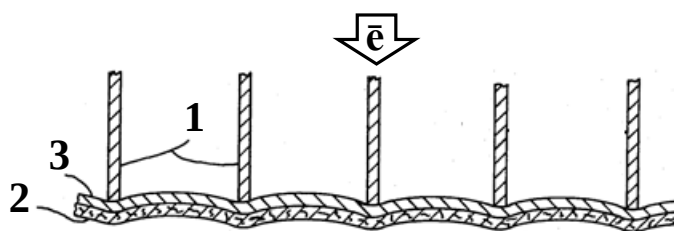


Рисунок 26 – Выводное окно с композитной фольгой: 1 – поддерживающая решетка; 2 – дополнительный слой; 3 – основная фольга

В работе [120] представлены результаты частотных испытаний выходного окна наносекундного ускорителя, выполняющего роль анода, с поддерживающей решеткой и без нее (рисунок 27а, б). В качестве разделительной мембраны (рисунок 27 - 1) применяли фольгу толщиной 50 мкм из титана (BT1-0). Анод диаметром 100 мм был изготовлен из нержавеющей стали в виде поддерживающей решетки в форме сетки прозрачностью 92% с шестигранными ячейками и ребрами толщиной 0,4 мм. В конструкции без поддерживающей (рисунок 27 б) решетки, роль анода выполняла разделительная мембрана и обеспечивала диаметр сечения выведенного пучка 65 мм. Конструкция с решеткой позволила вывести 51 % сгенерированного пучка при максимальной частоте 30 имп./с в течение 10^4 импульсов, а без решетки 32 % при максимальной частоте 50 имп./с в течение 10^5 импульсов, с водо-воздушным охлаждением фольги со стороны атмосферы. Поддерживающая решетка ограничивала максимальную частоту следования импульсов и ресурс выводной фольги, так как под действием электронного пучка происходил перегрев и деформация решетки с последующим разрушением фольги. Ресурсные испытания показали, что после 10^5 импульсов поверхность разделительной фольги покрывается

углеродной пленкой толщиной 0,5 мкм с вкраплениями материалов катода. Предположительно масляные пары диффузионной вакуумной системы являются источником углерода для образования пленки. Дegradaция эмиссионной поверхности катода и образование углеродной пленки привели к снижению энергии выведенного пучка на 21% (с 5,7 до 4,5 Дж/имп) за 10^5 импульсов.

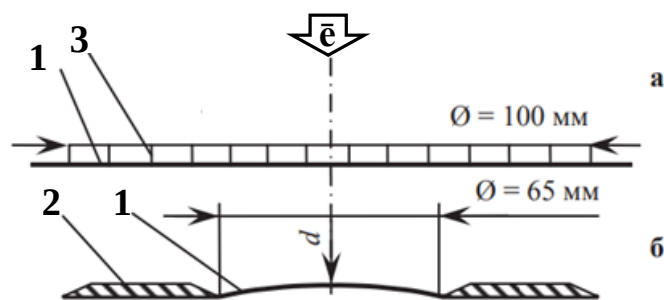


Рисунок 27 – Выводное окно с поддерживающей решеткой (а) и без неё (б): 1 – разделительная мембрана; 2 – опорный фланец; 3 – поддерживающая решетка (анод)

Кроме того, эффект старения анодной решетки показан в работе [121] на примере решетки из сплава Fe-Ni-Cr диаметром 210 мм и прозрачностью 95 %. Сгенерированный пучок расплавил поверхность анода в результате чего образовывались микровыступы направленные в сторону катода (рисунок 28). Появление этих микровыступов облегчает генерацию анодной плазмы во время последующих импульсов, что приводит к увеличению скорости нарастания тока пучка в диоде и переходу диода в режим короткого замыкания.

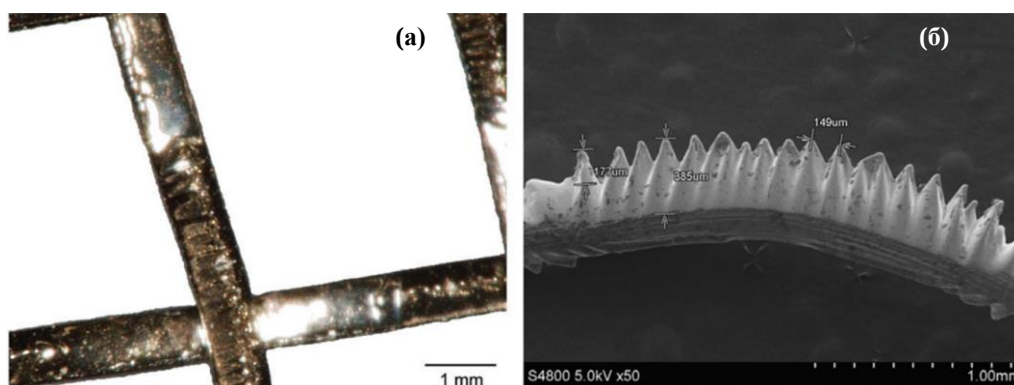


Рисунок 28 – Поверхность анодной сетки после генерации пучка

Материал анода и чистота его поверхности оказывают влияние на газовыделение [122], медный сетчатый анод показал меньшее значение выделяемых газов в сравнении с анодами из алюминия и нержавеющей стали. Более глубокая полировка анода (600→6000 зернистость наждачной бумаги) так же оказала положительное влияние на снижение выделяемых газов. При нагреве танталового анода [97] (900°K) в вакуумном электронном диоде увеличилась задержка

перехода в режим короткого замыкания на 100 нс, исследователи связывают это с очисткой поверхности анода от остаточной атмосферы и загрязнений.

Таким образом, в качестве выходного окна вакуумных электронных диодов традиционно применяются конструкции с металлическими самонесущими или с поддерживающими решетками и уплотнительные мембраны. Среди металлических фольг наиболее часто применяются титановые и алюминиевые с толщиной от 10 до 100 мкм. Композитные выводные мембраны встречаются реже, так как они сложны в производстве, а полимерные материалы, применяемые в их конструкциях, требуют дополнительной защиты от радиационной и тепловой нагрузки. Для уменьшения влияния тепловых эффектов применяют самонесущие мембраны, чтобы избежать перегревов в местах контакта фольги и поддерживающей решетки, либо конструкции с несколькими поддерживающими решетками для разделения тепловой нагрузки между несколькими элементами. Кроме металлических опорных конструкций, использующихся для поддержки мембран, также могут применяться другие материалы такие, как углеродное волокно. Тепло, рассеиваемое в выходном окне, отводится с помощью газового и водяного охлаждения, как мембраны, так и поддерживающей конструкции окна. Остаточная атмосфера в вакуумной камере, распыление материала катода и масляная откачка способствует образования пленок на выводных мембранах, уменьшающих прозрачность и теплопроводность мембраны. Аноды и поддерживающие решетки под действием импульсного электронного пучка подвержены эрозии, влияющей как на состояние остаточной атмосферы в камере, так и на параметры диода. Вакуумная поверхность мембран выводных окон с самонесущей фольгой подвержена электроразрядным процессам, приводящим к разрушению мембраны. Разработка анодного узла с выводом импульсного электронного пучка в атмосферу, обеспечивающего достаточный ресурс и высокую эффективность вывода пучка является одной из важнейших задач для реализации практических применений.

1.5 Применение ускорителей наносекундной и субмикросекундной длительности

В настоящий момент радиационные технологии широко применяются для обеззараживания воды, пищевых продуктов, косметики, лекарств, а также других объектов, нетерпящих термического или химического воздействия. Изотопные источники ионизирующего излучения или высоковольтные ускорители электронов позволяют обеззараживать объекты в уже готовых упаковках, за счет проникающего действия генерируемого излучения. Изотопные источники для достижения стерилизующих доз (до 10Мрад/100 кГр) [7] требуют обработки порядка 4-8 ч, что не всегда удобно. В свою очередь, ускорительные установки позволяют сократить время обработки. Кроме того, при отключении электрического питания останавливается генерация ионизирующего излучения, что более безопасно в сравнении с

изотопными источниками. Применение ускорителей высоких энергий позволяет достигать высокой скорости обработки, но создается опасность активации облучаемых объектов. В обоих случаях большие габариты источников и необходимость дорогостоящей и громоздкой защиты для персонала являются существенными недостатками.

В тоже время, для стерилизации во многих случаях достаточно поверхностной обработки с обеспечением высокой скорости обработки. В таких условиях достаточно использовать ускорители электронов с относительно низкими (до 500 кэВ) энергиями, что упрощает решение вопросов, связанных с габаритами источников и созданием защиты для персонала. Импульсный характер ускоряющего напряжения позволяет уменьшить габариты изоляторов высоковольтных ускорителей. В связи с выше изложенным, актуальным и возможным является внедрение в существующие производственные процессы, требующие стерилизации, малогабаритных импульсных ускорителей на основе взрывной эмиссии электронов, позволяющих создать малогабаритные источники электронных пучков [123].

Компактный источник электронов [124] на основе генератора от рентгеновского аппарата МИРА-3Д, с нагрузкой в виде электронных трубок ИМАЗ-150Э создавал бактерицидный эффект в слое 0,5 мм водозэквивалентной среды (поглощенная доза 0,2 Мрад/имп). Местной биологической защиты на основе свинца с толщиной стенки 3,5 см было достаточно для работы персонала. Установка применялась для стерилизации различного медицинского инструмента, как в полиэтиленовой упаковке (толщиной 50 мкм за 2-3 с), так и без (за 1-2 с). Было обнаружено, что обеззараживающий эффект достигается на поверхностях, не подвергающихся прямому воздействию электронного пучка, хотя время обработки увеличилось до 5-20 с, что говорит о наличии продуктов радиолиза воздуха вокруг облучаемых объектов, обладающих обеззараживающим действием.

На ускорителях серии Синус [24,25] в работе [125] изучали разложение Азида серебра под действием наносекундных пучков. Было установлено, что полезный выход металла зависит от мощности дозы излучения, причем процессы, происходящие в образцах при импульсном электронном воздействии и при постоянном рентгеновском, различаются. Также с помощью таких ускорителей проводили исследования по разработке технологического процесса радиационной сушки лаковых покрытий на древесине [25]. В [126] описаны способы применения таких ускорителей для поверхностной обработки тетрапаков; упаковки (бумажной, металлической, полимерной); одноразовых медицинских инструментов; дезинсекции и дезинфекции сухих сыпучих материалов. В [127] осуществлялась стерилизация раневых повязок (толщина пакетов 0,6 мм). Стерилизующие поглощенные дозы для раневых повязок «Спанлейс»

составляли ≈ 17 кГр, а для повязок из обеззоленного фильтра ≈ 13 кГр. При этом облучение электронным пучком никак не повлияло на сорбционные свойства повязок.

С помощью ускорителя Синус-150 показано стимулирующее действие малых доз наносекундного импульсно-периодического рентгеновского излучения на семена пшеницы [128] (валовой сбор зерна с единичной площади превысил контрольный показатель на 10,5 %). Импульсно-периодическое рентгеновское излучение подавляет пролиферацию опухолевых клеток [129] при дозах, которые на несколько порядков меньше доз, используемых в лучевой терапии опухолей.

Компактные ускорители серии РАДАН [30,46] широко применяются в науке и на практике [28]: формирование наносекундных и субнаносекундных импульсов напряжения и сверхширокополосных радиочастотных импульсов, генерация мощных СВЧ, рентгенография, радиационная физика, химия и биология.

Ускорителем Астра-М [38] проводилось облучение нанопорошков железа в воздушной среде для повышения термоокислительной стабильности [130], нанопорошков алюминия в воздушной среде для повышения теплового эффекта [131], нефтяного сырья для изменения его реологических характеристик [132,133], обработка сточных вод [134] в составе очистного комплекса [135], очистка водных растворов от фенола [136] и метанола [137], поверхностная обработка зерна пшеницы электронным пучком [138,139] и его объемная обработка [140,141] с помощью конвертора рентгеновского излучения.

Ускоритель ТЭУ-500 [32,33] применялся для плазмохимического получения [142,143] и модификации нанопорошков [144], переработки гексофторида урана [145], очистки дымовых газов [146] и обработки водных растворов [147].

Ускорители серии УРТ также применяются для радиационных технологий. Ускоритель УРТ-0,2 [6,49] применялся для обеззараживания костной муки [148], стерильные результаты были получены уже при частоте 50 имп./с. Также этот ускоритель в режиме генерации тормозного рентгеновского излучения может применяться для радиационной обработки крови [149], создавая на расстоянии 5 см дозу 70,5 мкГр/имп, для набора требуемой дозы 30 Гр. Ускорителем УРТ-0.5 [6,48] проводилась стерилизация меланжа [150,151] в бескислородной атмосфере при дозах не более 50 кГр. Также этот ускоритель может применяться для обработки молочной продукции [152,153], поверхностной стерилизации пшеницы [154], куриных яиц [155–159] и мяса [160]. На ускорителе УРТ-1 [41] проводилась обработка комбикорма птиц [161], стерилизующий эффект достигнут при дозе 15 кГр. Ранее предложенная [124] концепция радиационно-химической стерилизации также была подтверждена [15], заключающаяся в том, что обеззараживающий эффект оказывает не только электронный пучок, но и продукты

радиолиза образующиеся, как внутри объекта обеззараживания, так и в атмосфере вокруг него. Например, таким продуктом радиолиза является озон [22], образующийся при облучении кислорода в воздухе. Эта технология показала свою эффективность для поверхностной стерилизации и ее вполне можно применять для объемной стерилизации пористых или сыпучих мелкодисперсных материалов.

Влияние мощности дозы ионизирующего излучения на бактерицидный эффект описано в литературных источниках неоднозначно. С одной стороны, чем больше мощность дозы, тем больше биологический ответ [162], при этом общая доза может быть существенно меньше. А с другой стороны, в [163] для импульсов длительностью 5 мкс нет разницы в облучении при 5 имп./с или 50 имп./с если обеспечивается одинаковая интегральная доза это говорит о том, что все процессы происходящие в образце заканчиваются спустя максимум 20 мс после воздействующего импульса.

Оценка эффекта обеззараживания, как правило, проводится отдельно для конкретных микроорганизмов ввиду сложности учёта эффекта межвидовой или межродовой конкуренции в сложных образцах. В качестве примера рассмотрим один из распространенных микроорганизмов. *Escherichia coli* (*E. Coli*) или кишечная палочка - это прямые палочки, размерами 1,1-1,5×2,0-6,0 мкм, относящиеся к факультативным анаэробам, обладающим и дыхательным и бродильным типами метаболизма с оптимальной температурой для жизни 37°C. У гомойотермных животных, включая человека, присутствуют как нормальная флора в нижнем отделе кишечника. Некоторые штаммы *E.coli*, могут вызывать желудочно-кишечные заболевания и служат основным возбудителем инфекций мочевых путей и внутрибольничных инфекций, таких как септицемия и менингит.

В литературе присутствуют примеры радиационной стерилизации *E. Coli*. В [164] радиоинактивация *E. Coli* на 4 порядка была достигнута при дозе 0,25 кГр от источника гамма излучения “Gammacell 220” Кобальт-60 мощностью 0,96 Гр/с (слой половинного ослабления 110 мм, облучались герметичные стеклянные колбы 50 мл). Эти данные подтверждаются так же и в работе [165] для источника Кобальт-60 мощностью 0,5-0,67 Гр/с, кроме того, радиоинактивация *E. Coli* на 8 порядков была достигнута при дозе 0,625 кГр. В работе [166] установки мощностью 0,83 Гр/сек. радиоинактивация *E. Coli* на 5 порядков была достигнута при дозе 20 кГр для неочищенной воды и 2 кГр для механически очищенной воды.

В работах [167,168] для источников электронов с постоянной энергетикой (единицы МэВ) радиоинактивация *E. Coli* на 8 порядков достигается при дозе 3,2 кГр [169]. Представленные значения в зависимости от условий облучения и состава облучаемой жидкости могут быть увеличены на порядок [170]. Возраст культуры, питательная среда, температура при

выращивании, температура при облучении влияют на радиочувствительность микроорганизмов и в зависимости от условий она может отличаться в разы [7]. Изученность и доступность *E. Coli* позволяют использовать данную культуру как объект сравнения эффекта обеззараживания при воздействии различных факторов.

Наносекундные высоковольтные ускорители на основе взрывоэмиссионных катодов имеют широкий спектр применений за счет компактности и высокой импульсной мощности дозы, что снижает требования к технике безопасности по сравнению с традиционными источниками ионизирующего излучения. Требуется дальнейшее изучение влияния мощности дозы субмикросекундного пучка на обеззараживающий эффект. Существующая концепция механизма радиационно-химического обеззараживания позволяет предположить возможность достижения эффекта без облучения всего объема, обрабатываемого образца. В литературных источниках отсутствуют экспериментальные подтверждения этому при обеззараживании водных растворов.

Выводы

На основе представленных данных можно сделать вывод о том, что характеристики и устройство диодов наносекундных ускорителей электронов при функциональной схожести, зависят, кроме как от параметров импульса прикладываемого напряжения, от направления использования генерируемого пучка. Ресурс диода ускорителя, в том числе, определяется скоростью нарастания прикладываемого напряжения.

Влияние характеристик каждого элемента конструкции диода на его ресурс может быть изучено при высокой степени повторяемости параметров выходных импульсов генератора.

При проектировании вакуумного изолятора диодов частотных наносекундных и субмикросекундных ускорителей, для обеспечения электрической прочности и ресурса, необходимо учитывать следующие факторы, влияющие на электрическую прочность изолятора: секционирование изолятора, с принудительным равномерным распределением напряжения по градиентным кольцам; экранировка поверхности диэлектрика в вакууме от первичных и вторичных электронов и электромагнитного излучения, генерируемых в диоде снижает вероятность деградации поверхности диэлектрика; угол наклона изолирующей поверхности диэлектрика к градиентным кольцам $\sim 45^\circ$ обеспечивает максимальную электрическую прочность секции изолятора; размеры и материал диэлектрических частей, а также вакуумные зазоры должны обеспечивать необходимую электрическую прочность и максимальную скорость откачивания остаточной атмосферы в диоде.

При выборе взрывоэмиссионного катода для частотных наносекундных и субмикросекундных ускорителей необходимо обращать внимание на количество эмиссионных центров, стабильность параметров при высокой частоте следования импульсов и ресурс. Катоды на основе углеродного волокна показали повышенный ресурс по сравнению с остальными, при скорости нарастания порядка 10^{12} В/с, поэтому необходимо сравнить их традиционными материалами.

Анодные узлы диодов частотных импульсных ускорителей, конструктивно состоящие из анода и выводной фольги не имеющих теплового контакта, для защиты мембраны от электроразрядных эффектов имеют большой ресурс. Медь в качестве материала для анодной сети обладает достаточной абляционной стойкостью, и имеет наименьшее значение выделяемых газов, а нагрев во время частотной работы способствует полировке и очистке поверхности, стабилизируя плазменные процессы на аноде. Для уменьшения влияния тепловых эффектов применяют самонесущие мембраны, чтобы избежать перегревов в местах контакта фольги и поддерживающей решетки, либо конструкции с несколькими поддерживающими решетками для деления тепловой нагрузки между несколькими элементами. Среди металлических фольг наиболее часто применяются доступные титановые и алюминиевые, либо их сплавы, с толщиной от 10 до 100 мкм. Тепло, рассеиваемое в анодном узле, отводится с помощью газового и/или водяного охлаждения как анода, так и выводного окна. Применение без масляных вакуумных систем обеспечивает уменьшение образования нагара на элементах анодного узла.

Глава 2. Экспериментальный стенд

2.1 Частотный импульсный ускоритель Астра-М

Импульсный ускоритель Астра-М [38] предназначен для генерации и вывода электронного пучка в атмосферу, а также может применяться для генерации тормозного рентгеновского излучения (р 29).



а)

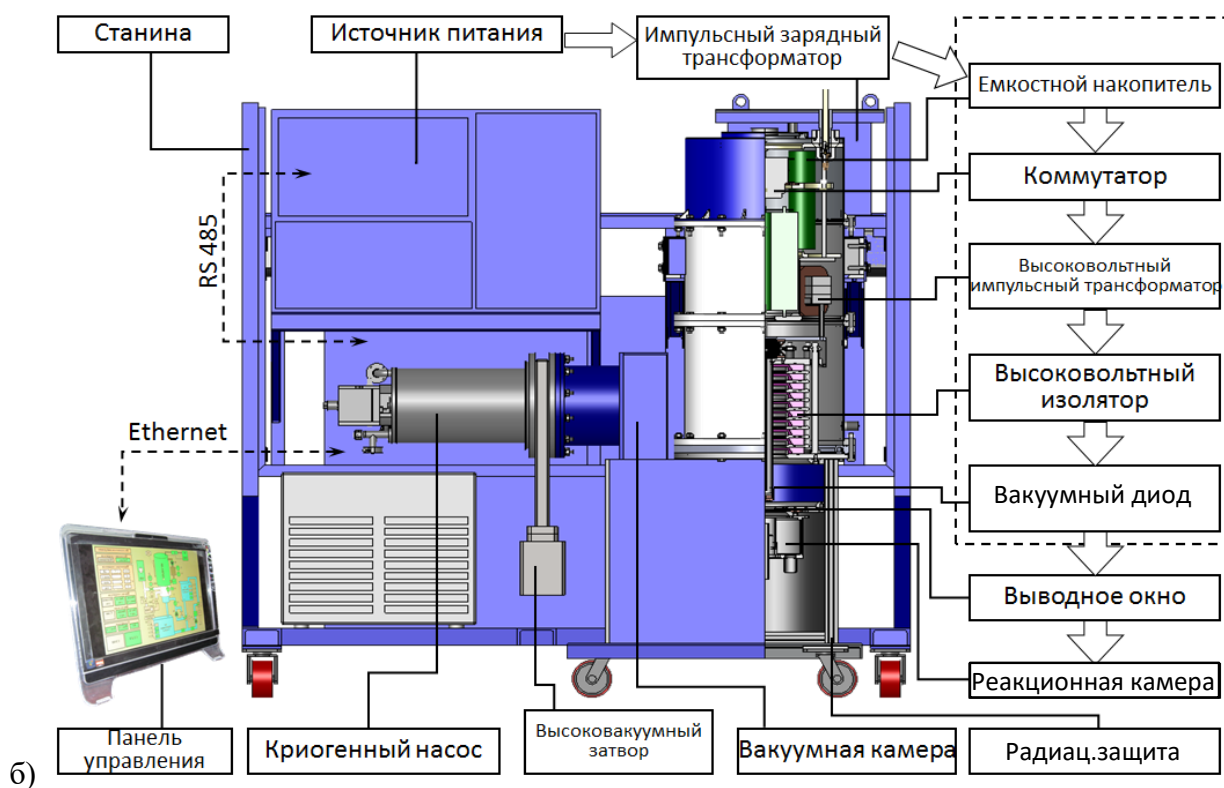


Рисунок 29 – Ускоритель Астра-М: а – внешний вид; б – функциональная схема

Технические характеристики: ускоряющее напряжение до 450 кВ; длительность импульса ускоряющего напряжения до 350 нс; длительность импульса электронного тока, выведенного в атмосферу до 150 нс; энергия электронного пучка, выведенного в атмосферу до 10 Дж при частоте до 40 имп./с. Трансформаторная схема генератора импульсов ускоряющего напряжения обеспечивает импеданс порядка 250 Ом, что необходимо учитывать при настройке диода и подборе катода для частотных режимов работы.

Ускоритель является экспериментальным стендом для испытания различных модификаций узлов диода, разработанных по результатам литературного обзора.

Электрическая схема генератора импульсов (рисунок 30) продолжает философию генерации импульсов ускоряющего напряжения, описанную в [171].

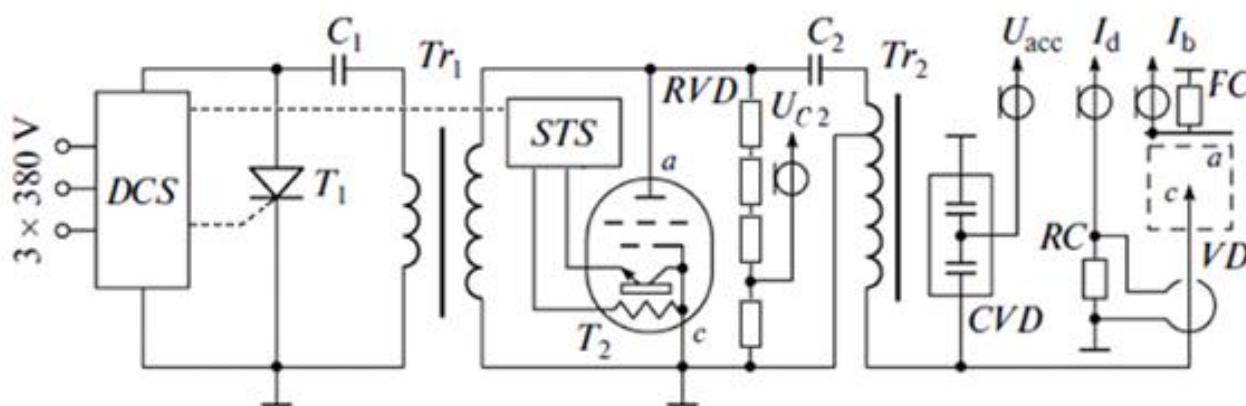


Рисунок 30 – Электрическая схема ускорителя: источник постоянного напряжения (DCS); первичный накопитель (C_1); тиристор (T_1); зарядный импульсный трансформатор (Tr_1); резистивный делитель напряжения (RVD); высоковольтный разрядник (T_2) с системой запуска (STS); высоковольтный накопитель (C_2); высоковольтный импульсный автотрансформатор (Tr_2); катод (c) и анод (a) вакуумного электронного диода (VD); емкостной делитель напряжения (CVD) для контроля ускоряющего напряжения (U_{acc}); пояс Роговского (RC) для контроля тока в диоде (I_d); цилиндр Фарадея (FC) для контроля электронного тока, выведенного в атмосферу (I_b)

Источником постоянного напряжения (PS) [172] заряжается первичный емкостной накопитель C_1 до установленного значения напряжения ($\leq 2,5$ кВ). Срабатывание полупроводникового коммутатора (T_1) запускает процесс передачи энергии из C_1 через импульсный зарядный трансформатор Tr_1 (коэффициент трансформации 20) в высоковольтный емкостной накопитель C_2 (≤ 40 кВ). Высоковольтный коммутатор (T_2) срабатывает в момент минимального значения зарядного тока I_{C2} и максимального значения на емкости C_2 [173]. При коммутации T_2 энергия из C_2 через высоковольтный импульсный трансформатор Tr_2

(коэффициент трансформации 10) передаётся в вакуумный электронный диод (VD) для преобразования в энергию электронного пучка.

В качестве высоковольтного коммутатора T_2 применялись псевдоискровые разрядники типа ТДИ и ТПИ [174,175]. В качестве источника питания для генераторов водорода разрядников использовали лабораторные блоки питания, стабилизированные по току или напряжению [176]. Батареи емкостных накопителей C_1 и C_2 выполнены из пленочных конденсаторов с характеристиками 3кВ – 20 мкФ и 40кВ – 47 нФ, соответственно [177]. Управление вспомогательным оборудованием также может осуществляться с помощью компьютеризированной панели оператора.

Для обеспечения рабочего давления (10^{-5} Торр) в камере вакуумного электронного диода применяются криогенный высоковакуумный [178] или масляный диффузионный [179] насосы. Контроль давления остаточной атмосферы производится широкодиапазонным вакуумметром [180].

2.2 Диагностическое оборудование

Контроль функционирования схемы осуществляется по показаниям датчиков напряжения и тока, размещение которых указано на рисунке 30. Для получения кривых тока и напряжения использовали осциллограф (200 МГц) [181]. Для регистрации микросекундных импульсов зарядного напряжения C_2 , применялся омический делитель напряжения (RVD) изготовленный из низкоиндуктивных графитовых резисторов [182,183] с разрешающей способностью не хуже 1 мкс. Наносекундные сигналы измерялись с разрешающей способностью не хуже 5 нс. Для мониторинга ускоряющего напряжения ($U_{\text{уск}}$) применялся делитель напряжения емкостного типа (CVD) [184]. Регистрацию полного тока диода ($I_{\text{полн}}$) производили с помощью трансформатора тока – пояса Роговского (RC) [185] с обратным витком. Цилиндр Фарадея (FC) [186] использовали для регистрации выведенного тока пучка ($I_{\text{выв}}$). Регистрация распределения напряжения по секциям секционированного вакуумного изолятора осуществлялась жидкостным резистивно-емкостным делителем [187,188] и промышленно выпускаемым делителем [189] в режиме регистрации однократных импульсов высокого напряжения и коротких серий импульсов.

Энергию электронного пучка выведенного за анод оценивали калориметром полного поглощения, аналогичным [190]. Секционированный калориметр полного поглощения [191] с тепловизором [192] и дозиметрические пленки [193] использовали для регистрации отпечатков электронного пучка и оценки плотности энергии в пучке. Оценка состояния поверхности анодного узла осуществлялась Оже-спектрометром [194]. Измерение емкостей, индуктивностей и сопротивления проводили с помощью измерителя иммитанса [195].

Подготовка и сопровождение исследований по микробиологии проводилась сотрудниками кафедры Биотехнологии и Органической Химии Томского Политехнического Университета в лице аспиранта Куриловой Анастасии Александровны под руководством Чубик Марианны Валериановны.

2.3 Стабилизация характеристик генератора

Для адекватного сравнения получаемых результатов по работе различных узлов и модификаций диода ускорителя необходима стабильная работа высоковольтного генератора. В простой трансформаторной схеме формирования импульсов ускоряющего напряжения электронного ускорителя Астра-М [196] высокая частота повторения импульсов генератора (до 40 имп./с) определяется возможностями применяемого высоковольтного коммутатора – псевдоискрового разрядника ТДИ1-100к/45ПД [197]. Для управления коммутатором использовали оригинальную схему формирования импульсов запуска с детектированием заряда коммутируемой ёмкости [173]. Схема позволяла запускать коммутатор с частотой повторения до 100 имп./с и потребляла 1 Дж для каждого запуска от энергии (72 Дж), запасенной в коммутируемом ёмкостном накопителе при разбросе напряжения запуска разрядника $\sim 1.4\%$. Тестовые испытания при импульсной зарядке коммутируемой ёмкости псевдоискрового коммутатора показали возможность его запуска с хорошей повторяемостью (напряжение запуска разрядника $\sim 1\%$) в режиме самопробоя при определённых настройках генераторов водорода. Более простые, следовательно, потенциально более надёжные и дешёвые генераторы перспективны для промышленного применения, а данная особенность работы коммутатора позволяет исключить использование каких-либо дополнительных устройств управления в генераторе. Стабильности запуска псевдоспарка в режиме самопробоя также исследовалась в генераторе высоковольтных импульсов ускорителя Астра-М при энергозапасе 36 Дж с коммутатором марки ТПИ1-10к/50.

Изменяя значения токов подогревателей генераторов водорода от 1,75 А до 2,25 А с шагом 0,05 А, получили зависимости напряжения срабатывания коммутатора от мощности, выделяемой в подогревателях. Мощность подогревателей определялась по значениям токов и напряжений источников питания генераторов водорода. Для каждого значения токов подогревателей фиксировалось 10 значений напряжения коммутации ёмкости C_2 (рисунок 31) при частоте повторения 1 имп./с.

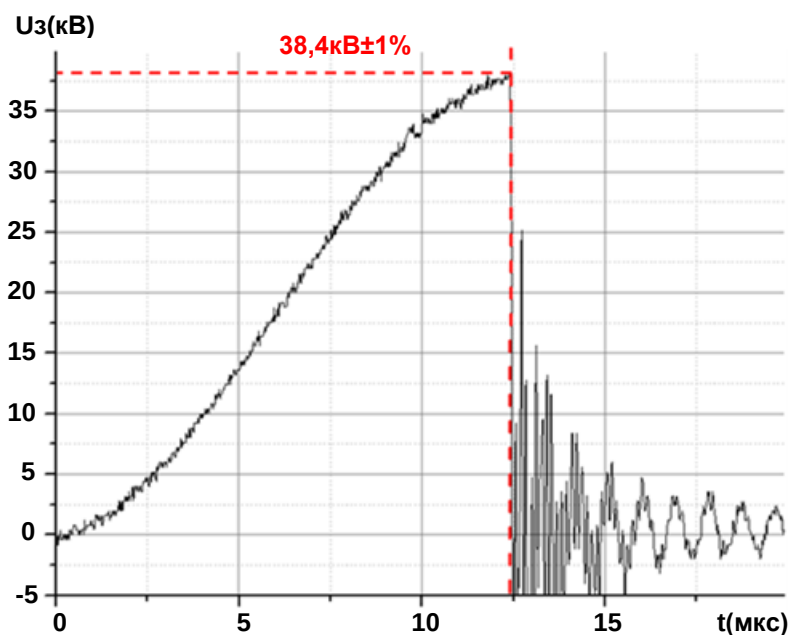


Рисунок 31 – Кривая напряжения срабатывания (U_3) от времени (t) с указанием момента срабатывания псевдоискрового коммутатора

В ходе подготовки к серии экспериментов обнаружили, что установившиеся значения мощностей источников питания генераторов водорода взаимозависимы. Изменения тока накала одного из них приводят к изменению режима работы другого (рисунок 32а). После проведения серии экспериментов в заданном диапазоне токов накала генераторов водорода получено, что максимальное значение напряжения срабатывания коммутатора при скорости роста зарядного напряжения $3,3\text{ кВ/мкс}$ составляет $38,4\text{ кВ}$ (рисунок 32б).

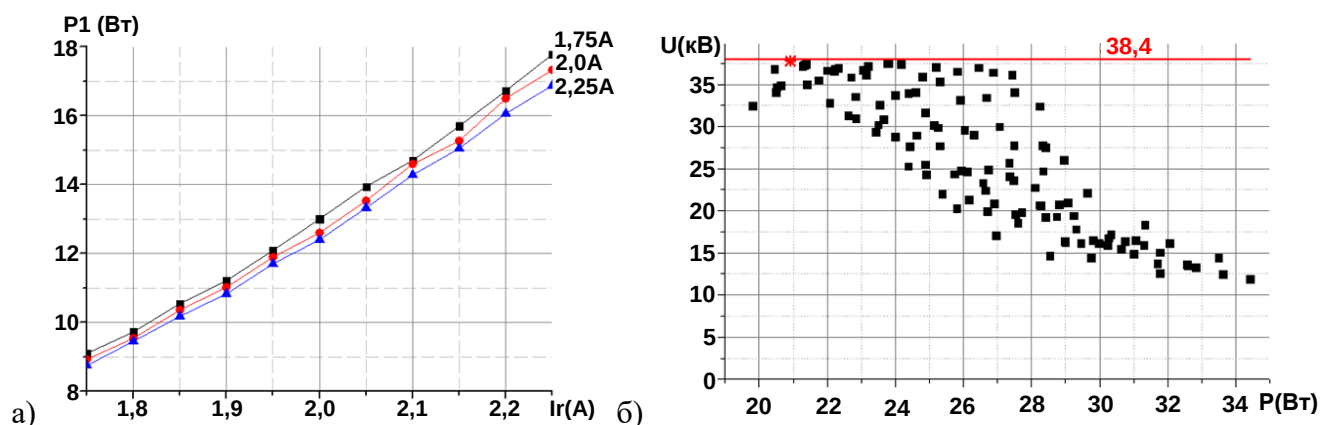


Рисунок 32 – Настройка псевдоискрового разрядника: а) зависимость мощности первого генератора водорода P_1 от тока подогревателя второго; б) зависимость напряжения срабатывания коммутатора U от суммарной мощности подогревателей генераторов водорода P

Анализ экспериментальных значений напряжения срабатывания коммутатора показал, что при увеличении мощности, выделяемой в генераторах водорода, напряжение срабатывания

уменьшается. При этом, разброс напряжений срабатывания увеличивался в диапазоне суммарной мощности подогревателей от 22 до 30 Вт. Наиболее приемлемым для дальнейшей работы был выбран режим при суммарной мощности подогревателей ~21 Вт при напряжении срабатывания $U_3=37,8$ кВ, что составляет 98,4 % от максимального значения зарядного напряжения емкости С2 (38,4 кВ). Разброс напряжения срабатывания при этом составил менее 1 % за 10 импульсов, что близко значениям для систем коммутации, использующих устройства формирования управляющих импульсов [198].

Дальнейшие испытания проводились при частоте повторения 10 имп./с в течение 10^5 последовательных импульсов. Изменений в режиме работы коммутатора не наблюдалось. Коммутатор испытывался также при краткосрочных (100-150 с) включениях генератора с частотой до 100 имп./с. Дальнейшее увеличение частоты повторения импульсов ограничивалось возможностями генератора, не связанными с псевдоискровым коммутатором, а именно мощностью источника первичного электропитания.

Использование псевдоискрового коммутатора в режиме самопробоя позволило исключить из схемы генератора цепи запуска коммутатора. Кроме того, канал синхронизации запуска коммутатора с источником зарядного напряжения теряет свою функцию, уменьшая количество переменных для настройки работы генератора в интерфейсе управления системой.

Выводы

Получена зависимость напряжения срабатывания псевдоискрового коммутатора ТПИ1-10к/50 от мощности подогревателей водорода при коммутации емкостного накопителя энергии в режиме самопробоя при скорости роста зарядного напряжения 3,3 кВ/мкс. Найден режим работы подогревателей, при котором напряжение срабатывания составило более 98% от максимального при разбросе напряжения срабатывания менее 1 %. Стабильность запуска экспериментально подтверждена в течение 10^5 импульсов. Обнаруженный режим работы коммутатора позволил отказаться от использования системы формирования управляющих импульсов, что увеличивает надёжность и эффективность работы ускорителя в целом.

Глава 3. Высоковольтный секционированный изолятор вакуумного электронного диода

Проведенный литературный обзор и опыт эксплуатации выявил основные недостатки существующих конструкций высоковольтных проходных изоляторов для импульсов наносекундной и субмикросекундной длительности. В главе представлены результаты разработки и испытаний секционного вакуумного изолятора с индуцированным распределением напряжения. Распределение напряжения по градиентным кольцам осуществлялось с помощью гальванической связи с витками высоковольтного импульсного трансформатора.

3.1 Конструкция секционированного изолятора

Цилиндрическая конструкция высоковольтного секционного изолятора [9,47,73] (рисунок 33), традиционно используемая в генераторах высоковольтных импульсов, имеет постоянное значение (R) зазора между градиентными кольцами изолятора и высоковольтным электродом. Как следствие, при уменьшении потенциала градиентного кольца напряженность электрического поля в изоляционном промежутке возрастает и достигает максимума между заземленным основанием изолятора и высоковольтным электродом (рисунок 34 а, синие кружки 0). Это отрицательно сказывается на сроке службы диэлектрической части изолятора, так как высокая напряженность электрических полей стимулирует эмиссию электронов и их ускорение в вакуумных промежутках, с последующим попаданием на поверхности диэлектрика, что приводит к его деградации. Для уменьшения напряженности электрического поля необходимо увеличить зазор (R) между электродами, а это увеличивает габаритные размеры изолятора и стоимость его изготовления. Кроме того, еще одним вопросом, требующим внимания при разработке вакуумного изолятора импульсного ускорителя электронов, является оптимизация конструкции в части улучшения условий откачки остаточной атмосферы из объема изолятора в вакуумной камере. Этот вопрос актуален для частотных режимов работы ускорителя и, прежде всего, для ускорителей с инжекцией рабочего вещества в объем вакуумного электронного диода [199–202].

Один из способов решения вышеуказанных проблем с использованием конической компоновки секционированного изолятора представлен в [171]. Диаметр участков в рассматриваемой конструкции высоковольтного секционированного изолятора увеличивается с увеличением напряжения между высоковольтным электродом и градиентными кольцами (рисунок 33). Такое расположение при сравнимых внешних размерах с цилиндрическим изолятором и равномерном распределении напряжения на градиентных кольцах обеспечивает более низкое значение напряженности электрического поля между градиентными кольцами и высоковольтным электродом. Экспериментальные данные о неравномерном распределении напряжения по проходному изолятору цилиндрического сечения из-за конструктивных емкостей

между высоковольтным электродом, градиентными кольцами и заземленным корпусом [73] показывают необходимость использования дополнительных способов обеспечения равномерного распределения напряжения, примеры описаны в главе 1.2.

Для анализа различий между цилиндрической и конической конструкциями проходного изолятора предлагается учитывать угол наклона конуса изолятора (рисунок 33). Угол для цилиндрической конструкции равен 90° . Для конической конструкции α соответствует случаю, когда напряженность поля в зазорах одинакова для каждого градиентного кольца. Это достигается прямо пропорциональным увеличением зазора между градиентными кольцами и высоковольтным электродом при увеличении напряжения градиентных колец:

$$U_i/U_{(i-1)} = R_i/R_{(i-1)} = E_{ave} = \text{const}, \quad (2)$$

где U_i – напряженность градиентного кольца; R_i – зазор между высоковольтным электродом и градиентными кольцами; i – номер градиентного кольца (рисунок 33); E_{ave} – средняя напряженность электрического поля.

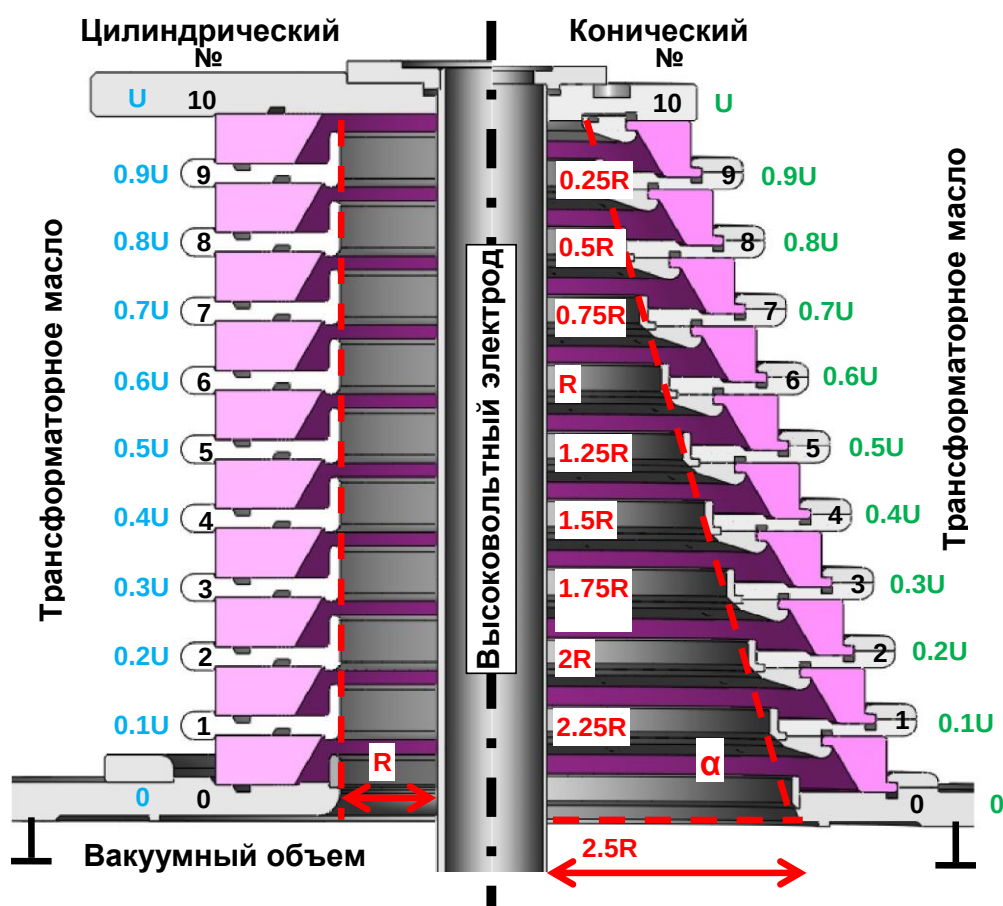


Рисунок 33 – Конструкции цилиндрического и конического проходного изолятора ($\alpha = 72,5^\circ$; нумерация градиентных колец – черный цвет; градиентные кольца потенциал – синий и зеленый цвет; зазор между градиентными кольцами и высоковольтным электродом – красный цвет)

Результаты оценки средней напряженности электрического поля между высоковольтным электродом и градиентными кольцами рассматриваемых конструкций изоляторов (рисунок 33) представлены на рисунке 34а. Оценка условий откачки остаточной атмосферы (10^{-4} Торр) из объема изолятора в вакуумной камере для рассматриваемых конструкций (рисунок 33) представлена на рисунке 34б, и проводилась согласно соотношениям для молекулярной откачки газов, описанным в [203]:

$$T=V/C, \quad (3)$$

где T – время откачивания секции до 10^{-4} Торр; V – откачиваемый объем секции; C – проводимость молекулярного потока.

Анализ геометрии конструкции конического изолятора показывает существенное влияние угла α на напряженность электрического поля в вакуумных промежутках и условия откачки остаточной атмосферы (для нашей конструкции $\alpha = 72,5^\circ$, $>\alpha = 75^\circ$, $<\alpha = 71,5^\circ$). Наименьшая напряженность электрического поля и наилучшие условия откачки остаточной атмосферы в вакуумной части изолятора достигаются при конической конструкции изолятора $>\alpha$, поэтому на практике целесообразнее использовать этот тип изоляторов.

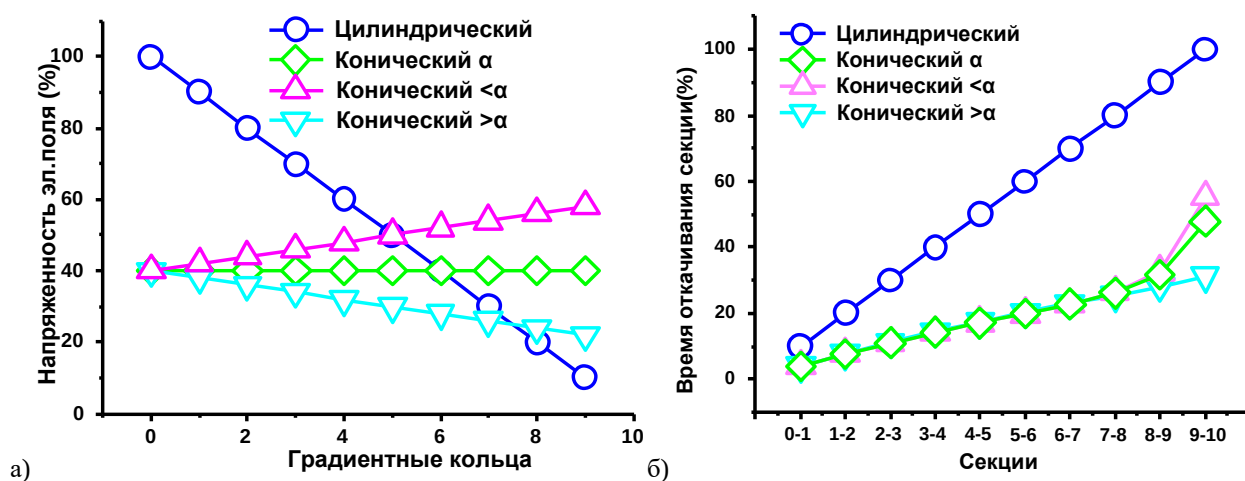


Рисунок 34 – Сравнение изоляторов: а) средняя напряженность электрического поля между высоковольтным электродом и градиентными кольцами; б) время откачивания секции до 10^{-4} Торр

3.2 Испытания способа распределения напряжения по секционированному изолятору

Конструкция и пропорции рассматриваемого конического изолятора показаны на рисунке 35 и подробно описаны в [171]. Диаметр градиентных колец увеличивался от наибольшего напряжения (рисунок 34 поз. 10) к заземленной части (рисунок 34 поз. 0), что обеспечивало максимальное удаление высоковольтного электрода от заземленной части. Каждая ступень имеет свою систему уплотнения и затяжки, что обеспечивает возможность демонтажа

любой ступени отдельно для замены или ремонта. Секции центрированы относительно друг друга, поэтому точность сборки зависит только от точности изготовления. Процедура сборки начинается от заземленной части изолятора по направлению к высоковольтной части. Вакуумный зазор между двумя соседними градиентными кольцами (рисунок 34) выбирают таким образом, чтобы диэлектрическая прочность вакуумного зазора была меньше напряжения поверхностного пробоя изолятора при возникновении перенапряжения на участке. В этом варианте время откачки для секции по соотношению (3), максимально удалённой от высоковакуумного насоса (рисунок 34б поз. 9-10) в три раза меньше, чем для цилиндрического исполнения.

Генератор импульсов напряжения, используемый для проверки проходного изолятора, подобен описанному в [39]. Материал изолятора был выбран исходя из условий доступности и стоимости изготовления, обеспечивающего ресурс, достаточный для испытаний описываемой системы распределения напряжения. Гальваническая связь витков и градиентных колец создана для передачи потенциала витков высоковольтного импульсного трансформатора, формирующего высоковольтный импульс, поэтому количество секций изолятора соответствует количеству витков трансформатора. Гальваническая связь осуществляется проводниками одинаковой длины. Схема измерения распределения напряжения на изоляторе показана на рисунке 35.

Нагрузка (R_n) для испытаний изоляторов была изготовлена из графитовых низкоиндуктивных резисторов в керамическом корпусе марки ТВО, аналогичных использованным в [182]. На изолятор подавали положительные импульсы напряжения при амплитудных значениях 24 и 90 кВ, которые во всех опытах контролировались емкостным делителем напряжения [184]. Напряжение на градиентных кольцах изолятора измерялось попеременно с помощью высоковольтного щупа, внесенного в реестр средств измерения [189] и жидкостного резистивно-емкостного делителя [187,188]. Импульсы напряжения 24 кВ прикладывались при атмосферном давлении в вакуумной камере. При подаче импульсов 90 кВ давление менее 10^{-4} Торр поддерживалось с помощью откачной системы на основе криогенного высоковакуумного насоса для обеспечения необходимой диэлектрической прочности изолятора и нагрузки в вакуумной камере [178]. Давление остаточной атмосферы контролировали с помощью широкодиапазонного вакуумметра [180]. Индуктивность соединительных проводников 0,2 мкГн, измерялась с помощью измерителя иммитанса [195].

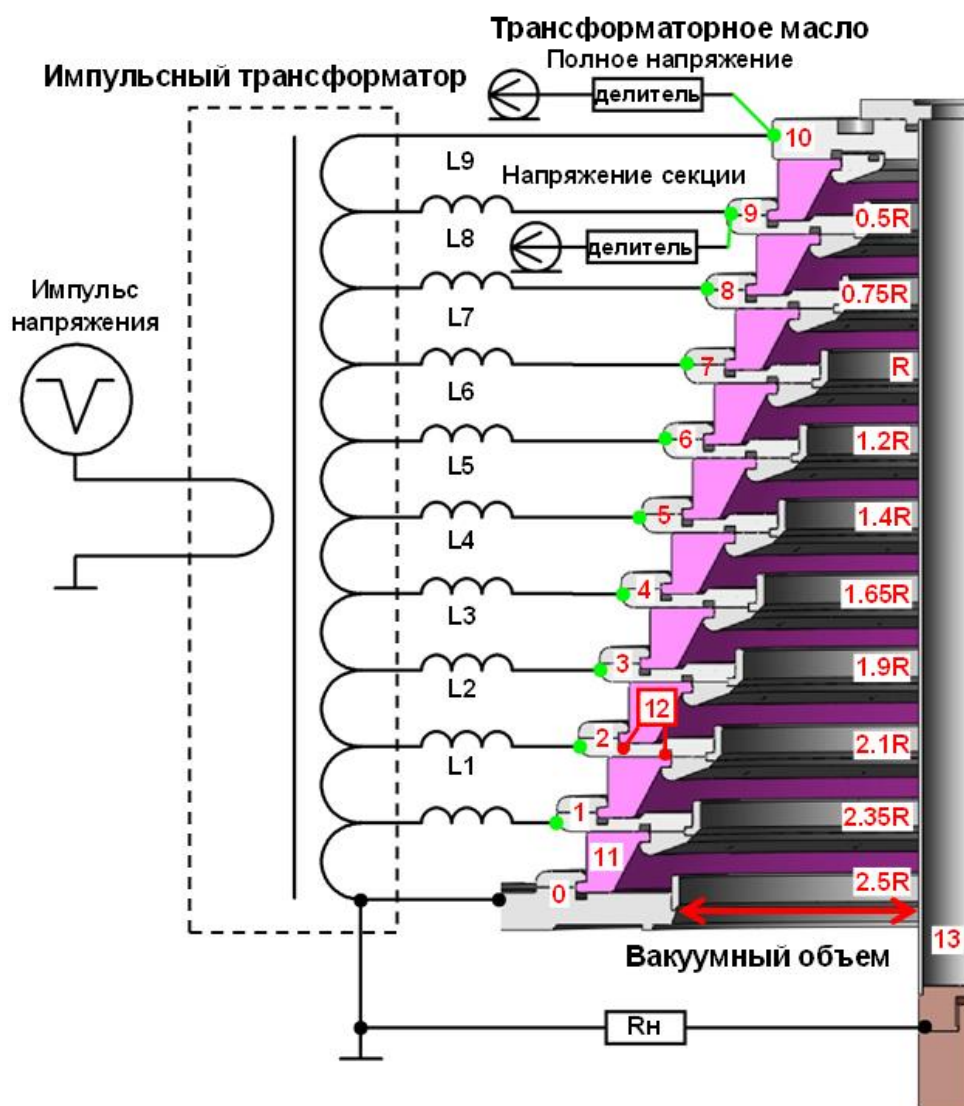


Рисунок 35 – Схема измерения распределения напряжения $\alpha = 75^\circ$: опорный фланец изолятора (0); градиентные кольца (1-10); диэлектрические кольца (11); вакуумные уплотнения (12); высоковольтный электрод (13)

В процессе испытаний были получены осциллограммы напряжения на градиентных кольцах высоковольтного изолятора (рисунок 36) для случаев свободного потенциала (без принудительного распределения) и наведенного напряжения, когда градиентные кольца подключены к виткам трансформатора. На рисунке 36 показана первая полуволна периодического затухающего сигнала, полученного от градиентных колец изолятора. Напряжение достигает максимального значения на всех градиентных кольцах одновременно.

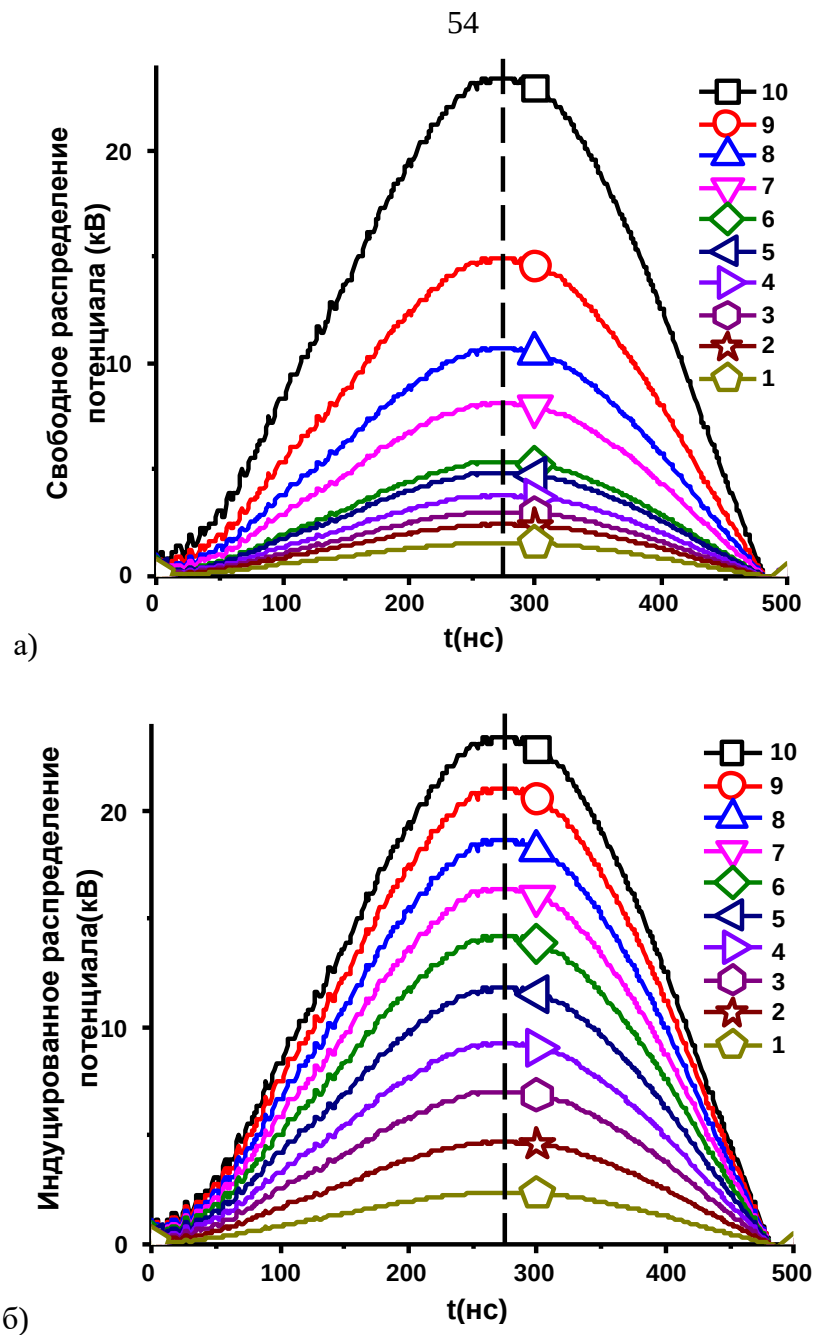


Рисунок 36 – Типичные осциллограммы напряжения относительно корпуса на градиентных кольцах изолятора во время импульса напряжения $U_{10} = 24$ кВ; 1-10 – номер градиентного кольца на рисунке 33 (а – со свободным потенциалом; б – с индуцированным потенциалом)

Распределение напряжения между соседними градиентными кольцами в процентах от общего напряжения по всему изолятору показано на рисунке 37. Среднее значение напряжения соответствует равномерному делению напряжения $U_{max}/10$. Распределение напряжения по изолятору в случае свободного потенциала (рисунок 37а) неравномерно по сравнению с вариантом с подключенным трансформатором (рисунок 37б). На изолирующий промежуток между высоковольтным электродом (рисунок 35 поз. 10) и ближайшим градиентным кольцом (рисунок 35 поз. 9), подается напряжение, составляющее 35 % от напряжения на всем изоляторе,

следовательно, это кольцо является наиболее электрически нагруженным элементом в данной конструкции.

При индуцированном напряжении на градиентных кольцах изолятора, распределение напряжения по изолятору близкое к равномерному (рисунок 37б, $U_{\max}/10$) с разбросом не более 1,4 %. Характер распределения напряжения между градиентными кольцами изолятора сохраняется в течение всей длительности импульса напряжения (рисунок 37б).

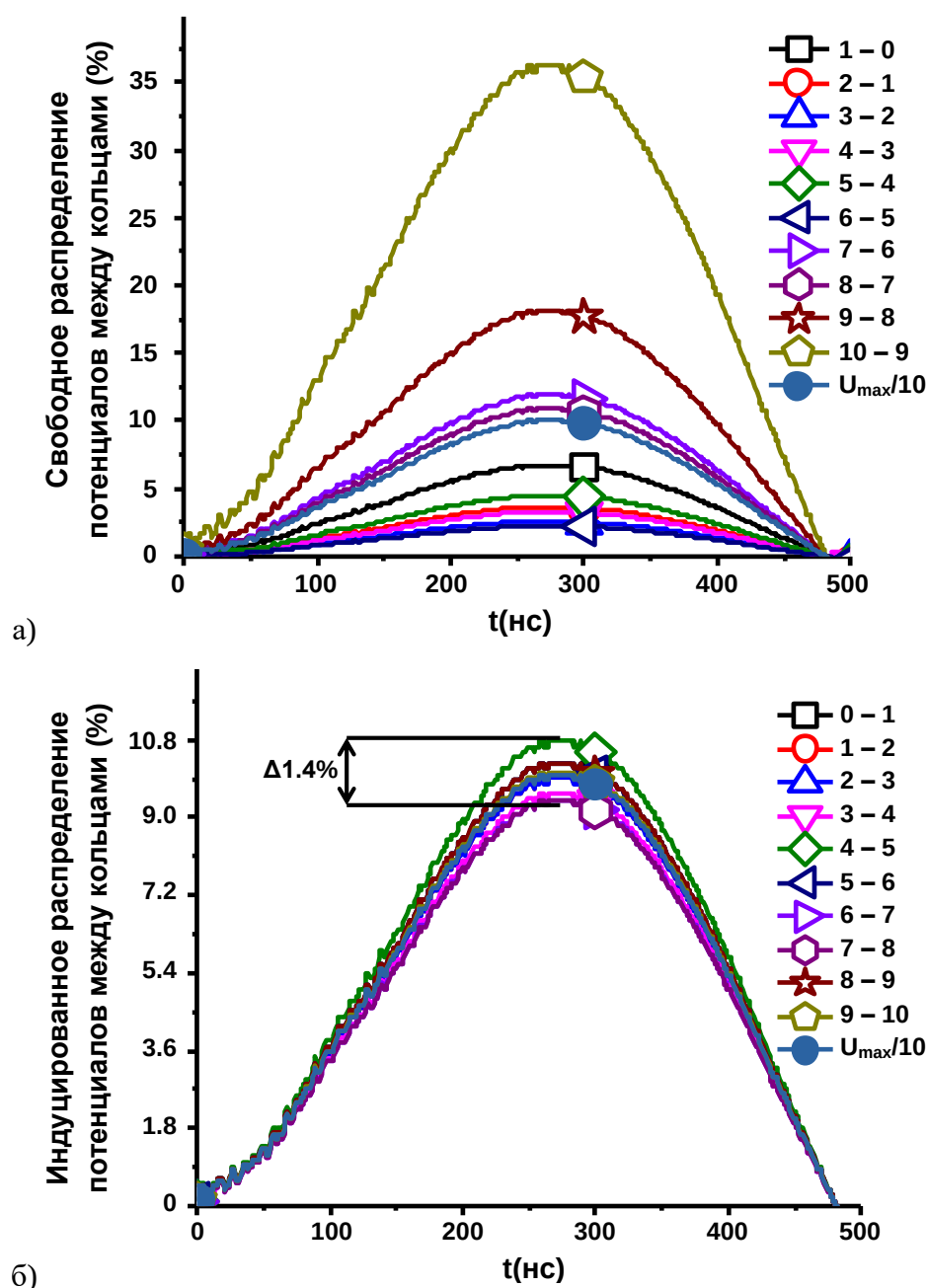


Рисунок 37 – Напряжение между градиентными кольцами при $U_{10}=24$ кВ (а – свободный потенциал, б – индуцированное напряжение)

Распределение напряжения между участками изолятора со свободным потенциалом имеет нелинейный характер. Чем ближе расположены градиентные кольца к высоковольтному электроду, тем больше шаг повышения напряжения (рисунок 38а синий треугольник). Отклонение напряжения на участках от равномерного распределения (рисунок 38б) достигает 34 % от значения напряжения по всему изолятору. Ближайшие к высоковольтному электроду четыре диэлектрических кольца находятся под напряжением, превышающим значение равномерно распределенного напряжения. Причем эти изолирующие зазоры расположены на максимальном расстоянии от патрубка вакуумного насоса, что увеличивает вероятность возникновения электроразрядных процессов в этой части изолятора.

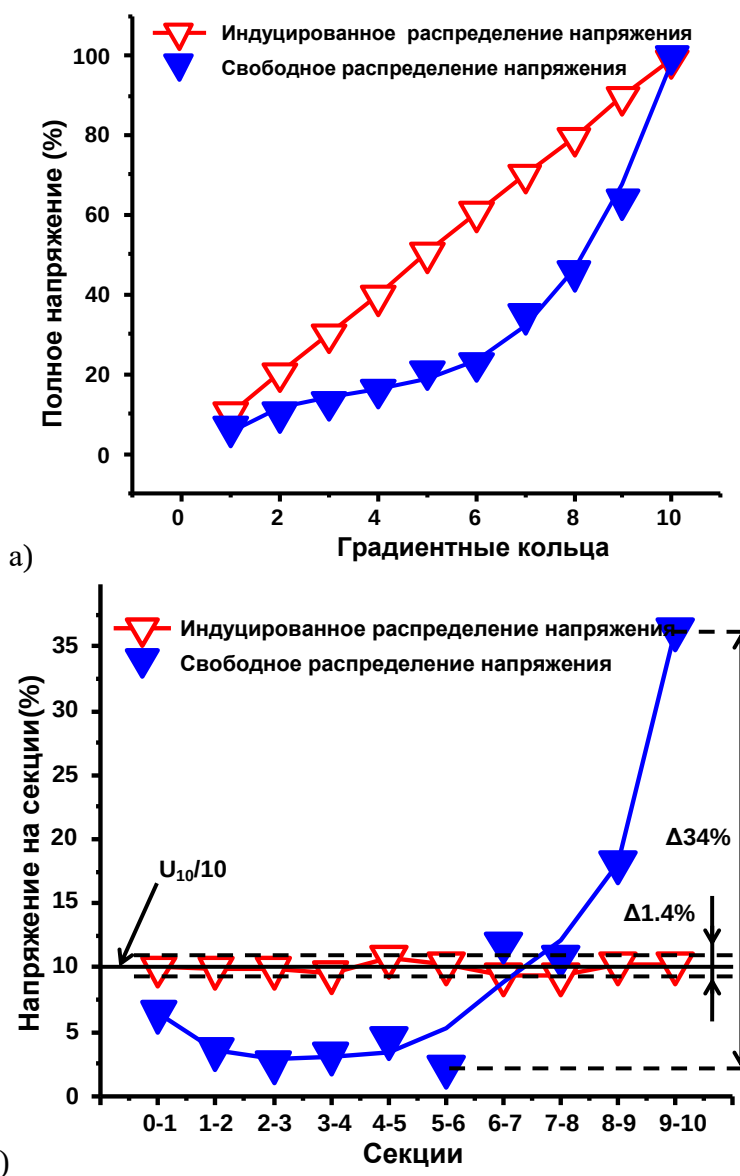


Рисунок 38 – Индукционное распределение напряжения: а) Распределение амплитудного значения напряжения между градиентными кольцами изолятора и земли при $U_{10} = 24$ кВ; б) напряжение между градиентными кольцами относительно полного напряжения на изоляторе при $U_{10} = 24$ кВ

Рост напряжения на изоляторе с индуцированным распределением напряжения линейный (рисунок 38а красный треугольник) с отклонением от равномерного распределения менее 1,4 % от значения напряжения по всему изолятору (рисунок 37б).

Увеличение подаваемого на изолятор напряжения с 24 до 90 кВ не изменило характер распределения напряжения между градиентными кольцами изолятора (рисунок 39). Максимальное отклонение от равномерного распределения составило 3,4 % от значения напряжения по всему изолятору. Испытания изолятора со свободным распределением напряжения в этом режиме не проводились во избежание разрушения диэлектрических колец из-

за возможного перенапряжения или накопления избыточного объемного заряда в диэлектрическом материале (оргстекло).

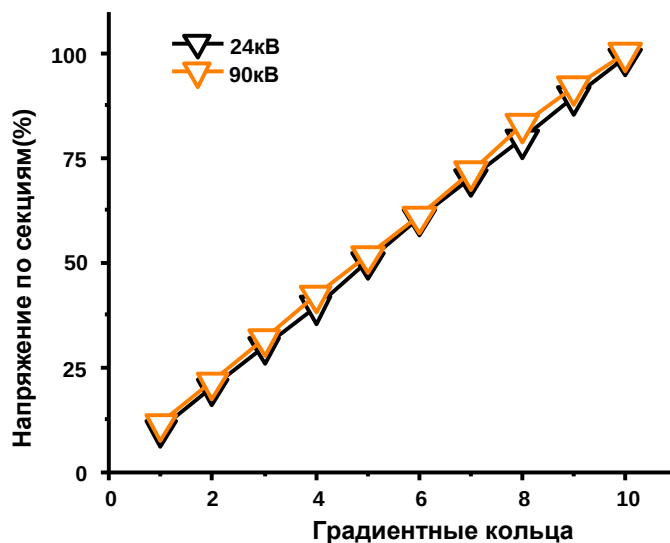


Рисунок 39 – Распределение амплитудного значения наведенного напряжения между градиентными кольцами изолятора относительно земли при $U_{10} = 24$ и 90 кВ

Значения средней напряженности электрического поля между высоковольтным электродом и градиентными кольцами относительно максимального значения показаны на рисунке 40 для двух конструкций изоляторов, выполненных с одинаковыми размерами. Напряженность электрического поля между заземленным основанием и высоковольтным для цилиндрической конструкции в 2,5 раза выше (рисунок 40 градиентное кольцо 0), чем для конической. Индуцированное распределение напряжения для конической конструкции позволило уменьшить напряженность электрического поля между высоковольтным электродом и градиентными кольцами 2-9.

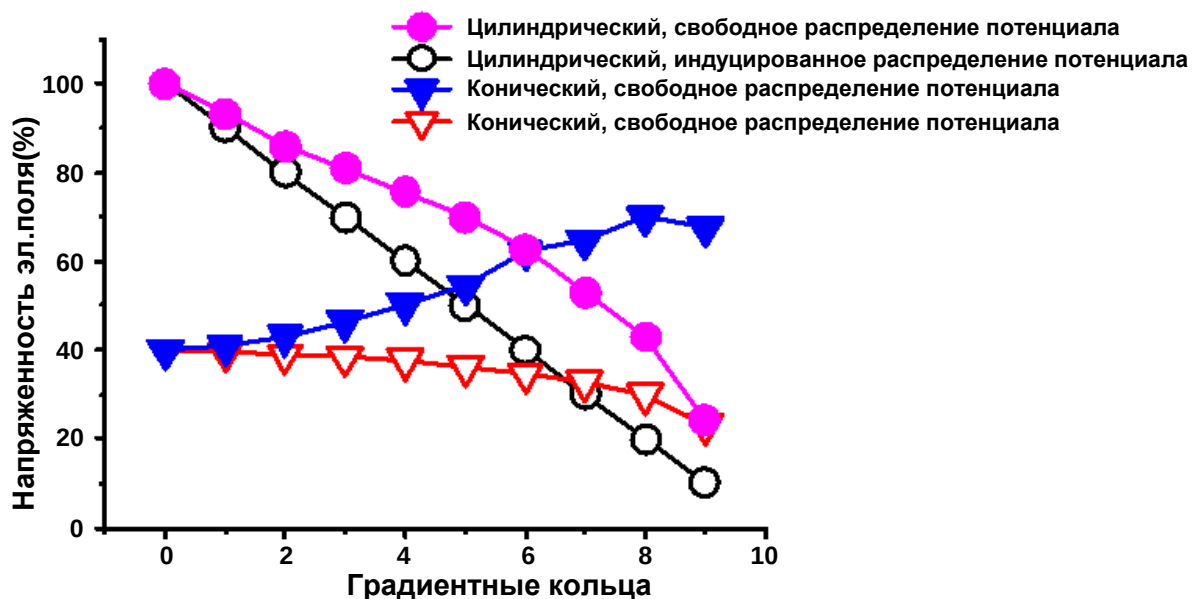


Рисунок 40 – Средняя напряженность электрического поля для зазоров между высоковольтным электродом и градиентными кольцами

Из вышеизложенного, можно констатировать, что предложенный способ позволил равномерно распределить напряжение по коническому секционированному изолятору. Равномерное распределение напряжения по изолятору сохраняется в течение всей длительности импульса (0,25 мкс на полувысоте). Подключение градиентных колец к земле через витки трансформатора нейтрализует остаточный заряд после импульса напряжения. Коническая конструкция изолятора обеспечивает меньшую среднюю напряженность электрического поля и лучшие условия откачки остаточной атмосферы в вакуумной части изолятора по сравнению с цилиндрической конструкцией. Такие решения могут быть применены в генераторах со ступенчатым нарастанием напряжения, подключаемых к выходному секционированному изолятору. Очевидно, описанные принципы справедливы не только для условий вакуума, но и для газов и жидкостей. Индуцированный метод распределения напряжения между градиентными кольцами экспериментально подтвердил свою эффективность для импульсов напряжения длительностью 0,25 мкс (на полувысоте). Для более коротких импульсов напряжения необходимо учитывать влияние индуктивностей проводников гальванической связи (рисунок 35 L₁-L₉) и емкостей градиентных колец, что может привести к критическому искажению равномерного распределения напряжения. Кроме того, полярность импульса напряжения не имеет значения для описываемого в статье принципа организации распределения напряжения по изолятору, так как потенциал градиентного кольца определяется при формировании импульса ускоряющего напряжения [204].

Выводы

Предложенная конусная конструкция вакуумного секционированного изолятора обладает значительными преимуществами по сравнению с цилиндрической. Напряженность электрического поля между заземленным основанием и высоковольтным электродом для конической конструкции в 2,5 раза меньше, чем для цилиндрической. Для секции, расположенной на максимальном расстоянии от высоковакуумного насоса, коническая конструкция обеспечивает время откачки в 3 раза меньше, чем цилиндрическая. Гальваническая связь витков трансформатора с градиентными кольцами позволила равномерно распределить напряжение по изолятору на протяжении всей длительности импульса (0,5 мкс). Максимальное отклонение от равномерного распределения составляет 3,4 %.

Глава 4. Катод вакуумного электронного диода

Катоды с взрывной эмиссией электронов обеспечивают высокую плотность эмиссионного тока без вспомогательных систем и по этой причине долгое время являются предметом исследований для мощных ускорителей наносекундной и субмикросекундной длительности. Зависимость изменения эмиссионных характеристик катода при импульсно-периодической работе диода от числа импульсов в серии очень важна для использования импульсных ускорителей, так как продолжительность непрерывной работы определяет возможность конкретного применения. Преодоление ограничений продолжительности непрерывной работы может состоять в обновлении катода перед каждым рабочим сеансом. В этой главе представлено исследование длительной импульсно-периодической работы диода ускорителя Астра-М [38] с взрывоэмиссионными катодами из различных материалов при сохранении частоты повторения импульсов на протяжении всего эксперимента при скорости нарастания напряжения в ускоряющем промежутке $\sim 2,5\text{-}4 \cdot 10^{12}$ В/с. Были выбраны катоды из типов и материалов широко описанных в литературе, с развитой рабочей поверхностью и потенциально претендующих на высокий ресурс и стабильные характеристики. Катоды закреплялись в обойме на катододержателе, являющемся высоковольтным электродом проходного вакуумного изолятора генератора импульсов ускоряющего напряжения. Для обеспечения электрической прочности конструкции проходного изолятора давление в вакуумной камере электронного диода поддерживалось на уровне $\sim 10^{-5}$ - 10^{-6} Торр с помощью безмасляной системы откачки на основе криогенного высоковакуумного насоса [178]. При выводе пучка в атмосферу охлаждение выводного окна осуществлялось с помощью медного охлаждаемого водой фланца (рисунок 52 поз. 3), и водо-воздушным потоком (200 л/час), подающимся на выводную титановую фольгу (рисунок 52 поз. 6) толщиной 60 мкм.

4.1 Планарные катоды из металлокерамики и пористой меди.

Экспериментально исследовались характеристики планарных катодов из металлокерамики ($\text{BaTiO}_3 + \text{Cu}$, в пропорции 1:1, р 41) и пористой меди (пористостью 50 %, р 42). Высокая теплопроводность материала таких катодов необходима для эффективного теплоотвода из области, прилегающей к рабочей поверхности катода, что является важным фактором для работы ускорителя при высокой частоте импульсов тока пучка, а диэлектрические включения выступают в роли эмиссионных центров – тройных точек (метал-диэлектрик-вакуум) во время взрывного плазмообразования. Частота следования импульсов во время экспериментальных исследований составляла 10 имп./с.

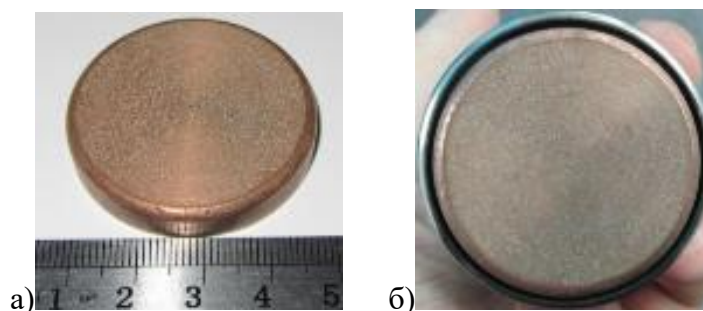


Рисунок 41 – Внешний вид металлокерамического катода: а) катод; б) катод в обойме катододержателя

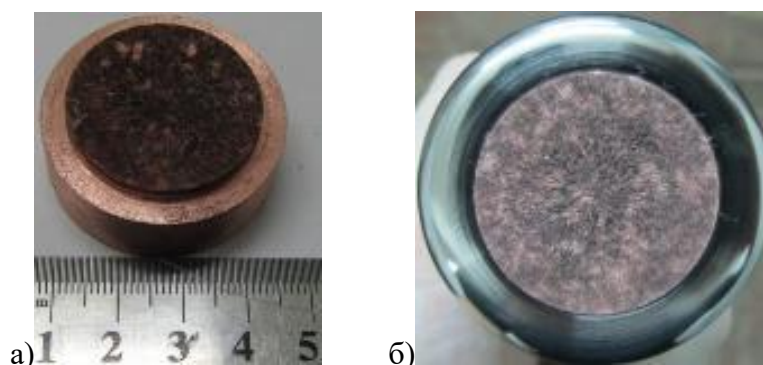


Рисунок 42 – Внешний вид катода из пористой меди: а) катод; б) катод в обойме катододержателя

Характерные кривые ускоряющего напряжения и полного тока в диоде представлены на рисунке 43.

Усредненные по 16 точкам (стандартное отклонение сигналов не более 5 % в серии из 16 импульсов) значения напряжения и полного тока вакуумного диода регистрировались каждые 100 импульсов. Изменение регистрируемых показателей за $1 \cdot 10^4$ импульсов тока пучка иллюстрируется графиками, приведенными на рисунке 44.

Анализ угла наклона аппроксимирующих кривых рисунка 44 позволяет утверждать, что изменение характеристик медного пористого катода происходит медленнее, чем композиционного. После $1 \cdot 10^4$ импульсов тока пучка разница характеристик становится малозначительной. Кроме того, на основании данных рисунка 44, можно заключить, что применение катода из композиционного материала позволяет развивать в диоде мощность на 27 % больше, чем с катодом из пористой меди на начальном этапе работы. Снижение тока свидетельствует о том, что эмиссионная поверхность применяемых катодов деградировала в процессе проведения экспериментов. Фрагменты композиционного материала катода были обнаружены на стенках вакуумной камеры диода и фольге выводного окна ускорителя, что является неприемлемым для непрерывной частотной работы ускорителя (рисунок 56 г).

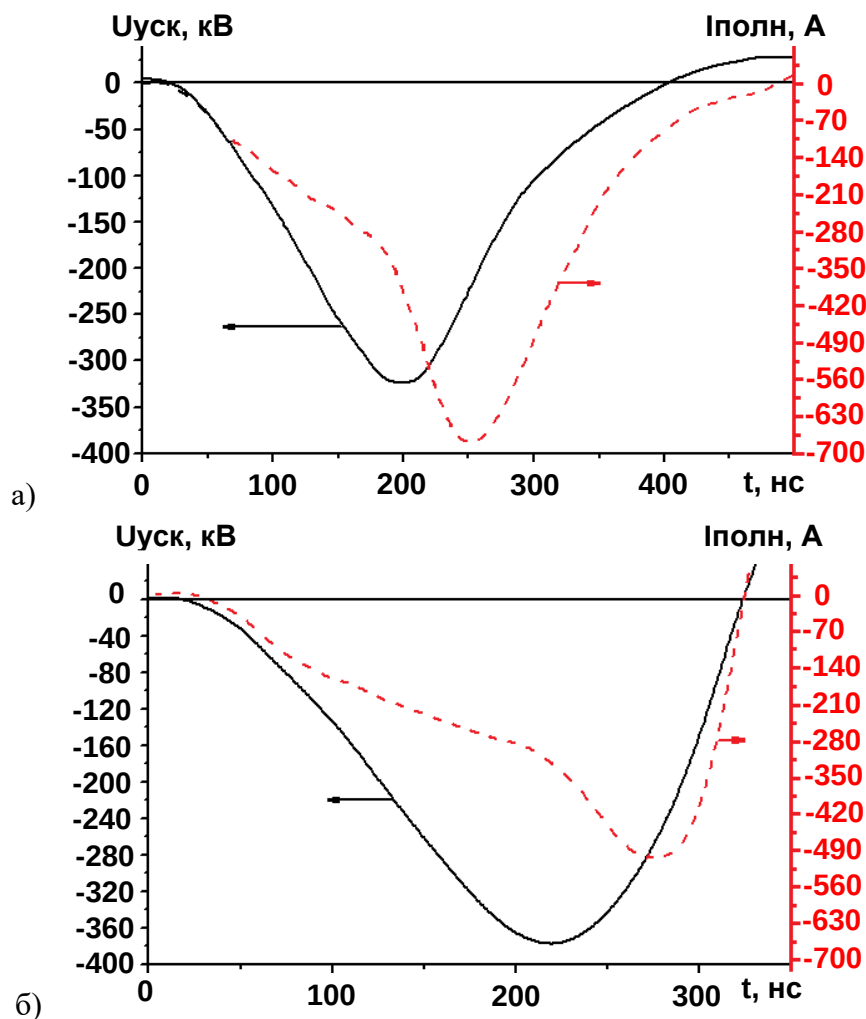


Рисунок 43 – Характерные осциллограммы тока и напряжения вакуумного диода ускорителя:

а) катод из металлокерамики; б) катод из пористой меди

Характеристики катодов восстанавливаются после абразивной обработки рабочей поверхности. Применение медного катода с объемной пористостью 40 % позволило получить электронный пучок с более стабильными во времени параметрами, что предпочтительно для задач, связанных с длительным воздействием электронного пучка ($<10^4$ имп. в серии). Применение композиционного катода позволило добиться большей плотности тока по сравнению с композиционным и подходит для задач, требующих однократного, либо кратковременного ($<5 \cdot 10^3$ имп. в серии) воздействия электронным пучком [205].

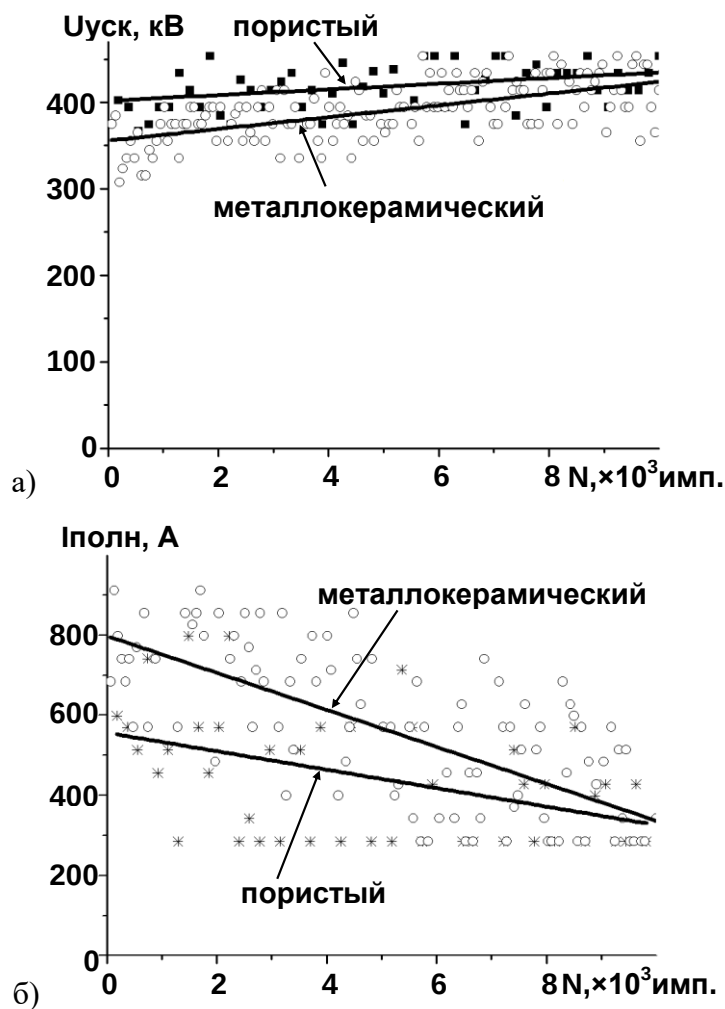


Рисунок 44 – Стабильность параметров электронного диода от количества импульсов:

а) ускоряющее напряжение; б) полный ток в диоде

4.2 Катод с конструктивной дискретной эмиссионной поверхностью из углеродно-эпоксидных трубок

Перспективным материалом взрывоэмиссионного катода также являются углеродно-эпоксидные трубки или капилляры [206,207]. Такие катоды с конструктивно выделенными эмиттерами позволяют создать стабильную конфигурацию распределения энергии в сечении электронного пучка. На рисунке 45 представлен внешний вид катода: основание изготовлено из меди марки М1М, диаметр рабочей части катода равен 30 мм, а толщина 5 мм; трубки из углеродного волокна имеют высоту 7 мм от основания катода, внешний диаметр 2мм, внутренний диаметр 1мм, а расстояние между центрами 3,5 мм, всего 55 капилляров. Для уменьшения влияния «краевого эффекта» был применен катододержатель с экраном, конструкция которого схематично представлена на рисунке 45, применение данной конструкции подробно описано в работе [208]. Частота следования импульсов во время исследований

составляла 20 имп./с. Во время всего эксперимента давление в вакуумной камере находилось в пределах 10^{-6} Торр.

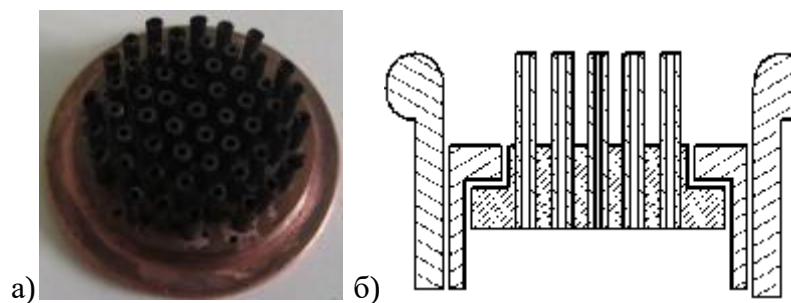


Рисунок 45 – Катод из углеродно-эпоксидных трубок: а) внешний вид катода; б) схематичный вид катода в катододержателе

На рисунке 46 представлены характерные осциллограммы работы диода с углеродно-эпоксидным катодом, непосредственно после установки его в вакуумную камеру. В виду большей длительности фронта импульса напряжения, чем в работе [207], нет задержки между началами импульсов ускоряющего напряжения и полного тока диода.

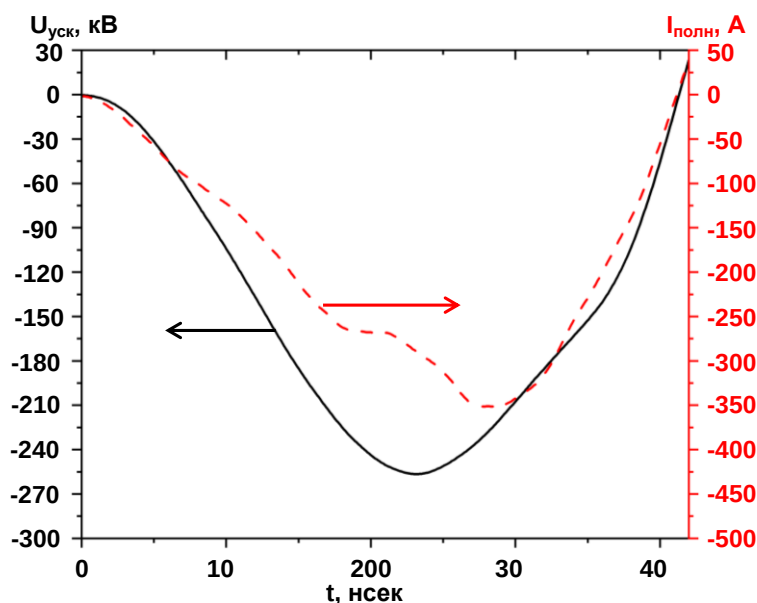


Рисунок 46 – Характерные осциллограммы напряжения ($U_{\text{уск}}$) и полного тока ($I_{\text{полн}}$) вакуумного диода ускорителя с катодом из углеродно-эпоксидных трубок

Усредненные по 16 точкам значения (стандартное отклонение сигналов не более 5 % в серии из 16 импульсов) напряжения и полного тока вакуумного диода регистрировались каждые 10^4 импульсов. Изменение параметров диода с углеродно-эпоксидным катодом при увеличении количества импульсов отображены на рисунке 47. Частотные испытания показали относительно стабильную работу катода вплоть до $3 \cdot 10^4$ импульсов, за исключением отдельных импульсов.

После $3 \cdot 10^4$ ускоряющее напряжение увеличилось до максимального значения, а ток упал до минимального.

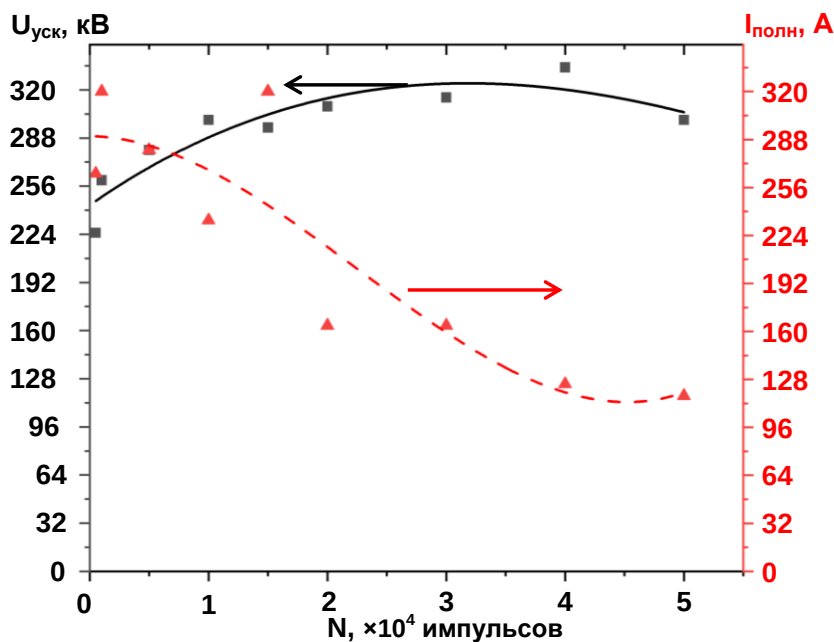


Рисунок 47 – Изменение ускоряющего напряжения ($U_{\text{уск}}$) и полного тока ($I_{\text{полн}}$) диода с катодом из углеродно-эпоксидных трубок от количества импульсов

Уменьшение эмиссионной способности катода может быть связано с полировкой поверхности углеродных трубок, проиллюстрированной на рисунке 48. Эффект полировки отчетливо виден при рассмотрении поверхности торца трубок под микроскопом (рисунок 48). После $5 \cdot 10^4$ импульсов на выводной фольге обнаружены равномерно распределенные следы нагара, не ухудшающие прозрачность выводного окна.

Катод с конструктивной дискретной эмиссионной поверхностью из углеродно-эпоксидных трубок может быть использован для генерации электронного пучка с плотностью тока до 50 А/см^2 , стабильными во времени параметрами ($\pm 5\%$) при генерации от 10^3 до $3 \cdot 10^4$ импульсов и частотой следования 20 имп./с. После $3 \cdot 10^4$ импульсов, катод показывает максимальные значения ускоряющего напряжения и минимальные значения тока, что накладывает соответствующие ограничения на его применение [209].

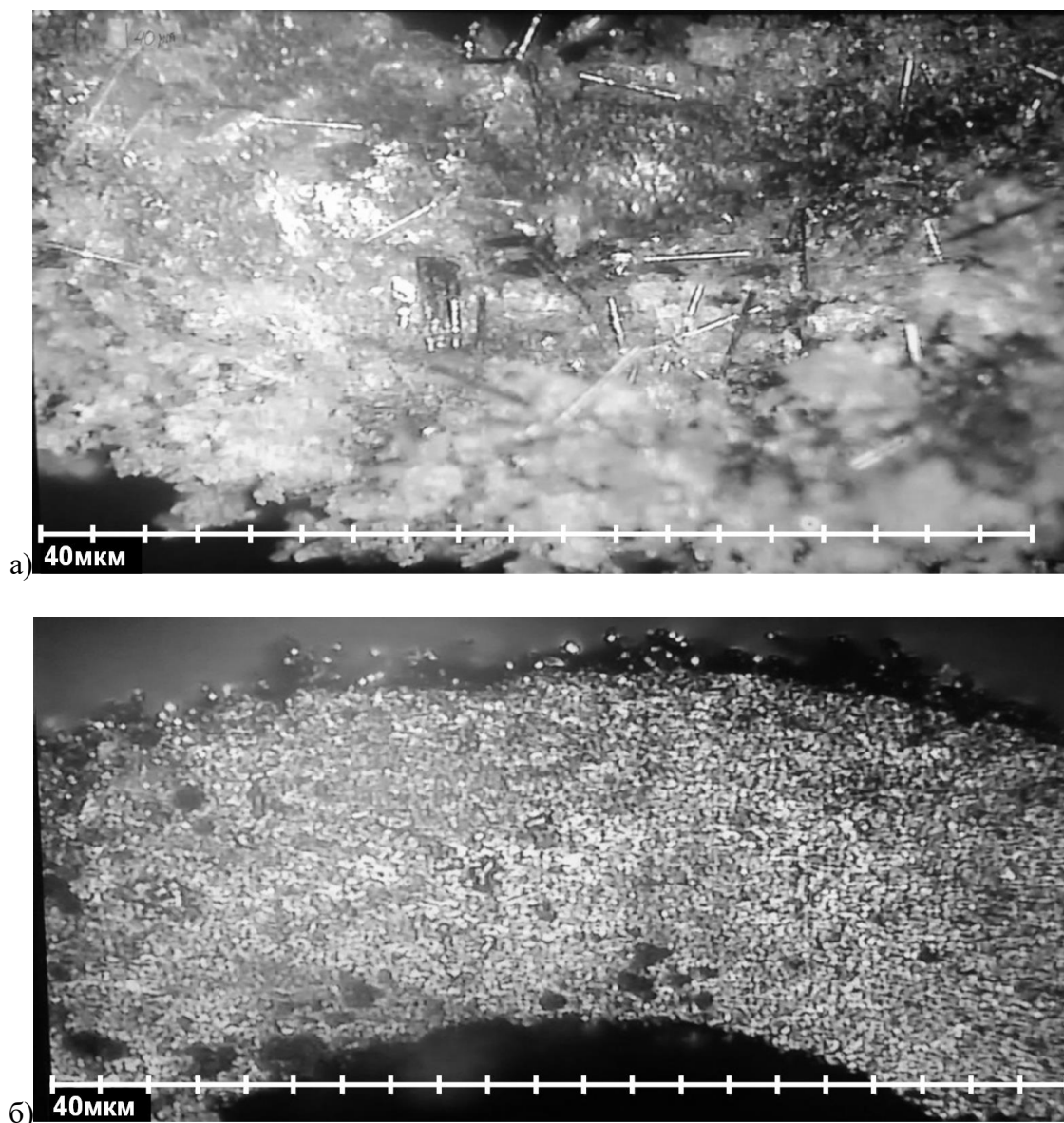


Рисунок 48 – Фотография торца трубки (а – до частотных испытаний, б – после частотных испытаний $5 \cdot 10^4$ импульсов)

4.3 Катод со сплошной эмиссионной поверхностью из углеродного волокна

Планарные катоды на основе углеродного волокна традиционно применяются в ускорительной технике за счет своей высокой скорости образования плазмы, большого ресурса и стабильности параметров. Катод диаметром 30 мм был изготовлен из углеродного волокнистого материала Урал ТМ-4-22 [210]. Материал выполнен в виде ткани и обладает поверхностной плотностью 1100 г/м^2 и удельным поверхностным электрическим сопротивлением $< 0,3 \text{ Ом}$. Ткань максимально плотно сворачивалась в рулон и закреплялась в медном катододержателе (рисунок 49). Электронная микроскопия эмитирующей части материала [211] показала, что волокно имеет сложную форму, подобную эллиптической, с размерами $\approx 5 \times 10 \text{ мкм}$ (рисунок 50). После предварительной настройки диода, частотные

испытания катода проводились на частотах 5, 10 и 15 имп./с. Для каждой частоты углеродное волокно в катоде заменялось на новое (исходное). При частоте 5 имп./с генерация проводилась сериями по $4 \cdot 10^4$ импульсов с 12 часовыми перерывами, без разгерметизации вакуумной камеры. За время перерыва в экспериментах при отсутствии откачки давление в вакуумной камере повышалось до уровня $\sim 10^{-1}$ Торр. Осциллограммы сигналов отслеживались/мониторились в режиме реального времени и сохранялись каждые $2,5 \cdot 10^3$ импульсов (усредненные по 16 осциллограмм, стандартное отклонение сигналов не более 5 % в серии из 16 импульсов).



Рисунок 49 – Внешний вид планарного катода из углеродного волокна

На рисунке 51а представлены типичные осциллограммы сигналов с датчиков напряжения и тока в диоде. Характер изменения импеданса совпадает с результатами, полученными ранее для катодов из других материалов [171,212].

Согласно рисунку 51г во всех частотных режимах изменение амплитудного значения ускоряющего напряжения от числа импульсов имеет максимальное значение первые $2 \cdot 10^4$ импульсов (амплитудное значение увеличивается на 10 %), далее изменение амплитудного значения напряжения от числа импульсов уменьшается, а общее увеличение амплитудного значения напряжения не превышает 15 %. При 5 имп./с перерывы между сериями не привели к заметным изменениям ускоряющего напряжения, но сопровождаются кратковременным (на протяжении $2,5 \cdot 10^3$ импульсов) увеличением значений тока (Рисунок 51е 5 имп./с). Это может объясняться абсорбцией газа остаточной атмосферы вакуумной камеры в углеродном волокне, так как за время перерывов в эксперименте при отсутствии откачки давление в камере повышалось до 10^{-1} Торр и сохранялось в течение 12 часов. Пороговым критерием для прекращения испытаний было падение тока в диоде на 25 % от изначального значения. Так длительность испытаний катода при частоте 5 имп./с. составила $1,9 \cdot 10^5$ импульсов, при 10 имп./с – $1,2 \cdot 10^5$ импульсов, при 15 имп./с – $4 \cdot 10^4$ импульсов, соответственно. Увеличение частоты с 5 до 15 имп./с привело к уменьшению длительности испытаний катода в 4,75 раза. Из анализа кривых изменения амплитудного значения полного тока в диоде (Рисунок 51е) от количества импульсов видно, что в течение первых $2 \cdot 10^4$ импульсов уменьшение амплитудного значения импульсов

тока в диоде имеет максимальное значение (5 имп./с – 10 %, 10 имп./с – 15 %, 15 имп./с – 22 %), далее скорость уменьшения амплитудного значения импульсов тока в диод существенно замедляется для всех режимов. Такой характер изменений может объясняться наличием загрязнений и абсорбированного газа в углеродном волокне. Анализ рисунка 51е показывает, что средняя скорость изменения амплитудного значения тока в диоде увеличивается с увеличением частоты повторения импульсов.

На рисунке Рисунок 50 представлена электронная микроскопия вершин углеродного волокна на исходном катоде и после испытаний. Анализ увеличенного изображения волокна показал, что после испытаний при 5 имп./с форма торцов волокна изменилась с эллиптической (с размерами $\approx 5 \times 10$ мкм) на круглую (средний диаметр волокна 9 мкм) с кратерами по стволу волокна. Структурный анализ материала показал, что изменение формы волокна происходит за счет напыления углерода, предположительно, за счет абляционной плазмы с соседних вершин волокна. При увеличении частоты следования импульсов с 5 до 15 имп./с средний диаметр волокна уменьшился с 9 до 8 мкм и плотность кратеров на стволе волокна также уменьшилась. Исходя из данных рисунка 51е, основные процессы преобразования морфологии поверхности происходят в течение $2 \cdot 10^4$ импульсов, так как именно в это время происходят самые интенсивные изменения напряжения и тока в диоде. Это говорит о том, что свежеизготовленный катод из углеродного волокна нуждается в тренировке в течение $2 \cdot 10^4$ импульсов, так как далее изменение напряжения и тока в диоде снижается. Увеличение частоты следования импульсов во время тренировки положительно сказывается на стабильности работы катода после тренировки.

Так как средний диаметр отдельных острий волокна увеличился, то можно допустить отложение углерода на волокне при генерации электронного пучка, кроме того, прослеживается зависимость этого процесса от частоты следования импульсов (чем выше частота следования импульсов, тем тоньше слой осаждается). Возможно, это связано с температурой катода при генерации, так как чем выше была частота повторения импульсов, тем сильнее нагревался катод. Также нельзя исключить поверхностный пробой, так как электрические свойства материала и структура поверхности эмитирующего катода допускают распространение электрического поля вглубь катодного волокна из области ускоряющего промежутка, а также процессов взаимного экранирования близко расположенных центров излучения.

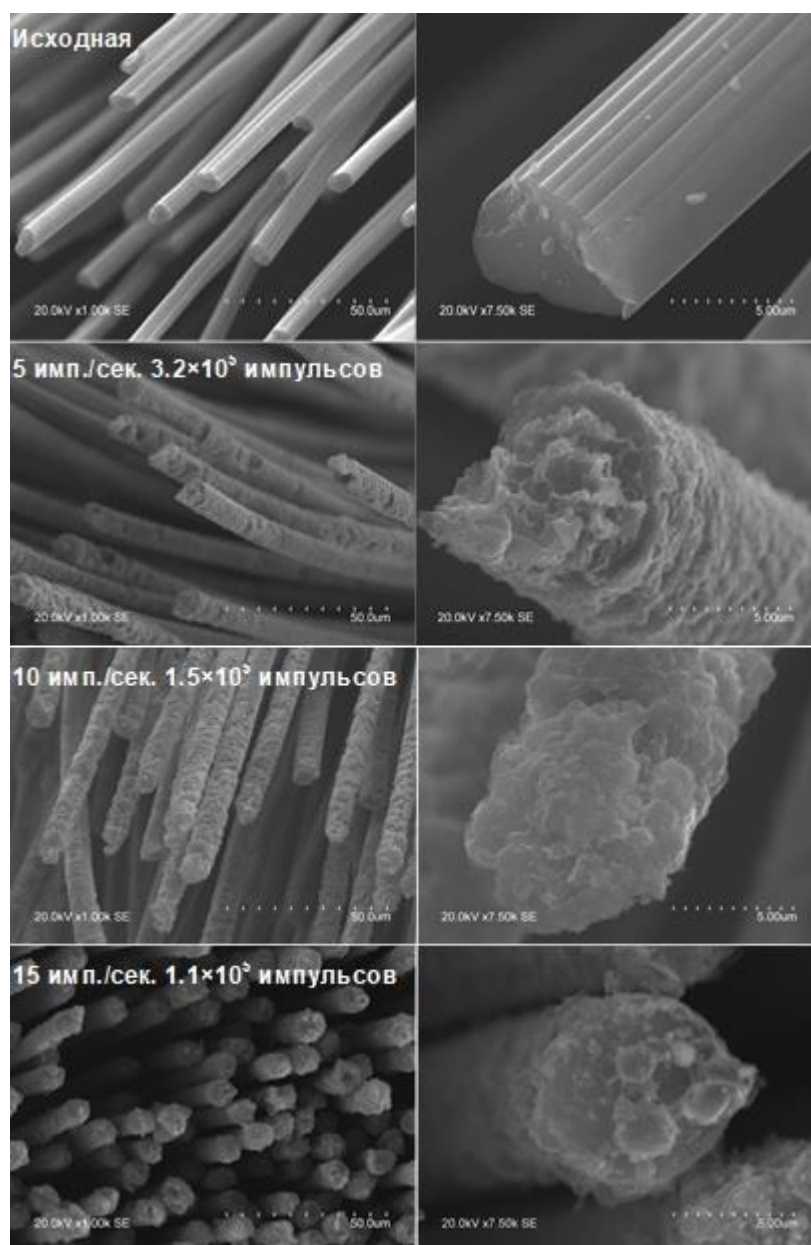


Рисунок 50 – Электронно-микроскопические изображения вершин углеродного волокна на исходном катоде и после испытаний

Изменение процессов формирования катодной плазмы, очевидно, зависит от частоты следования импульсов. Возможно, это связано со сложным протеканием процессов, при изменении морфологии поверхности материала и условий образования плазмы, связанных с остаточной атмосферой, с повышением температуры катода при длительной работе с высокой частотой следования импульсов. Кроме того, по результатам [89] мы предполагаем, что мы не достигли минимального «стационарного» уровня генерации тока, а увеличение частоты ускоряет процесс достижения этого уровня.

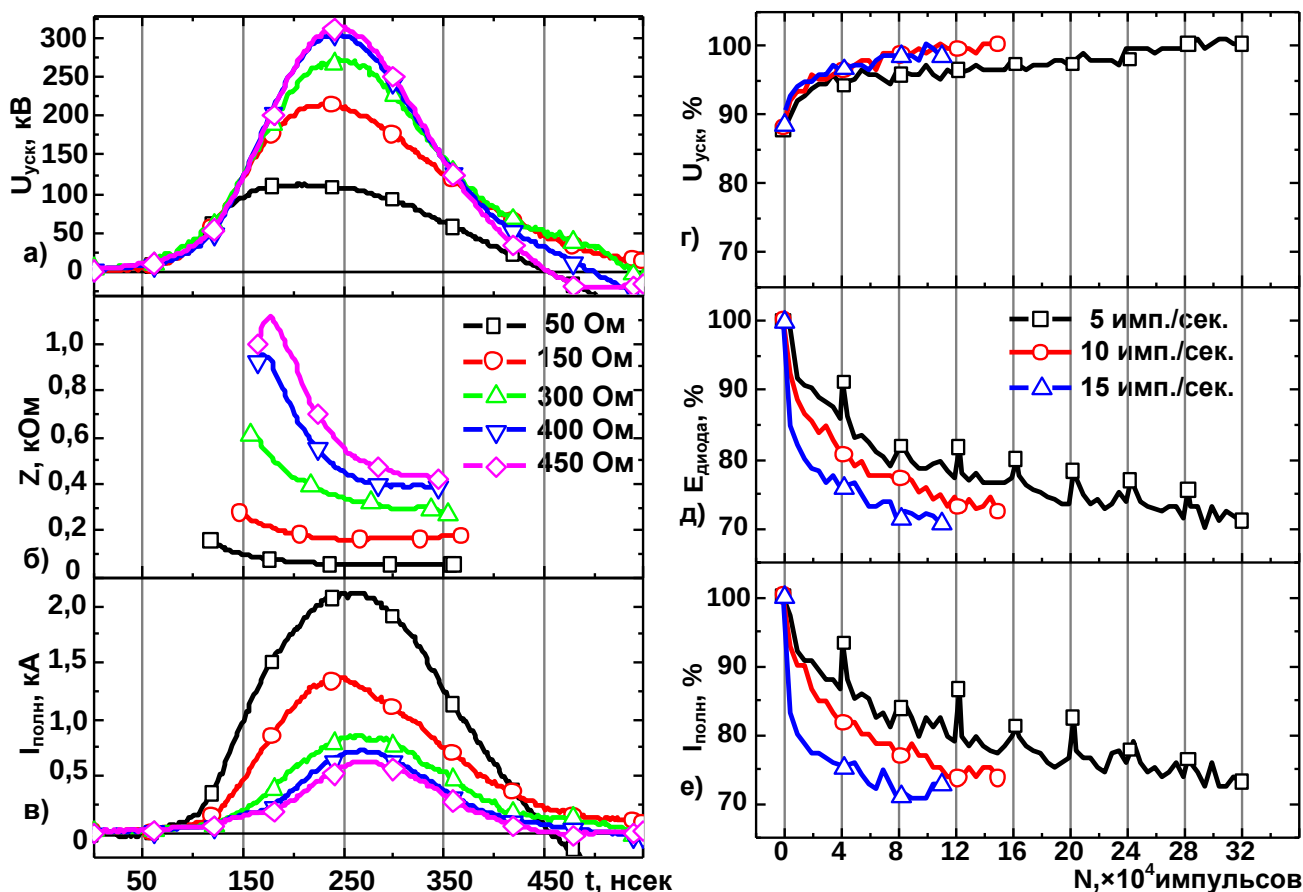


Рисунок 51 – Типичные осциллограммы: а – ускоряющего напряжения ($U_{\text{уск}}$); б – импеданса диода (Z); в – полного тока в диоде ($I_{\text{полн}}$) при разных значениях импеданса в максимуме тока в диоде; зависимость г – ускоряющего напряжения; д – энергии выделенной в диоде ($E_{\text{диола}}$); е – полного тока в диоде от количества импульсов при различных частотах повторения импульсов

Исходя из полученных экспериментальных данных, при скорости нарастания напряжения $2,5 \cdot 10^{12}$ В/с количество импульсов до уменьшения тока в диоде на 25 % для катодов из углеродного волокна меньше по сравнению с результатами, полученными в [89], при скорости нарастания напряжения $2 \cdot 10^{13}$ В/с. Увеличение частоты следования импульсов усиливает этот эффект. В работе [89] уменьшение тока прекращается после $1,6 \cdot 10^6$ импульсов на уровне $\sim 0,45 I_0$ и сохраняется до $3,6 \cdot 10^6$ импульсов, в наших исследованиях мы не достигли таких значений тока в диоде, возможно в наших условиях мы выйдем на это плато раньше, это вопрос дальнейших исследований.

Изменение характеристик катода на основе углеродного волокна при разных частотах повторения импульсов проведено до $3,2 \cdot 10^5$ импульсов. Свежеизготовленный катод из углеродного волокна нуждается в тренировке в течение $2 \cdot 10^4$ импульсов. После пауз между экспериментами и повышения давления в камере до $\sim 10^{-1}$ Торр также необходимо тренировать

катод в течение $2,5 \cdot 10^3$ импульсов перед продолжением экспериментов. Увеличение частоты с 5 до 15 имп./с. показало уменьшение количества импульсов до снижения тока в диоде на 25 % в 4,75 раза. После испытаний форма торцов микроволокна изменилась с эллиптической (с размерами $\approx 5 \times 10$ мкм) на круглую (средний диаметр волокна 8-9 мкм) с кратерами по стволу волокна, изменение формы волокна происходит за счет процессов эрозии и напыления материала катода. При скорости нарастания напряжения $2,5 \cdot 10^{12}$ В/с количество импульсов до уменьшения тока в диоде на 25 % для катодов из углеродного волокна меньше по сравнению с результатами, описанными в литературе, при скорости нарастания напряжения $2 \cdot 10^{13}$ В/с [213].

Выводы

Применение медного катода с объемной пористостью 40 % позволило получить электронный пучок с стабильными во времени параметрами в серии $<10^4$ импульсов при частоте 10 имп./с. Применение композиционного катода позволило добиться предельных импульсных параметров электронного пучка по току и мощности, что подходит для задач, требующих однократного, либо кратковременного ($<10^3$ имп. в серии) воздействия электронным пучком при частоте 10 имп./с.

Катод с конструктивной дискретной эмиссионной поверхностью из углеродно-эпоксидных трубок может быть использован для генерации электронного пучка $<2 \cdot 10^4$ импульсов и частотой следования 20 имп./с при уменьшении тока в диоде на 25 %.

Изменение характеристик катода на основе углеродного волокна при разных частотах повторения импульсов проведено до $3,2 \cdot 10^5$ импульсов. Увеличение частоты с 5 до 15 имп./с показало уменьшение количества импульсов до снижения тока в диоде на 25 % в 4,75 раза. После испытаний форма торцов микроволокна изменилась с эллиптической (с размерами $\approx 5 \times 10$ мкм) на круглую (средний диаметр волокна 8-9 мкм) с кратерами по стволу волокна, изменение формы волокна происходит за счет процессов эрозии и напыления материала катода. При скорости нарастания напряжения $2,5 \cdot 10^{12}$ В/с количество импульсов до уменьшения тока в диоде на 25 % для катодов из углеродного волокна меньше по сравнению с результатами, описанными в литературе, при скорости нарастания напряжения $2 \cdot 10^{13}$ В/с. При частоте 15 имп./с и уменьшении тока в диоде на 25% ресурс катода составил $<11 \cdot 10^4$ импульсов.

Из исследованных примеров конструкций взрывоэмиссионных катодов наибольший ресурс и стабильность параметров показал планарный катод на основе углеродного волокна. Целесообразно продолжать исследовать и применять катоды на основе этого материала в диодах наносекундных и субмикросекундных ускорителей со скоростью нарастания напряжения $2,5$ - $4 \cdot 10^{12}$ В/с, а требуемые характеристики катодов следует подбирать основываясь на конкретном применении ускорителя.

Глава 5. Инжекция электронного пучка в атмосферу и его применение

Применение ускорителей электронов для решения практических задач, как правило, требует вывода пучка в атмосферу. Необходимость инъекции предъявляет требования к выходному окну, такие как: прозрачность для полезного излучения, термическая, химическая и радиационная стойкость для обеспечения приемлемого срока службы.

Кроме того, для импульсных ускорителей вопрос энергетического спектра пучка является особенно важным, так как часть электронов ускоряются на фронте и спаде импульса ускоряющего напряжения, и их энергия соответствует действующему в тот момент значению ускоряющего напряжения. Следовательно, зависящее от энергетического спектра электронов распределение энергии по глубине определяет область и особенности применения сгенерированного электронного пучка. Поэтому крайне важно иметь оперативную диагностику по определению энергетического спектра пучка. Особенно это важно для применений, связанных с санитарной обработкой объемов жидкостей и газов и поверхностей твердых тел.

За последние десятилетия загрязнение источников питьевой воды отразилось повышением детских и взрослых заболеваемости связанных с кишечными инфекциями, аллергией, онкологией и паразитами [214]. Кишечная палочка или *Escherichia coli* (*E. coli*) встречается повсеместно и играет важную роль в современной промышленной микробиологии, биологической инженерии, считается универсальным организмом для синтеза чужеродных белков [215]. Обеззараживание водных растворов с *E. Coli* является востребованной задачей. Одним из самых универсальных комплексных способов обеззараживания растворов является облучение ионизирующим излучением. При такой обработке важно обеспечить сплошное непрерывное облучение для исключения возможности вторичного заражения. Выпускные окна с опорными сетками проецируют на облучаемую поверхность затененные участки ребер сетки. Таким образом, создание конструкции мембраны без ярко выраженных затененных участков является актуальной задачей.

5.1 Конструкция анодного узла

На основе литературного обзора были спроектированы несколько конструкций анодного узла, совмещающих в себе функции анода и выводного окна, схематично показанные на рисунке 52. Частотные испытания всех конструкций проводились с одинаковыми параметрами ускорителя при частоте повторения от единичных импульсов до 40 имп./с. Испытания проводились при водяном охлаждении через медный фланец, встроенный в конструкцию анодного узла (рисунок 52а поз. 3, 4). Дополнительно выводная мембрана охлаждалась потоком воды и воздуха (1:10) с расходом воды 5 л/мин [216]. Эксперимент прекращался, когда значительно уменьшалась эмиссия тока пучка [217] или фиксировалось критическое изменение

давления в вакуумной камере. Влияние состава остаточной атмосферы в вакуумной камере показано на сравнении результатов частотных испытаний с масляным диффузионным [179] и криогенным насосами.

Классическая конструкция с поддерживающей решеткой показана на рисунке 52а, в которой она несет механическую нагрузку давления мембраны со стороны атмосферы и стабилизирует геометрию ускоряющего зазора, выступая в роли анода в диоде ускорителя. В результате механическая прочность сетки на изгиб ограничивает минимальное сечение ребра сетки. Более толстые ребра у поддерживающих решеток приводят к дополнительным потерям пучка в структуре выводного окна и требуют дополнительного охлаждения. Поэтому решетка была изготовлена из нержавеющей стали толщиной 4 мм, прозрачностью 85 % с шестигранной ячейкой при толщине ребра 1 мм, что обеспечило достаточную жесткость для вывода пучка на площади диаметром 90 мм (рисунок 52а). Выводное окно с поддерживающей сеткой позволяет работать с фольгами алюминий-магний толщиной 50 мкм или титановыми толщиной 25 мкм в одноимпульсных режимах или короткими сериями с частотой до 5 имп./с.

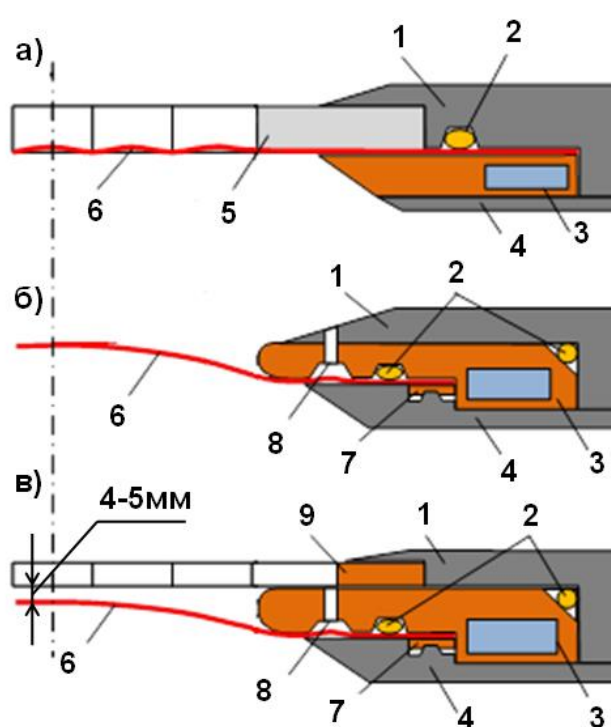


Рисунок 52 – Конструкция анодного узла с поддерживающей решеткой (а), самонесущая анодная мембрана (б) и с отдельной анодной решеткой (в): 1 – фланец анодного узла; 2 – силиконовое уплотнение; 3 – охлаждающий медный фланец с закрытым водяным каналом; 4 – зажимной фланец с кромкой для крепления мембраны; 5 – поддерживающая решетка; 6 – уплотнительная мембрана; 7 – медная прокладка между мембраной и зажимной кромкой; 8 – вакуумный замок; 9 – анодная решетка

Детектирование выведенного электронного пучка с помощью дозиметрических пленок показывает области малых доз в виде тени от поддерживающей решетки (рисунок 53а). Эти области низких доз становятся шире к периферии окна. Данный фактор может ограничить использование электронного пучка для дезинфекции поверхности из-за возможности вторичного инфицирования из областей с низкими дозами.

Тепловое изображение (рисунок 53б) выводного окна с поддерживающей решеткой, зафиксированное с помощью инфракрасной камеры, показывает форму сетки на атмосферной стороне мембраны, отображающую зоны локального перегрева. Тепло от решетки передается на мембрану в точках соприкосновения, а области, которые не соприкасаются, охлаждаются более интенсивно.

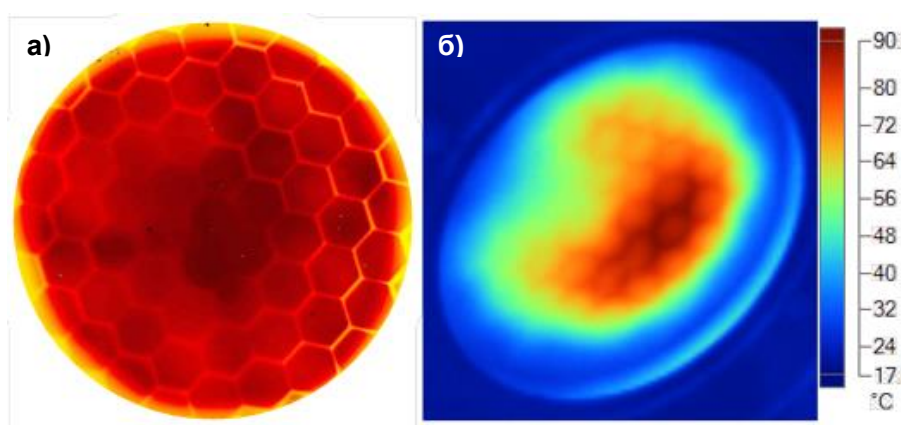


Рисунок 53 – Отпечатки пучка: а) отпечаток выведенного электронного пучка на дозиметрической пленке после 10 импульсов для выводного окна с поддерживающей решеткой; б) тепловое изображение выводного окна с поддерживающей сеткой после 60 импульсов электронного пучка при частоте 1 имп./с

Тестирование анодного узла при частоте 10 имп./с с диффузионно-масляной [179] откачкой вакуумной камеры закончилось перегревом после 10^4 импульсов пучка с водовоздушным охлаждением фольги. При выявлении дефектов обнаружено локальное провисание сетки, направленное в сторону ускоряющего зазора. Локальное уменьшение зазора приводит к локальному росту тока пучка, что способствует дальнейшему перегреву сетки и мембраны (рисунок 54а). Нагретая сетка, теряя твердость, деформировалась (рисунок 54а) и дальнейшая частотная работа привела к критичному падению давления в вакуумной камере, режиму короткого замыкания и разрушению выводного окна после $5 \cdot 10^4$ импульсов (рисунок 54б). На поверхностях анодного узла зафиксирована цветная пленка в зонах воздействия электронного пучка, предположительно состоящая из продуктов разложения вакуумного масла диффузионного вакуумного насоса (рисунок 54а), что так же может влиять на

работу диода ускорителя в частотных режимах работы. Окрашенные участки на поверхности мембраны свидетельствуют о локальном перегреве в результате дугового разряда. Следовательно, при длительном частотном воздействии поддерживающая решетка не только не успевает охлаждаться сама, но и перегревает выводную мембрану в месте контакта. Для устранения данного недостатка было предложено отказаться от поддерживающей решетки в конструкции анодного узла.

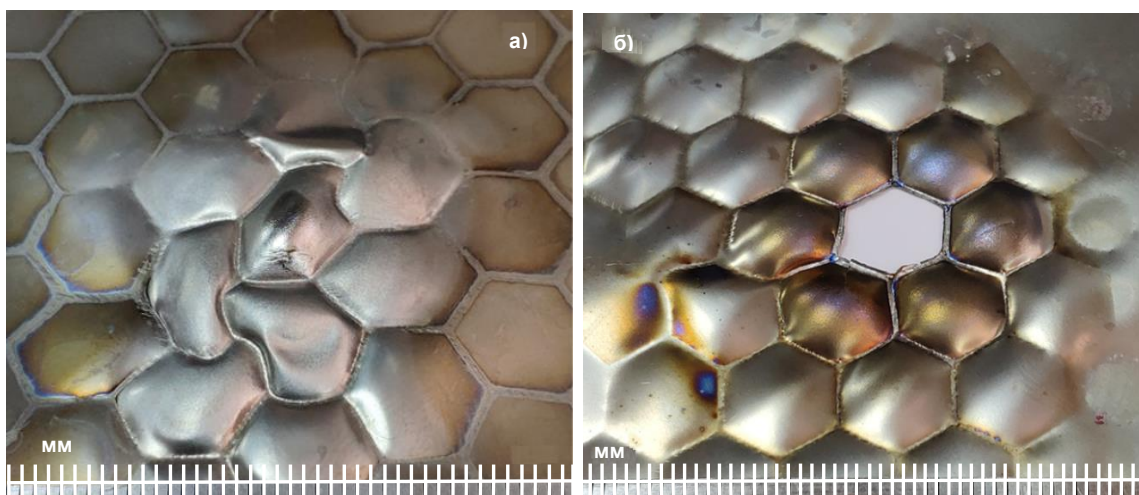


Рисунок 54 – Фото мембраны (Ti 60 мкм) со стороны вакуума с диффузионно-масляной откачкой при 10 имп./с после 10^4 импульсов (а) и прорыв фольги после $5 \cdot 10^4$ импульсов (б)

Разработанная конструкция выводного окна с самонесущей мембраной представлена рисунке 52б. Мембрана провисает в пазу охлаждающего фланца (рисунок 52б поз. 8), в то время как периферия мембраны остается прочно зафиксированной кромкой зажимного фланца (рисунок 52б поз. 4, 7). Титановая фольга толщиной 60 мкм (VT1-0) продемонстрировала подходящую прочность для использования в описанной конструкции и применялась во всех длительных экспериментах. Более тонкие титановые или алюминиевые фольги пластически деформировались, а затем разрушались. Система выводного окна с самонесущей мембраной обеспечивает провисание мембраны до 2–3 мм вдоль оси при внешнем диаметре мембраны 90 мм, поэтому, ускоряющий зазор стал отличаться от плоской конфигурации.

Полученная конструкция показала ресурс 10^5 импульсов. Испытания конструкции с самонесущей мембраной показали появление на поверхности мембраны с внутренней (вакуумной) стороны вакуумной камеры цветной пленки в зонах воздействия электронного пучка, как и в конструкции анодного узла с поддерживающей решеткой (рисунок 54а). Результаты элементного анализа пленок после $5 \cdot 10^4$ и 10^5 импульсов пучка показаны на рисунке 55. Основным материалом для пленок служит углерод (рисунок 55 - С), предположительным его источником служат масляные пары паромасляной вакуумной системы.

Композитный катод и экранирующий электрод из нержавеющей стали [212] также могут быть источником других примесей (рисунок 55). Уменьшение скорости роста пленки для мембраны после 10^5 пучков по сравнению с образцом после 10^4 импульсов (рисунок 55) объясняется уменьшением тока электронного пучка при большем количестве импульсов [217]. После замены высоковакуумного насоса на криогенный насос углеродные пленки обнаружены не были.

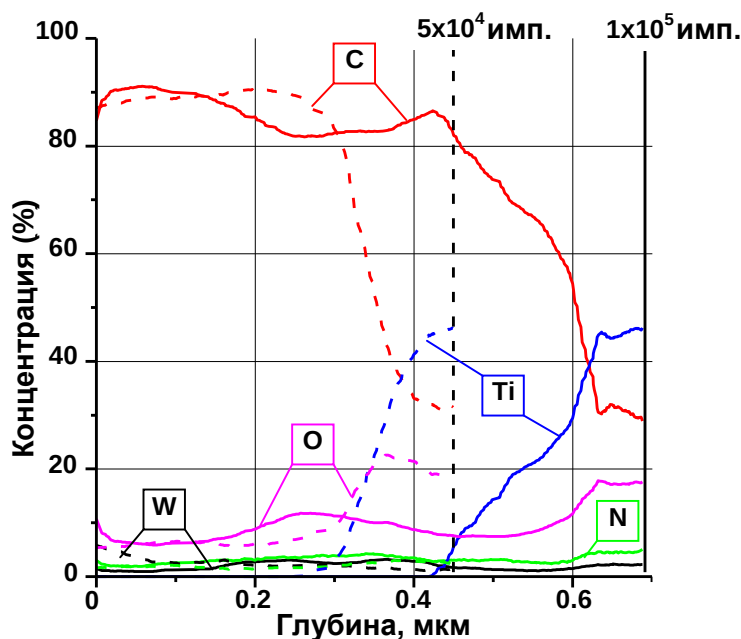


Рисунок 55 – Результаты Оже-спектроскопии для пленок на вакуумной поверхности мембраны после $5 \cdot 10^4$ (штриховые линии) и 10^5 (сплошные линии) импульсов пучка. Вакуумную камеру откачивали с помощью масляного диффузионного вакуумного насоса. Элементы плёнок: углерод (C); вольфрам (W); кислород (O); титан (Ti); азот (N)

Длительные испытания конструкции выводного окна с самонесущей анодной мембраной привели к прорыву мембраны (рисунок 56а) при $1\text{--}2 \cdot 10^5$ импульсов и частоте 40 имп./с. Детальное рассмотрение дефекта выявило необратимое провисание мембраны на 3-4 мм (в общей сложности ~ 7 мм) в направлении центральной части катода (рисунок 56а). Предположительно, дополнительное провисание является результатом неоднородности тока пучка из-за увеличения напряженности электрического поля в неплоской геометрии анод-катодного промежутка. Другим критическим недостатком такой конструкции является возможность появления дуговых разрядов во время работы вакуумного диода в режиме высокой частоты следования импульсов, отпечатки таких разрядов на поверхности мембраны показаны на рисунке 56б, в. Количество обнаруженных дефектов увеличивается при увеличении количества импульсов до разрушения мембраны, и её необходимо заменить после 10^5 импульсов пучка, чтобы избежать аварийной ситуации. Эмитирующая поверхность взрывоэмиссионного

катода на основе металлокерамики разрушается во время работы диода, а частицы катода могут попадать в анодный узел и осуществлять локальный перегрев элементов конструкции (рисунок 56г).

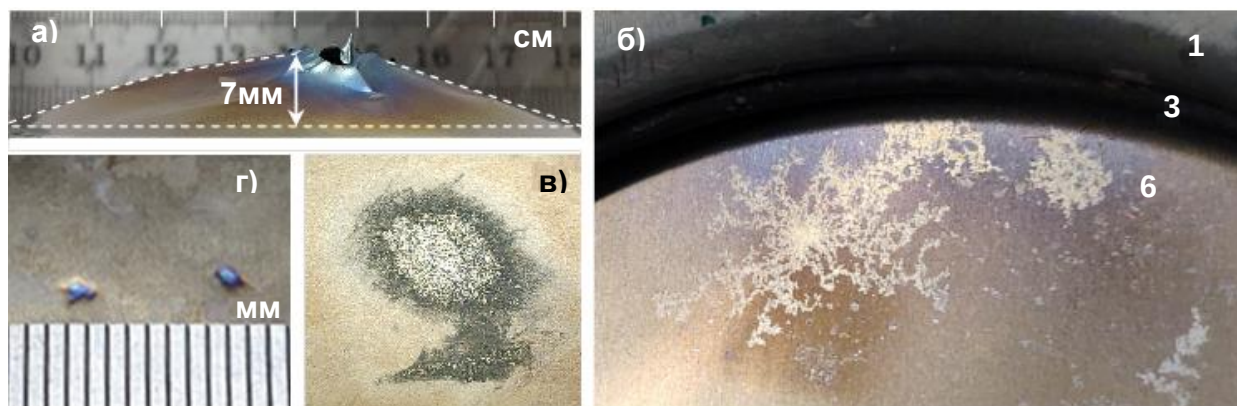


Рисунок 56 – Фото мембраны после частотных испытаний: профиль мембраны самонесущей анодно-мембранной конструкции после 10^5 импульсов при 40 имп./с приведших к разрушению фольги (а); области с следами разрядов со стороны вакуума в диоде с самонесущей анодной мембраной (б); фланец выводного окна (1); фланец охлаждения с закрытым водяным каналом (3); уплотнительная титановая мембрана толщиной 60 мкм (6); отпечаток дугового разряда в виде расплавленной поверхности мембраны (в); локальные точки перегрева на внешней стороне мембраны (в атмосфере) в местах обнаруженных фрагментов катода (г)

С учетом всех перечисленных негативных факторов был разработан дизайн анодного узла, представленный на рисунке 52в, объединяющий два предыдущих подхода: анодная сетка обеспечивает стабильный ускоряющий зазор, а самонесущая мембрана герметизирует вакуумную диодную камеру, зазор между решеткой и мембраной был выбран 4-5 мм, для исключения их контакта при максимальной деформации мембраны. Отсутствие механической нагрузки на решетку со стороны разделительной мембраны позволило уменьшить толщину медного анода до 2 мм, при прозрачности 92 % и шестигранной ячейке с толщиной ребра 0,4 мм. Как показал литературный обзор диоды с медными анодными решетками обладают более устойчивыми параметрами работы в сравнении с анодами из нержавеющей стали. Тепло от потерь, поглощаемых сеткой, передается посредством теплопроводности через пятно теплового контакта (медь-медь) к охлаждающему фланцу. Температура плавления меди (1085°C), теплопроводность и абляционная стойкость теоретически ограничивает рабочую температуру сетки, как и у мембраны непрерывно охлаждаемой потоком воды/газа.

В результате испытаний срок службы анодного узла с одной анодной решеткой и выводной мембраной достиг $1,5 \cdot 10^6$ импульсов при частоте 40 имп./с. Это количество импульсов

было сделано за 8 экспериментов различной продолжительности и два открытия вакуумной камеры для визуального контроля состояния диода. Эксперименты завершались, когда ток в диоде падал более чем в 2 раза, однако, анодный узел сохранял рабочее давление в вакуумной камере и на мембране отсутствовали видимые повреждения. Замена мембраны производилась по факту загрязнения её поверхности фрагментами катода, что ухудшило условия переноса пучка и привело к локальным точкам перегрева (рисунок 56г). Применение катода на основе углеродного волокна решило эту проблему.

Измерения распределения дозы показывают, что зазор между анодной сеткой и мембраной достаточно, чтобы скрыть тени анодной сетки; таким образом, области с низкой дозой отсутствуют (рисунок 57). Постоянная плоская геометрия ускоряющего зазора обеспечивает изменение дозы на 10 % на размерах диаметра катода (рисунок 57). Анодная сетка защищает мембрану от электрического поля высокой напряженности и дуговых процессов в вакуумном диоде. Кроме того, подход с самонесущей мембраной обеспечивает лучший тепловой баланс для работы с высокой частотой повторения импульсов благодаря улучшению условий охлаждения и отсутствию передачи тепла от анодной сетки.

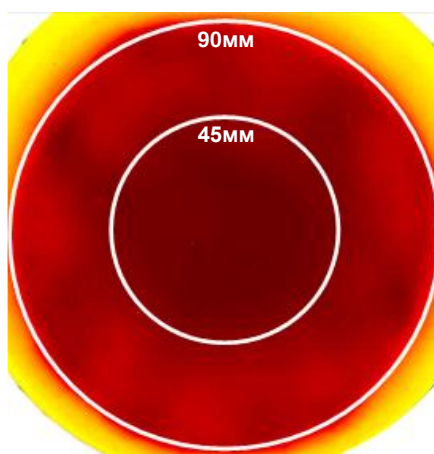


Рисунок 57 – Отпечаток выведенного в атмосферу электронного пучка на дозиметрической пленке за 10 импульсов при частоте 1 имп./с из выводного окна с анодной решеткой и самонесущей мембраной

Вакуумный электронный диод субмикросекундного импульсного ускорителя электронов был испытан в одноимпульсном режиме и режиме с высокой частотой повторения импульсов с различными конструкциями выводного окна. Известная конструкция выводного окна с металлической мембраной и поддерживающей решеткой перед выходом из строя выдержала 10^4 импульсов при частоте 10 имп./с. Конструкция с самонесущей анодной мембраной выдержала 10^5 импульсов при 40 имп./с, но накопила повреждения требующие замены

мембраны. Комбинированная конструкция выводного окна с анодной решеткой и самонесущей мембраной продемонстрировала ресурс $> 1,5 \cdot 10^6$ импульсов при частоте 40 имп./с [70].

5.2 Измерение параметров электронного пучка, выведенного в атмосферу

В настоящем параграфе проведена оценка спектра кинетической энергии выведенного импульсного пучка электронов с помощью алюминиевых мишеней различной толщины [218]. Спектр кинетической энергии электронного пучка играет важную роль при применении пучка, так как определяет глубину облучения объектов. Применяемый метод основан на методиках, описанных в [219–221], и представляет из себя метод отсечных фольг с модифицированной конструкцией цилиндра Фарадея (рисунок 58) и калориметра полного поглощения (рисунок 59) для измерения характеристик пучка. Распределения тока, энергии и дозы электронного пучка в поперечном сечении были измерены без и с дополнительными алюминиевыми фольгами. В качестве отсечных фольг для центральной области пучка использовались алюминиевые мишени диаметром 30 мм [220]. Толщину мишеней варьировали от 40 до 210 мкм с ошибкой ≤ 10 мкм. Расчет энергетического спектра электронов производился с помощью открытых баз данных пробегов электронов [222]. Все исследования проводились при давлении 10^{-5} Торр.

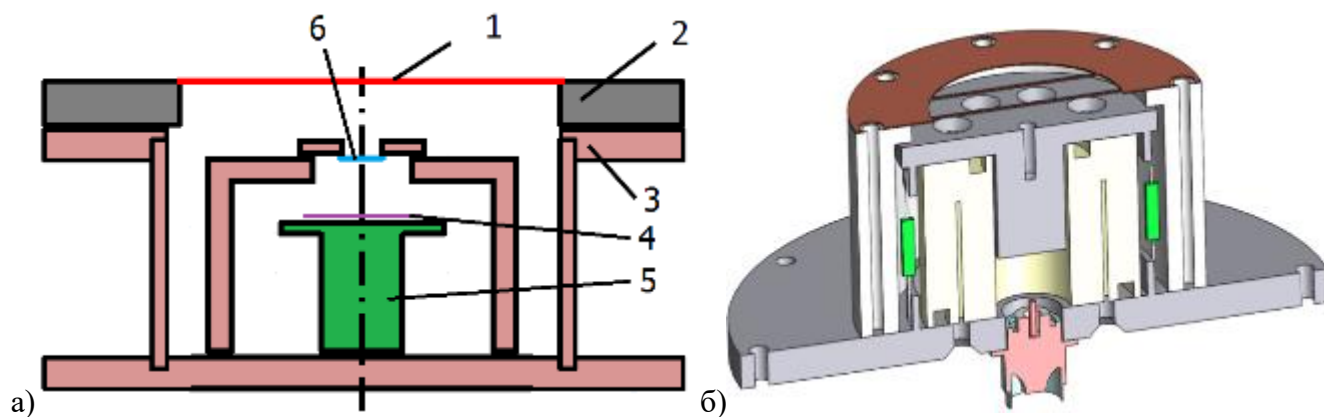


Рисунок 58 – Схема эксперимента с цилиндром Фарадея (а): мембрана выходного окна (Ti 60 мкм) (1); фланец выходного окна (2); камера цилиндра Фарадея (3); радиочувствительная пленка ПОР (4); коллектор цилиндра Фарадея (5); фольга алюминиевая различной толщины (6);

Конструкция цилиндра Фарадея (б)

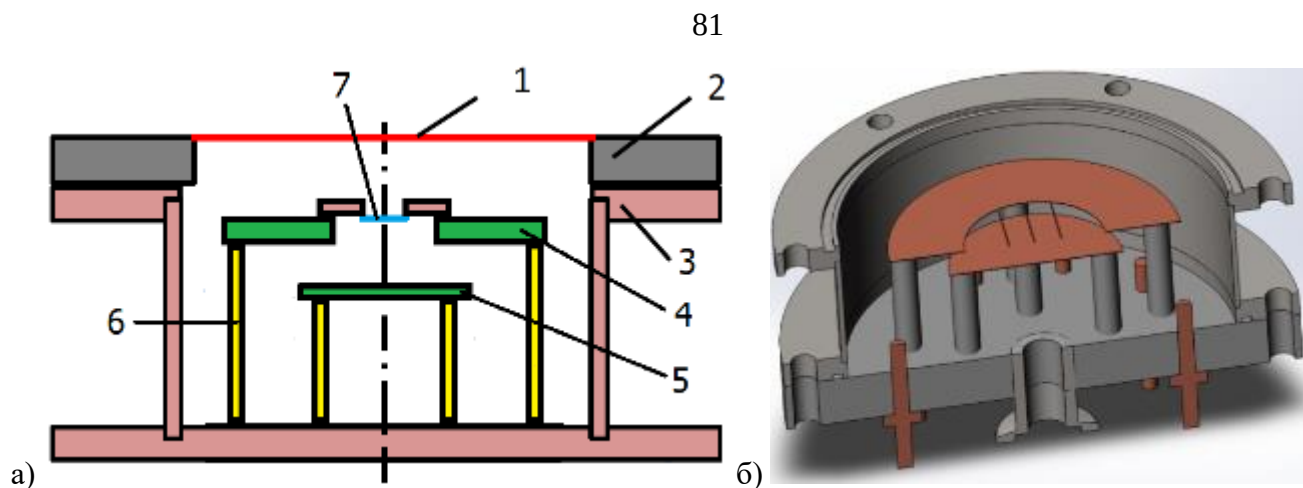


Рисунок 59 – Схема эксперимента с секционированным калориметром полного поглощения: мембрана выходного окна (Ti 60 мкм) (1); фланец выходного окна (2); камера калориметра (3); второй коллектор калориметра (4); первый коллектор калориметра (5); держатели из органического стекла; алюминиевая фольга (7)

Анализ отпечатков электронного пучка качественно показал распределение дозы в поперечном сечении (рисунок 60) после 5 импульсов [223] и наличие широкого энергетического спектра у сгенерированного ускорителем пучка. Пики на кривых доз представляют собой тени от нитей, на которых крепились алюминиевые мишени. Поскольку дозиметрическая пленка показывает только ту дозу, которую ионизирующее излучение сообщило, проходя через нее, а электроны в нашем пучке имеют существенную разницу в энергии, всё это делает невозможным вычисление полной энергии пучка с широким кинетическим спектром, проходящего через мишень, при помощи одной дозиметрической пленки. Поэтому для пучков с широким энергетическим спектром дозиметрическая пленка использовалась только в качестве индикатора наличия и размеров пучка удовлетворяющих размерам коллекторов цилиндра Фарадея и калориметра полного поглощения. Можно с уверенностью сказать, что электроны с максимальной кинетической энергией распределены в центральной области пучка, соответствующей размеру катода (рисунок 45, рисунок 60).

Ток электронного пучка, выведенный через выводное окно, был получен (рисунок 61) после прохождения алюминиевых мишеней различной толщины с помощью цилиндра Фарадея. Исследования проводились для двух условий: с титановой фольгой и без нее в выводном окне. Дисперсия амплитуды импульсов напряжения и тока пучка составляла менее 1 % для серии из 16 импульсов [173]. Для сравнительной оценки спектра кинетических энергий электронов значения выражали в относительных единицах. Результаты расчетов представлены на рисунок 62б. Полученные данные показывают, что пучок, сгенерированный ускорителем Астра-М, имеет широкий спектр кинетических энергий электронов и изменяется после титановой

фольги выходного окна. Около 70 % электронов в пучке имеют кинетическую энергию в 2 раза меньше (130 кВ) максимального ускоряющего напряжения (260 кВ). Эта ситуация существенно отличается от характеристик пучков непрерывных ускорителей, где подавляющее большинство электронов имеют энергию постоянно действующего ускоряющего напряжения [224–229].

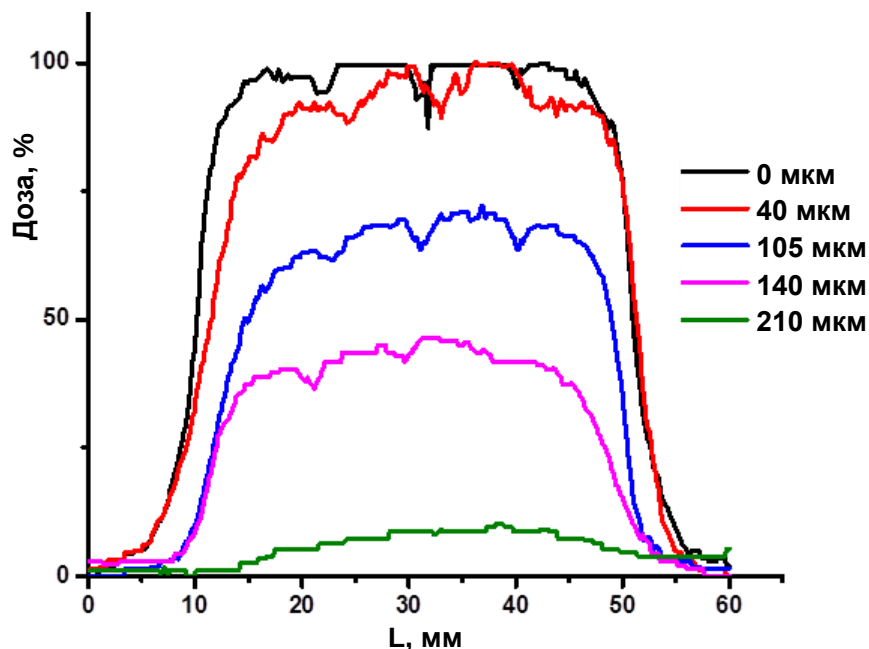


Рисунок 60 – Дозовое распределение в сечении на поверхности коллектора цилиндра Фарадея после мишени из алюминия

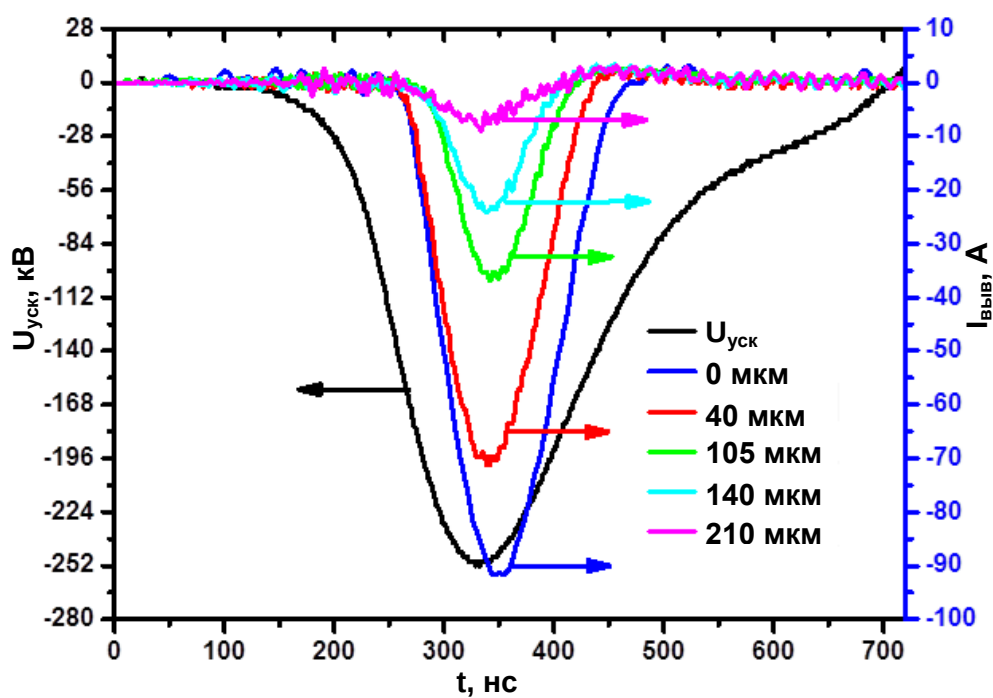


Рисунок 61 – Типичные осциллограммы ускоряющего напряжения ($U_{\text{уск}}$), тока ($I_{\text{выб}}$) цилиндра Фарадея после титановой фольги (60 мкм)

Калориметрия импульсного электронного пучка после прохождения алюминиевых мишеней представлена в таблице 2. Для мишени толщиной 210 мкм количество импульсов в серии было увеличено, для достижения минимального порога чувствительности датчика температуры. Погрешность измерения массы 0,1 мг. Изменение температуры в контролирующем коллекторе ($\Delta T_{\text{контроль}}$) калориметра показывает близкие параметры пучка (отклонение $\leq 10\%$) во всех экспериментах.

Таблица 2 – Калориметрия пучка после титановой фольги (60 мкм)

Толщина Al мишени, мкм	Вес Al мишени, мг	Количество импульсов	$\Delta T_{\text{изм}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{контроль}}, ^\circ\text{C}$	Е, Дж/имп
0	0	4	1,5	1,35	1,82
40	76,5	4	1	1,35	1,21
105	199,2	4	0,3	1,25	0,36
140	265,6	4	0,1	1,325	0,12
210	385,8	8	0,2	2,7	0,06

Зависимости распределения энергии пучка и числа электронов от толщины алюминиевой мишени показали, что $\sim 70\%$ электронов в пучке передают $\sim 80\%$ энергии всего пучка. Полученные результаты не противоречат результатам, описанным в литературе, и указывают на возможность использования электронного пучка с такими характеристиками для обработки поверхности материалов [158]. Уменьшение энергии электронов в ряде случаев приводит к положительным результатам при обработке биологических объектов [139].

С помощью отсечных фольг для цилиндра Фарадея и калориметра с двумя коллекторами может быть точно настроен вакуумный диод импульсного ускорителя электронов с широким спектром кинетической энергии электронов для обработки объектов. Дополнительный, периферийный коллектор калориметра для контроля изменений параметров пучка позволил повысить точность измерений параметров импульсного электронного пучка [218].

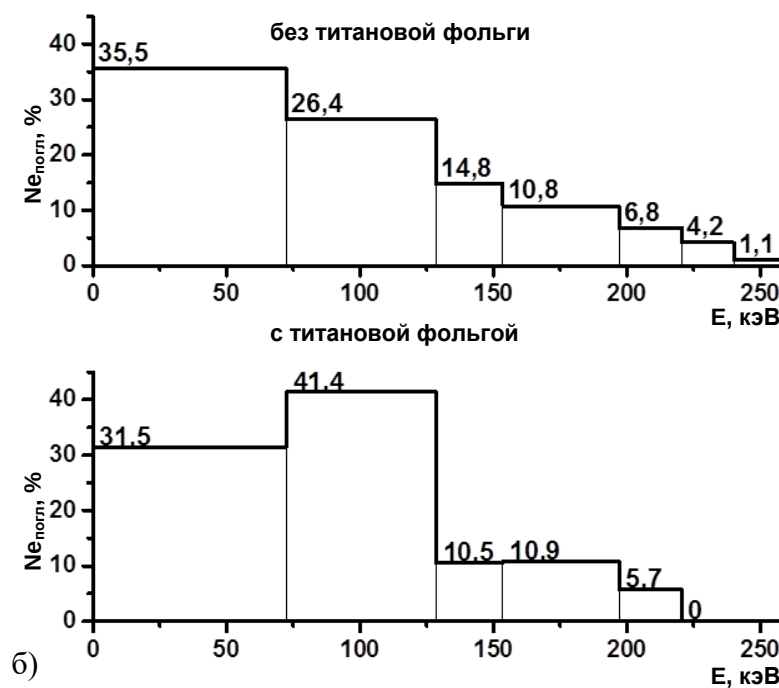
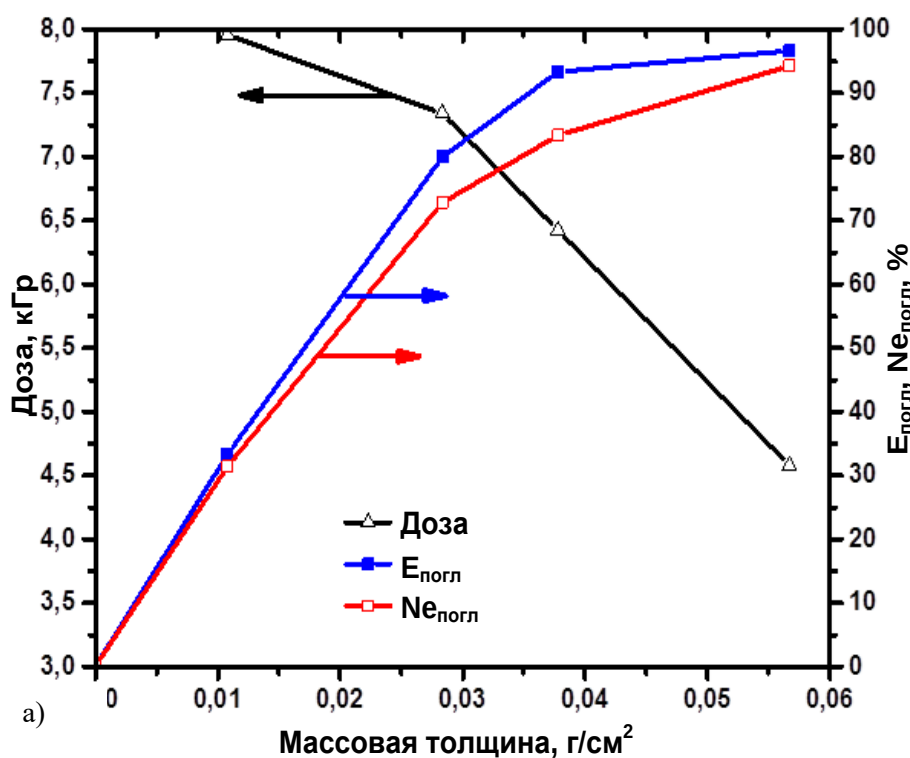


Рисунок 62 – Спектрометрия пучка: а) распределение поглощенной дозы по глубине (Доза), энергия пучка ($E_{\text{погл}}$) и количество электронов ($Ne_{\text{погл}}$) в алюминиевой мишени; б) восстановленный энергетический спектр электронного пучка до и после титановой фольги

5.3 Обеззараживание E.Coli в водной среде

Проведенные оценки спектра кинетических энергий электронов пучка и глубинного распределения дозы позволили произвести экспериментальную проверку эффекта

обеззараживания при заведомо неравномерном облучении водного раствора импульсным электронным пучком.

Обработка *E. coli* в водной (дистиллированная вода) среде проводилась в двух режимах: в алюминиевых кюветах и микропористых пленочных мембранах. Алюминиевые кюветы (рисунок 63а) позволили сформировать слой воды толщиной 400 мкм [147] и массой 70 мг, с помощью пищевой алюминиевой фольги (12 мкм). Поглощенная доза в этом режиме рассчитывалась как энерговклад в объем воды: вся энергия электронного пучка, падающего на площадь слоя воды, поглощается в этом объекте, тогда поглощенная доза порядка ≈ 3 кГр/имп. Мембраны [230] (рисунок 63б) после пропитки водным раствором с бактериями обеспечивали толщину обрабатываемого слоя 150 мкм при массе 130 мг.

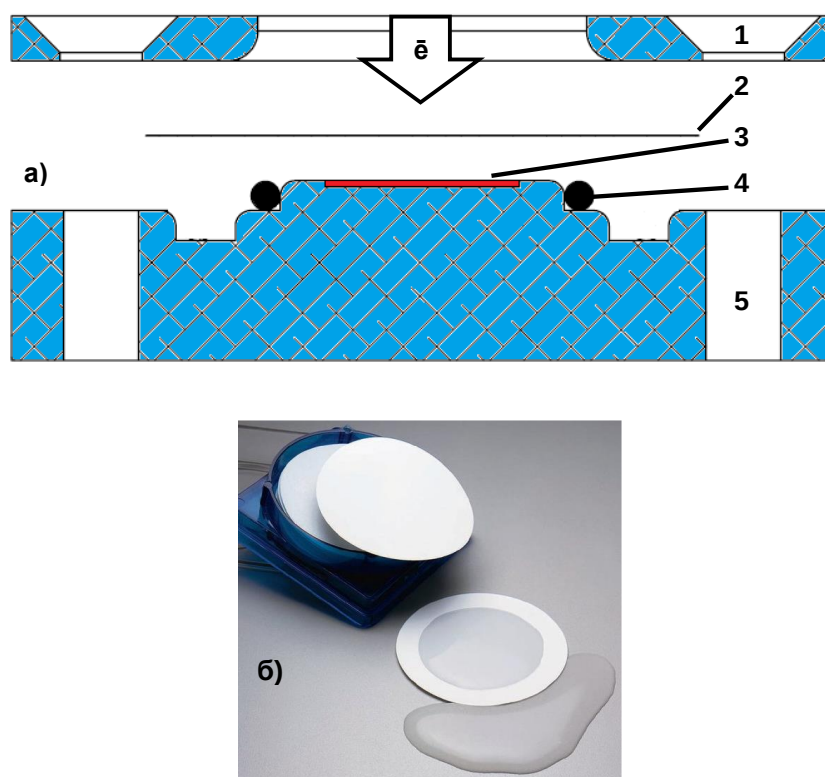


Рисунок 63 – Облучение водных растворов: а) алюминиевый реактор: 1 – прижимной фланец; 2 – фольга толщиной 12 мкм; 3 – слой воды; 4 – уплотнение; 5 – основание; б) микропористые пленочные мембраны

Поглощенная доза в этом случае рассчитывалась как отношение энергии пучка, поглощённой в мембране, к массе мембраны, энергию пучка измеряли с помощью калориметра полного поглощения, а средняя доза ≈ 3 кГр/имп. Облучение проводилось при частоте 1 имп./с, в условиях воздушной среды при атмосферном давлении и комнатной температуре. Бактерии пребывали в стационарной фазе роста для оценки максимальной дозы необходимой для обеззараживания, так как в этом состоянии они обладают наибольшей устойчивостью к

воздействию ионизирующего излучения и другим внешним факторам [7]. После облучения водная среда и мембраны помещались на питательную среду в стерильном шкафу на 24 часа, после чего измерялось количество КОЕ.

Для создания базы для сравнения, с использованием тех же самых кювет облучили весь объем воды с использованием ускорителя ТЭУ-500 с энергией частиц 400 кэВ и получили, что обеззараживание происходит уже при дозах ≈ 25 кГр [147].

Для оценки обеззараживающего характера от воздействия импульсного электронного пучка, экспериментальный стенд генерировал электронные пучки с широким спектром кинетических энергий электронов (рисунок 64), с максимальной энергией электронов 250 кэВ и средней 150 кэВ.

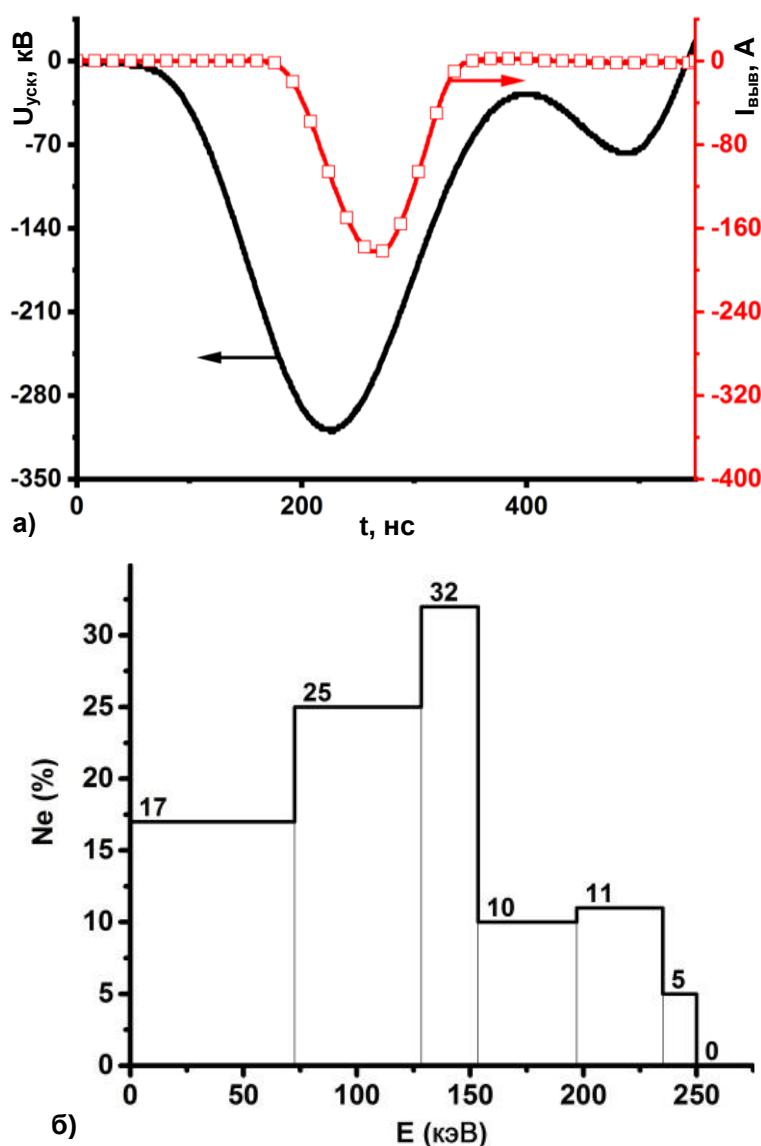


Рисунок 64 – Характеристики пучка электронов: а) типичные осциллограммы ускоряющего напряжения ($U_{\text{уск}}$); выведенного тока измеренного ($I_{\text{выв}}$) цилиндром Фарадея; б) спектр энергий электронов пучка

Электроны с такими энергиями имеют пробег в воде 625 мкм и 275 мкм, соответственно. Исходя из ранее полученных данных, 80 % энергии пучка поглотились в 275 мкм, а оставшиеся 20 % в слое от 275 до 625 мкм, поэтому слой воды в кювете от 275 до 400 мкм (толщина 125 мкм/ 31 % от общего объема) был облучен частично. Так же была проведена оценка необходимости обработки всего водного объема, содержащего бактерии с помощью мембран, пропитанных водным раствором с E.Coli. Распределение поглощенной дозы, энергии и электронов по глубине облучаемых мишеней представлены на рисунке 65.

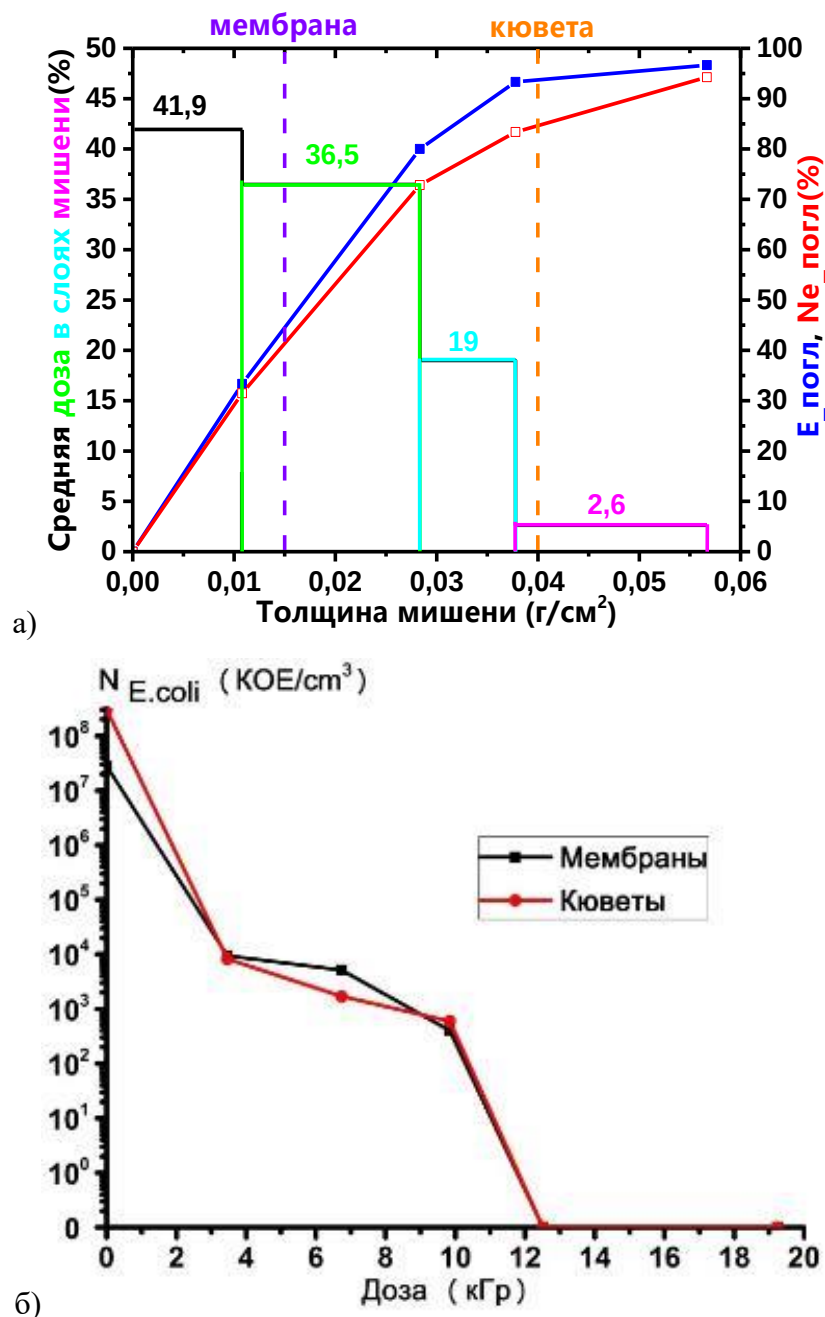


Рисунок 65 – Облучение водных растворов: а) распределение поглощенной дозы, энергии и электронов по глубине воды; б) концентрация микроорганизмов от поглощенной дозы

Полученные дозы [231] (рисунок 65) превышают литературные данные для источников постоянного ионизирующего излучения, примерно в 4 раза. Это может объясняться тем, что в нашем случае излучение воздействует на обрабатываемые организмы 150 нс/имп, а остальное время на организмы воздействуют радикалы, наработанные как внутри организмов, так и в среде, окружающей их. Факт того, что в процессе обеззараживания участвует радиационно-химический эффект от импульсного воздействия, подтверждается это тем, что когда толщина облучаемого слоя превышает средний пробег электронов в облучаемом веществе стерилизация всё равно происходит [231]. Полученные данные важны для выбора доз и режимов обработки водных растворов с целью обеззараживания.

Выводы

Предложенная комбинированная конструкция анодного узла с отдельной анодной решеткой и самонесущей мембраной при давлении 10^{-6} - 10^{-5} Торр, полученном с помощью криогенного насоса, продемонстрировала ресурс $>10^6$ импульсов электронного пучка длительностью ~ 150 нс, средней энергией ~ 250 кэВ и частотой 40 имп./с без видимых признаков разрушения.

С помощью показанного метода оценки распределения энергии по глубине для импульсного электронного пучка с широким спектром кинетической энергии электронов определили, что сгенерированный электронный пучок, выведенный в атмосферу, состоит из электронов с кинетической энергией (≤ 130 кэВ, 73 %), в 2 раза меньшей максимального ускоряющего напряжения (260 кВ). Кроме того, эта доля электронов передает около 80 % энергии всего пучка. Электроны с максимальной кинетической энергией распределены в центральной области пучка.

Измерили влияние поглощенной дозы на концентрацию *E. Coli* (10^8 КОЕ/мл) в вводимом растворе и мембранных фильтрах при однородности облучения 6% и 87% соответственно (по соотношению $D_{\min}/D_{\max}$).

Заключение

Поставленная цель по минимизации факторов, ограничивающих работоспособность и надежность вакуумного диода электронного ускорителя субмикросекундной длительности на основе импульсного трансформатора со скоростью нарастания импульса ускоряющего напряжения $\approx 2,5 \cdot 10^{12}$ В/с с выпуском пучка в атмосферу для практического применения, успешно реализована при оптимизации как конструктивных элементов самого устройства, так и режимов его работы.

Основные результаты работы:

1. На основе литературного обзора были определены основные факторы, влияющие на работоспособность и надежность узлов (высоковольтный изолятор, катод, анодный узел) вакуумного диода электронного ускорителя субмикросекундной длительности (500 нс) и предложены способы минимизации влияния данных факторов.;

2. Разработан стенд с емкостным накопителем энергии, коммутируемым псевдоискровым разрядником в режиме самопробоя, обеспечивающий высокую стабильность параметров (разброс напряжения срабатывания < 1 %) выходного импульса напряжения при частоте ≤ 40 имп./с;

3. Предложен и реализован способ распределения напряжения по высоковольтному секционированному изолятору вакуумного диода с помощью гальванической связи витков импульсного трансформатора с градиентными кольцами изолятора, обеспечивающий равномерное распределение (отклонение от равномерного распределения $\approx 3,4$ %) напряжения по изолятору на всей длительности импульса ускоряющего напряжения (500 нс);

4. Экспериментально исследована стабильность параметров вакуумного электронного диода со взрывоэмиссионными катодами из разных материалов: металлокерамика ($\text{BaTiO}_3 + \text{Cu}$, пропорция 1:1), пористая медь (пористость 50 %), углеродные трубки ($D_{\text{внеш}} \approx 2$ мм, $D_{\text{внутр}} \approx 1$ мм), углеродное волокно (Урал ТМ-4-22); в импульсном ускорителе на основе импульсного трансформатора с емкостным накопителем энергии в длительных частотных режимах работы, наибольшую стабильность параметров показал планарный катод на основе углеродного волокна (при частоте 15 имп./с и ток в диоде уменьшился на 25 % за $\approx 1,1 \cdot 10^5$ импульсов);

5. Разработана конструкция выпускного окна с анодной решеткой, отделенной вакуумным зазором от самонесущей выводной мембраны, экспериментально показавшая ресурс $> 1,5 \cdot 10^6$ импульсов электронного пучка длительностью выведенного тока ≈ 150 нс, средней энергией электронов ≈ 150 кэВ и частотой 40 имп./с;

6. Методом отсечных фольг определён энергетический спектр пучка электронов ($E_{\text{ср}} \approx 150$ кэВ, $E_{\text{max}} \leq 250$ кэВ) и измерено глубинно-дозовое распределение пучка в алюминиевой мишени;

7. Измеряя влияние поглощенной дозы на концентрацию *E. Coli* (10^8 КОЕ/мл) в вводимом растворе и мембранных фильтрах при однородности облучения 6% и 87% соответственно (по соотношению $D_{\text{min}}/D_{\text{max}}$) установили, что определяющее значение имеет средняя доза, а это говорит об определяющей степени влияния радиационно-стимулированных химических процессов при обеззараживании водных растворов электронным пучком субмикросекундной длительности с широким энергетическим спектром ($E_{\text{ср}} \approx 150$ кэВ, $E_{\text{max}} \leq 250$ кэВ).

Список сокращений и условных обозначений

CVD – емкостный делитель напряжения;
DCS – источник постоянного напряжения;
 $D_{\min}$ – минимальное значение поглощенной дозы;
 $D_{\max}$ – максимальное значение поглощенной дозы;
 E_{ave} – средняя напряженность электрического поля;
 $E_{\max}$ – максимальная энергия электронов в пучке;
 $E_{\text{ср}}$ – средняя энергия электронов в пучке;
FC – цилиндр Фарадея;
 I_b – электронный ток, выведенный в атмосферу;
 I_d – полный ток в диоде;
RC – пояс Роговского;
RVD – омический делитель напряжения;
STS – система запуска высоковольтного разрядника;
 U_{acc} – ускоряющее напряжение;
VD – вакуумный диод;
д.ф.л – двойная формирующая линия.

Список литературы

1. Пикаев А.К. Экологические применения радиационной технологии (Обзор) // Химия высоких энергий. – 1994. – № 1 (28). – С. 5–16.
2. Месяц Г.А. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии: сборник научных статей // Академия наук СССР (АН СССР), Сибирское отделение (СО), Институт сильноточной электроники (ИСЭ). – 1983. – 168 с.
3. Диденко А.Н., Григорьев В.Н., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. Москва: Атомиздат, 1977. 280 с.
4. Соковнин С.Ю. Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 225 с.
5. Ремнёв Г.Е. Радиационно-пучковые технологии. Учебное пособие для студентов направления 140200 «Электроэнергетика». Томск: Томский Политехнический Университет, 2008. 269 с.
6. Соковнин С.Ю. Наносекундные ускорители электронов для радиационных технологий. Екатеринбург: Уральский ГАУ, 2017. 348 с.
7. Туманян М.А., Каушанский Д.А. Радиационная стерилизация. Москва: Медицина, 1974. 304 с.
8. Ускорители электронов серии ЭЛВ // Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН : сайт. - 2020. - URL: https://inp.nsk.su/~tararysh/accel/elv_r.html (дата обращения: 20.02.2020).
9. Salimov, R.A. D.C. high power electron accelerators of ELV-series: status, development, applications / R.A. Salimov, V.G. Cherepkov, J.I. Golubenko, G.S. Krainov, B.M. Korabelnikov, S.A. Kuznetsov, N.K. Kuksanov, A.B. Malinin, P.I. Nemytov, S.E. Petrov, V.V. Prudnikov, S.N. Fadeev, M.E. Veis // Radiat. Phys. Chem. Pergamon. – 2000. – Vol. 57, N 3–6. – P. 661–665.
10. Ауслендер, В.Л. Импульсные линейные ускорители электронов серии ИЛУ производства Института Ядерной Физики им.Будкера / В.Л. Ауслендер, В.В. Безуглов, А.А. Брызгин, Л.А. Воронин, В.А. Горбунов, М.В. Коробейников, В.Е. Нехаев, А.Д. Панфилов, В.С. Подобаев, В.О. Ткаченко, А.А. Тувик, Б.Л. Факторович // Вестник НГУ. – 2006. – № 2 (1). – С. 89–97.
11. Брызгин, А.А. Стерилизация медицинских изделий на ускорителях серии ИЛУ / А.А. Брызгина, Л.А. Воронина, В.О. Ткаченко, А.Н. Лукина, В.Е. Нехаева, А.Д. Панфилова, В.М. Радченко, Б.Л. Факторовича, Е.А. Штарклева, В.В. Безуглова, А.Ю. Власова, М.В. Коробейникова // Медицинская Физика. – 2017. – (2). – С. 57–60.
12. Auslender, V.L. Accelerators for E-beam and X-ray processing / V.L Auslender, A.A Bryazgin, B.L Faktorovich, V.A Gorbunov, E.N Kokin, M.V Korobeinikov, G.S Krainov, A.N Lukin, S.A Maximov, V.E Nekhaev, A.D Panfilov, V.N Radchenko, V.O Tkachenko, A.A Tuvik, L.A Voronin // Radiat. Phys. Chem. – 2002. – Vol. 63, N 3–6. – P. 613–615.
13. Ускорители электронов серии ИЛУ // Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН : сайт. - 2020. - URL: https://inp.nsk.su/~tararysh/accel/ilu_r.html (дата обращения: 20.02.2020).
14. Комлев А.С. Ускорители электронов для радиационно-термической технологии получения ферритовой керамики // Таврический научный обозреватель. – 2016. – (12). – С. 142–145.
15. Соковнин С.Ю. Диссертация на соискании степени доктора технических наук «Наносекундные ускорители электронов и технологии на их основе». Диссертаци-е изд., Екатеринбург: Уральский ГАУ, 2005. 225 с.
16. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов, Москва, 1991. 224 с.
17. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме, Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
18. Месяц Г.А. Взрывная электронная эмиссия, Издательство физико-математической

- литературы (РФФИ), 2011. 276 с.
19. Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения, Москва: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
 20. Gunin, A.V. Experimental studies of long-lifetime cold cathodes for high-power microwave oscillators / A.V. Gunin, V.F. Landl, S.D. Korovin, G.A. Mesyats, I.V. Pegel, V.V. Rostov // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2000. – Vol. 28, N3. – P. 537–541.
 21. Kotov, Yu.A. Megavolt repetitive high average power electron beam accelerator Ruslan / Yu.A. Kotov, G.A. Mesyats, S.N. Rukin, A.L. Filatov, B.G. Slovikovskii, S.P. Timoshenkov, A.I. Bushl // Ninth IEEE International Pulsed Power Conference. – 1993. – P. 151–155.
 22. Kotov, Yu.A. Using a high-current electron beam to generate ozone / Y.A. Kotov, S.Y. Sokovnin, A.L. Filatov // Digest of Technical Papers-IEEE International Pulsed Power Conference. – 1995. – Vol. 2. – P. 1239–1242.
 23. Korovin, S.D. High-current nanosecond pulse-periodic electron accelerators utilizing a tesla transformer / S.D. Korovin, V.V. Rostov // Russ. Phys. J. – 1996. – Vol. 39, N 12. – P. 1177–1185.
 24. Коровин, С.Д., Сильноточные наносекундные импульсно-периодические ускорители электронов на основе трансформаторов Тесла / С.Д. Коровин, В.В. Ростов // Известия вузов. Физика. – 1996. – № 12. – С. 21–30.
 25. Ельчанинов, А.С. Ускорители сильноточных электронных пучков с высокой частотой следования импульсов / А.С. Ельчанинов, Ф.Я. Загулов, С.Д. Коровин, В.Ф. Ландль, В.В. Лопатина, Г.А. Месяца // Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии. – 1983. – С. 5–21.
 26. Peng, J.C. A high repetitive rate intense electron beam accelerator based on high coupling Tesla transformer / J.C. Peng, G.Z. Liu, X.X. Song, J.C. Su // Laser Part. Beams. – 2011. – Vol. 29, N 1. – P. 55–60.
 27. Zhang, Z. A compact repetitive high energy-density accelerator HEART-20 based on propylene carbonate pulse forming line / Z. Zhang, S. Liu, H. Yang, D. Li, Y. Fan, J. Zhang // Rev. Sci. Instrum. – 2022. – Vol. 93, N 10. – P. 104703.
 28. Mesyats, G.A. The RADAN series of compact pulsed power Generators and their applications / G.A. Mesyats, S.D. Korovin, V.V. Rostov, V.G. Shpak, M.I. Yalandin // Proceedings of the IEEE. – 2004. – Vol. 92, N 7. – P. 1166–1179.
 29. Шпак, В.Г. Малогабаритный сильноточный импульсный источник РАДАН СЭФ-303А / В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Приборы и техника эксперимента. – 1993. – № 1. – С. 149–155.
 30. Яландин, М.И. Мощные малогабаритные импульсно-периодические генераторы субнаносекундного диапазона (обзор) / М.И. Яландин, В.Г. Шпак // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 3. – С. 5–31.
 31. Быков, Н.М. Сильноточный импульсно-периодический ускоритель электронов с высокой стабильностью параметров электронного пучка / Н.М. Быкова, В.П. Губанова, А.В. Гунина и др. // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – № 1. – С. 37–39.
 32. Remnev, G.E. High-current Pulsed Accelerator with Matching Transformer: Construction and Exploitation Characteristics / G.E. Remnev, E.G. Furman, A.I. Pushkarev, N.A. Kondratiev, D.V. Goncharov // Trans. Inst. Electr. Eng. Japan. A. – 2004. – Vol. 124, N 6. – P. 491–495.
 33. Ремнев, Г.Е. Источник импульсных электронных и ионных пучков на основе наносекундного генератора напряжения с согласующим трансформатором / Г.Е. Ремнев, А.И. Пушкарев, Э.Г. Фурман, В.В. Ежов, Д.В. Гончаров, В.С. Лопатин, А.В. Степанов, В.А. Макеев, В.И. Гусельников, Ц.Ф. Ли // Известия Томского Политехнического Университета. – 2006. – Т. 309, № 2. – С. 88–93.
 34. Канаев, Г.Г. Инжектор электронного пучка / Г.Г. Канаев, Э.Г. Фурман // Приборы и техника эксперимента. – 1991. – № 5. – С. 133–136.

35. Schneider, L.X. Repetitive high energy pulsed power technology development for industrial applications / L.X. Schneider, K.W. Reed, R.J. Kaye // AIP Conf. Proc. – 1997. – Vol. 392. – P. 1085–1088.
36. Ежов, В.В. Защита анодной фольги сильноточного ускорителя электронов от повреждения дуговыми разрядами / В.В. Ежов, Е.В. Крастелев, Г.Е. Ремнев // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 15, № 35. – С. 91–96.
37. Nashilevskiy, A. A high repetition rate electron accelerator with a water Blumlein and a matching transformer / A. Nashilevskiy, I. Egorov, D. Ponomarev, V. Ezhov, G. Kholodnaya, G. Remnev // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. – 2020. – Vol. 959 – P. 163565.
38. Egorov, I.S. Repetitive source of pulsed electron beams / I.S. Egorov, G.E. Remnev, M.I. Kaikanov, E.I. Lukonin, V.S. Esipov, A.V. Poloskov, D.Yu. Kolokolov // Izvestiya Vuzov. Fizika. – 2012. – Vol. 55, N 10-3. – P. 58-60.
39. Poloskov, A. Submicrosecond electron accelerator based on pulsed transformer / A. Poloskov, I. Egorov, A. Nashilevskiy, V. Ezhov, E. Smolyanskiy, M. Serebrennikov, G. Rennev // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. – Elsevier Ltd. – 2020. – Vol. 969. – P. 163951. doi: 10.1016/j.nima.2020.163951.
40. Kotov, Yu.A. YPT-0.5 repetitive-pulse nanosecond electron accelerator / Yu.A. Kotov, S.Yu. Sokovnin, M.E. Balezin // Instruments Exp. Tech. – 2000. – Vol. 43, № 1. – P. 102–105.
41. Sokovnin, S.Yu. Frequency nanosecond electron accelerators type URT / S.Yu. Sokovnin, Yu.A. Kotov, M.E. Balezin // Proceedings - International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – IEEE. – 2004. – Vol. 2. – P. 537–540.
42. Вагнер, М.И. Исследование характеристик планарного диода с композиционным катодом / М.И. Вагнер, И.С. Егоров, М.И. Кайканов, Г.А. Прибытков, Г.Е. Ремнев, А.П. Савицкий, А.В. Степанов // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54, № 11/3. – С. 80–85.
43. Kotov, Yu.A. Properties of a metal-ceramic cathode / Yu.A. Kotov, S.Yu. Sokovnin, M.E. Balezin // Tech. Phys. – 2003. – Vol. 48, N 4. – P. 503–507.
44. Kotov, Yu.A. Compact repetitive electron-beam and X-radiation generator. Part 1; a desktop generator; Part 2; a hand-carried X-ray apparatus / Yu.A. Kotov, G.A. Mesyats, S.R. Korzhenevskii, V.A. Motovilov, S.N. Rukin, V.A. Scotnikov, A.L. Filatov // Digest of Technical Papers. – Tenth IEEE International Pulsed Power Conference. – 1995. – Vol. 2. – P. 1231–1238.
45. Загулов, Ф.Я. Сильноточный наносекундный ускоритель электронов с полупроводниковым прерывателем тока / Ф.Я. Загулов, В.В. Кладухин, Д.Л. Кузнецов и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2000. – № 5. – С. 71–76.
46. Тарасенко, В.Ф. Субнаносекундные пучки электронов, сформированные в газовом диоде / В.Ф. Тарасенко, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин, В.М. Орловский, С.Б. Алексеев // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 21, №29. – С. 1–6.
47. Sokovnin, S.Yu. Repetitive nanosecond electron accelerators type URT-1 for radiation technology / S.Yu. Sokovnin, M.E. Balezin // Radiat. Phys. Chem. – 2018. – Vol. 144. – P. 265–270.
48. Котов, Ю.А. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,5 / Ю.А. Котов, С.Ю. Соковнин, М.Е. Балезин // Приборы и техника эксперимента. – 2000. – № 1. – С. 112–115.
49. Котов, Ю.А. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,2 / Ю.А. Котов, С.Ю. Соковнин // Приборы и техника эксперимента. – 1997. – № 4. – С. 84–86.
50. Vorob'ev, G.A. Electric breakdown in solid dielectrics / G.A. Vorob'ev, N.S. Nesmelov // Sov. Phys. J. 1979. – Vol. 22, № 1. – P. 70–80.
51. Smirnov, I.V. Experimental Analysis on Electrical Breakdown of Acrylic VHB Tape under Quasi-Static and Pulsed Voltage / I.V. Smirnov, R. Springhetti, V.A. Morozov, A.A. Lukin // Tech. Phys. 2018. – Vol. 63, N 1. – P. 152–154.

52. Milton, O. Pulsed Flashover of Insulators in Vacuum / O. Milton // IEEE Trans. Electr. Insul. – 1972. – Vol. EI-7, N 1. – P. 9–15.
53. Miller, H.C. Flashover of insulators in vacuum: the last twenty years / H.C. Miller // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. – 2015. – Vol. 22, № 6. – P. 3641–3657.
54. Pillai, A.S. Surface flashover of solid dielectric in vacuum / A.S. Pillai, R. Hackam // J. Appl. Phys. – 1982. – Vol. 53, N 4. – P. 2983–2987.
55. Pillai, A.S. Surface flashover of solid insulators in atmospheric air and in vacuum / A.S. Pillai, R. Hackam // J. Appl. Phys. – 1985. – Vol. 58, N 1. – P. 146–153.
56. Тарасова, Л. В. Современные представления о механизме электрического пробоя в высоком вакууме / Л.В. Тарасова // Успехи физических наук. – 1956г. Февраль – Т. LVIII. № 2. – С. 321–346.
57. Zhong, H.H. Time Characteristics of Fast Pulsed Flashover in Vacuum / H.H. Zhong, M. Gollor, H.C. Kärner // IEEE Trans. Electr. Insul. – 1993. – Vol. 28, N 1. – P. 157–159.
58. Кассиров Г. М. Изоляционные свойства технического вакуума при мегавольтном уровне напряжения // Томск: Научно-исследовательский институт высоких напряжений, 1990.
59. Авдиенко, А.А. Выделение газа с поверхности изоляторов в сильном электрическом поле в вакууме / А.А. Авдиенко, А.В. Киселев // Журнал технической физики. – 1967. – Т. 37, № 3. – С. 533–537.
60. Каляцкий, И.И. Исследование импульсного перекрытия некоторых твердых диэлектриков в вакууме / И.И. Каляцкий, Г.М. Кассиров // Журнал технической физики. – 1964. – Т. 34, № 8. – С. 1471–1475.
61. Сливков И. Н. Электроизоляция и разряд в вакууме // Атомиздат, 1972.
62. Holse, T. // T. Trans. 9-th Nat. Vac. Symp. Am. Vac. Soc. Los.Angeles. – 1962. – P. 376.
63. Каляцкий, И.И. Исследование влияния материалов электродов на импульсную электрическую прочность высоковакуумного промежутка / И.И. Каляцкий, Г.М. Кассиров // Журнал технической физики. – 1964. – Т. 34, № 2. – С. 349–351.
64. Олендзкая, Н.Б. Влияние площади поверхности электродов на напряжение пробоя // Пробой диэлектриков и полупроводников. – Томск. – 1964. – P. 82–86.
65. Покровская-Соболева, А.С. Влияние кондиционирования электродов на электрическую прочность вакуумного промежутка / А.С. Покровская-Соболева, Т.С. Борисова, Л.К. Мазурова // Журнал технической физики. – 1971. – Т. 41, № 11. – С. 2362–2367.
66. Pushkarev, A.I. Investigation of magnetically self-insulated effect in an ion diode with an explosive emission potential electrode / A.I. Pushkarev, J. Isakova, M. Saltymakov, R.V. Sazonov // Phys. Plasmas. – 2010. – Vol. 17, № 1. – P. 013104.
67. Месхи, Г.О. Электронная пушка с холодноэмиссионным катодом / Г.О. Месхи, Б.Н. Яблоков // Труды 2-ого всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. – 1972. – Т. 1. – С. 90–92.
68. Казанский, Л.Н. Сильноточный электронный ускоритель «Импульс» / Л.Н. Казанский, А.А. Коломенский, Г.О. Месхи, Б.Н. Яблокова // Атомная энергия. – 1977. – Т. 42, № 2. – С. 113–119.
69. Miller, H.C. Flashover of insulators in vacuum: review of the phenomena and techniques to improved holdoff voltage // IEEE Trans. Electr. Insul. – 1993. – Vol. 28, N 4. – P. 512–527.
70. Egorov, I. Self-bearing membrane exit window with the separate anode for sub-microsecond electron accelerator / I. Egorov, A. Poloskov, M. Serebrennikov, G. Remnev // Vacuum. – Elsevier Ltd. – 2020. – Vol. 173. – 109111. doi: 10.1016/j.vacuum.2019.109111
71. Kotov, Yu.A. Vacuum insulator with shielded dielectric surface. / Yu.A. Kotov, N.E. Rodionov, V.P. Sergienko, S.Yu. Sokovnin, A.L. Filatov // Instruments Exp. Tech. – New York. – 1986. – Vol. 29, N 2 pt 2.
72. Martin, T.H. Pulsed microsecond high-energy electron beam accelerator / T.H. Martin, R.S. Clark // Rev. Sci. Instrum. – 1976. – Vol. 47, N 4. – P. 460–463.

73. Volkov, S.N. A Vacuum Feedthrough Insulator at a Voltage of ~ 1 MV / S.N. Volkov, A.A. Zherlitsyn, B.M. Koval'chuk, S.V. Loginov, I.V. Pegel' // Instruments Exp. Tech. Orig. Russ. Text. – 2003. – Vol. 46, N 5. – P. 656–659.
74. Marciniak, B. Comparison of influence of gamma rays and E-beam on some chloramphenicol derivatives / B. Marciniak, M. Stawny, E. Jaroszkiewicz // Curr. Anal. Chem. – 2012. – Vol. 8, N 3. – P. 337–343.
75. Fifield, L.S. Direct comparison of gamma, electron beam and X-ray irradiation effects on single-use blood collection devices with plastic components / L.S. Fifield, M. Pharr, D. Staack, S.D. Pillai, L. Nichols, J. McCoy, T. Faucette, T. Bisel, M. Huang, M. K. Hasan, L. Perkins, S.K. Cooley, M.K. Murphy // Radiat. Phys. Chem. – Elsevier Ltd. – 2021. – Vol. 180, N 4. – P. 109282.
76. Vintzenko, L.G. High-voltage vacuum lead-in // Instruments and experimental techniques. – 1985. – Vol. 28, N 6. – P. 1380–1381
77. Lyons, B.J. Transmission window for particle accelerator / B.J. Lyons, M.N. Schuetz, D.A. Vroom // United States Patent 5,416,440. – 1995.
78. Anevskii, S.I. Low-inductive accelerating tube for heavy-current electron-accelerators / S.I. Anevskii, V.I. Liksonov, Y.L. Sidorov, V.P. Smirnov // Prib. i Tekhnika Eksp. – 1975. – N 5. – P. 19–21.
79. Патент № 2556879 Российская Федерация, МПК H01B 17/26 (2006.01). Способ изготовления проходного вакуумного изолятора высокого напряжения : №2014108628/07 : заявлено 05.03.2014 : опубликовано 20.07.2015 / Смирнов Г.В. ; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - 11 с. : 2 ил.
80. Патент № 2582588 Российская Федерация, МПК H05H 3/06 (2006.01). Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией : №2014139866/07 : заявлено 01.10.2014 : опубликовано 20.04.2016 / Таскаев С. Ю., Сорокин И. Н. ; заявитель и патентообладатель Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН. - 9 с. : 2 ил.
81. Sorokin, I. A new concept of a vacuum insulation tandem accelerator / I. Sorokin, S. Taskaev // Appl. Radiat. Isot. – 2015. – Vol. 106. – P. 101–103.
82. Патент № 2593827 Российская Федерация, МПК H01B 17/26 (2006.01). Способ изготовления проходного вакуумного изолятора высокого напряжения : №2015108570/07 : заявлено 11.03.2015 : опубликовано 10.08.2016 / Смирнов Г. В., Смирнов Д. Г. ; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - 16 с. : 4 ил.
83. Kotov, Yu.A. Vacuum Insulator With Shielded Dielectric Surface. / Yu.A. Kotov, N.E. Rodionov, V.P. Sergienko, S.Yu. Sokovnin, A.L. Filatov // Instruments and experimental techniques. – 1986. – Vol. 29, N 2 pt 2. – P. 415–418.
84. Абрамян Е.А., Альтеркоп Б.А., Кулешов Г.Д. Интенсивные электронные пучки // Энергоатом-е изд., Москва, 1984. 232 с.
85. Bykov, N.M. Development of long-lifetime cold cathodes / N.M. Bykov, V.P. Gubanov, A. Gunin, S.D. Korovin, O.P. Kutenkov, V.F. Landl, S.D. Polevin, V.V. Rostov, G.A. Mesyats, F.Ya. Zagulov // Dig. Tech. Pap. Int. Pulsed Power Conf. – 1995. – Vol. 1. – P. 71–74.
86. Nefedtsev, E. Marks on single-crystal copper cathodes after short-pulse voltage impact on vacuum gaps / E. Nefedtsev, S. Onischenko // Proc. - 2020 7th Int. Congr. Energy Fluxes Radiat. Eff. – 2020. – P. 927–931.
87. Sokovnin, S.Yu. Investigation of cold cathode for nanosecond electron accelerators / S.Yu. Sokovnin, M.E. Balezin // Vacuum. – 2017. – Vol. 146. – P. 79–86.
88. Krasik, Y.E. Emission properties of different cathodes at $e \leq 10^5$ V/cm / Y.E. Krasik, A. Dunaevsky, A. Krokhmal, J. Felsteiner, A. Gunin, I.V. Pegel, S.D. Korovin // J. Appl. Phys. 2001. – Vol. 89, N 4. – P. 2379–2399.

89. Kutenkov, O.P. Explosive Emission Cathode Based on a Carbon Fiber for Long-Term Pulsed-Periodic Mode of Operation and its Application in a High-Power Microwave Pulse Generator Without External Magnetic Field / O.P. Kutenkov, I.V. Pegel, E.M. Totmeninov // *Russ. Phys. J.* – 2014. – Vol. 57, N 5. – P. 565–572.
90. An, C. Experimental Generation of 1.1-kA Gyating Electron Beam Current from an Explosive Emission Cathode Magnetron Injection Gun / C. An, D. Zhang, J. Zhang, Y. Fan, J. Gao, A. Li, J. He, H. Zhong // *IEEE Trans. Electron Devices.* – 2021. – Vol. 68, N 9. – P. 4664–4668.
91. Buldakov, M.A. 2031 POSTER Low-dose Pulsed X-ray Antitumour Efficacy at the Model of Lewis Lung Carcinoma / M.A. Buldakov, I.A. Klimov, N. Litviakov, N. Cherdyntseva, O.R. Kutenkov, M.A. Bolshakov, V.V. Rostov // *Eur. J. Cancer. Pergamon.* – 2011. – Vol. 47. – P. S197.
92. Litz, M.S. Rep-rate explosive whisker emission cathode investigations / M.S. Litz, J. Golden // *Intense Microw. Pulses II.* – 1994. – Vol. 2154, N May 1994. – P. 110–117.
93. Korenev, S.A. Explosive-emission cathode based on carbon-fiber plastic / S.A. Korenev, A.M. Baranov, S.V. Kostyuchenko, N.M. Chernenko // *Instruments Exp. Tech. New York.* – 1990. – N 32.
94. Parson, J.M. Emission behavior of three conditioned carbon fiber cathode types in UHV-sealed tubes at 200 A/cm² / J.M. Parson, C.F. Lynn, J.J. Mankowski, A.A. Neuber, J.C. Dickens // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2014. – Vol. 42, N 12. – P. 3982–3988.
95. Garate, E. Novel cathode for field-emission applications / E. Garate, R.D. McWilliams, D.E. Voss, A.L. Lovesee, K.J. Hendricks, T.A. Spencer, M.C. Clark, A. Fisher // *Rev. Sci. Instrum.* – 1995. – Vol. 66, N 3. – P. 2528–2532.
96. Benford, J. Lowered plasma velocity with cesium iodide/carbon fiber cathodes at high electric fields / J. Benford, D. Price, W. DeHope // *BEAMS 1998 - Proc. 12th Int. Conf. High-Power Part. Beams.* – 1998. – Vol. 2. – P. 695–698.
97. Pereira, N.R. Slower impedance collapse with hot anode and enhanced emission cathode // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 1999. – Vol. 27, N 4. – P. 1169–1174.
98. Shiffler, D.A. Emission uniformity and emittance of explosive field-emission cathodes / D.A. Shiffler, M. Ruebush, D. Zagar, M. LaCour, K. Golby, M.C. Collins Clark, M.D. Haworth, R. Umstattd // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2002. – Vol. 30, N 4. II – P. 1592–1596.
99. Shiffler, D. Cathode and anode plasmas in short-pulse explosive field emission cathodes / D. Shiffler, M. Ruebush, D. Zagar, M. LaCour, M. Sena, K. Golby, M. Haworth, R. Umstattd // *J. Appl. Phys.* – 2002. – Vol. 91, N 9. – P. 5599–5603.
100. Umstattd, R.J. Gas evolution during operation of a CsI-coated carbon fiber cathode in a closed vacuum system / R.J. Umstattd, C.A. Schlise, F. Wang // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2005. – Vol. 33, N 2. III. – P. 901–910.
101. Simimol, A. Electrodeposition of Cesium for Efficient Explosive Emission Carbon Fiber Cathodes / A. Simimol, S.P. Kumar, S. Kumar, M.K. Das, A.L. Alex, S. Khandekar, U. Shanmuganathan, M. Ravi // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2019. – Vol. 47, N 8. – P. 4006–4011.
102. Li, Z. Cold atmospheric pressure plasma jet prepares TiO₂coating on carbon fibre for field emission and explosive electron emission / Z. Li, G.Z. Ma, L. Li, Q. Tang // *J. Phys. D. Appl. Phys.* – 2021. – Vol. 54, N 41. – P. 415201
103. Krasik, Y.E. Intense electron emission from carbon fiber cathodes / Y.E. Krasik, A. Dunaevsky, J. Felsteiner // *Eur. Phys. J. D.* – 2001. – Vol. 15, N 3. – P. 345–348.
104. Li, L. Microstructure changes of cathodes after electron emission in high power diodes / L. Li, L. Liu, J. Wen // *J. Phys. D. Appl. Phys.* – 2007. – Vol. 40, N 17. – P. 5338–5343.
105. Martins, M.N. Electron accelerators: History, applications, and perspectives / M.N. Martins, T.F. Silva // *Radiat. Phys. Chem.* – 2014. – Vol. 95. – P. 78–85.
106. Clemmons, H.E. Electron beam processing technology for food processing / H.E. Clemmons, E.J. Clemmons, E.J. Brown // *Electron Beam Pasteurization and Complementary Food Processing Technologies.* – Woodhead Publishing Limited. – 2015. – P. 11–25.

107. Drobny, J.G. Industrial Applications of Ionizing Radiation // *Ionizing Radiation and Polymers*. – 2013. – P. 149–212.
108. Cleland, M.R. Industrial applications of electron accelerators // *CAS 2005 – Cern Accel. Sch. Small Accel. Proc.* – 2006. – P. 383–416.
109. Auslender, V.L. Extraction of an electron beam through a foil / V.L. Auslender, I.L. Chertok // *Instruments Exp. Tech.* – 1998. – Vol. 41, N 6. – P. 836–839.
110. Ауслендер, В. Л. Выпуск электронного пучка через фольгу / В.Л. Ауслендер, Л.Ч. Черток // *Приборы и техника эксперимента*. – 1998. – Т. 6, № 6 – P. 99–103.
111. Foll, E. Electron beam source with an electron exit window connected via a window flange / E. Foll, H. Vetter // *United States Patent 4,112,307*. – USA. – 1978.
112. Roeder, O. Electron beam exit window / O. Roeder, U. Seyfert, P. Siegfried // *United States Patent 5,561,342*. – USA. – 1996.
113. Walther, S.R. Emitter exit window / S.R. Walther, G.M. Friedman, M.L. Bufano // *United States Patent 2011/0012495 A1*. – USA. – 2011.
114. Baranov, G.A. The output window of a large-area accelerator with an increased electron-beam current density / G.A. Baranov, V.A. Gurashvili, I.D. Djigailo, N.I. Kazachenko, S.L. Kosogorov, A.Yu. Kretinin, V.N. Kuzmin, A.S. Marabyan, V.F. Pavluchenkov, V.I. Sen, S.A. Smirnov, I.A. Tumanov, D.Yu. Tkachenko, N.A. Uspensky, V.Ya. Shvedyuk // *Instruments Exp. Tech.* – 2017. – Vol. 60, N 4. – P. 570–574.
115. Avnery, T. Electron beam emitter / T. Avnery, K.P. Felis // *United States Patent 7,329,885 B2*. – USA. – 2008.
116. Knyazeva, A.G. TiN coating effect on the elastoplastic behaviour of Ti film for electron beam exit window / A.G. Knyazeva, V.I. Kushch, G.E. Remnev, V. Ezhov, E.A. Smolyanskiy // *Vacuum*. – 2017. – Vol. 143. – P. 356–362.
117. Egorov, I. Testing of the Ti foil with TiN coating as an exit window of a pulsed electron accelerator / I. Egorov, E.A. Smolyanskiy, A. Poloskov, M.A. Serebrennikov // *Vacuum*. – 2022. – Vol. 199 – P. 110921.
118. Kendall, J.S. Composite/laminated window for electron-beam guns // *United States Patent* – 4,362,965. – USA. – 1982.
119. Сергеев, П.Б. Свойства полиимидной пленки после облучения электронным пучком с дозой 1 GGy / П.Б. Сергеев, Н.В. Морозов // *Журнал Технической Физики*. – 2019. – Т. 126, № 3. – С. 280–284.
120. Егоров, И.С. Выходное окно сильноточного ускорителя электронов «Астра» / И.С. Егоров, М.И. Кайканов, Г.Е. Ремнев // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 322, № 2. – С. 91–94.
121. Li, L. Role of the rise rate of beam current in the microwave radiation of vircator / L. Li, G. Cheng, L. Zhang, X. Ji, L. Chang, Q. Xu, L. Liu, J. Wen, C. Li, H. Wan // *J. Appl. Phys.* – 2011. – Vol. 109, N 7.
122. Shiffler, D.A. Effects of anode materials on the performance of explosive field emission diodes / D.A. Shiffler, J.W. Luginsland, R.J. Umstattd, A. LaCour, K. Golby, M.D. Haworth, M. Ruebush, D. Zagar, A. Gibbs, T.A. Spencer // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2002. – Vol. 30, N 3 – P. 1232–1237.
123. Васильев, Н.В. Использование сильноточных наносекундных электронных пучков для целей поверхностной стерилизации / Н.В. Васильев, А.К. Горн, Г.А. Месяц и др. // *Доклады Академии наук СССР*. – 1980. – Т. 253, № 5. – С. 1120–1122.
124. Горн, А.К. Электронный импульсный стендовый стерилизатор для поверхностной обработки медицинского инструмента и материалов / А.К. Горн, Г.Г. Кичушкина, Е.С. Сахаров, В.Г. Шпака // *Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии* Под ред. Г.А. Месяца. – 1983. – С. 159–163.

125. Рябых, С.М. Разложение Азида серебра импульсами электронов наносекундной длительности / С.М. Рябых, Ю.Н. Сафонов // Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии Под ред. Г.А. Месяца. – 1983. – С. 73–80.
126. Bugaev, S.P. Surface sterilization using low-energy nanosecond pulsed electron beams / S.P. Bugaev, S.D. Korovin, D.P. Kutenkov, V.F. Landi, G.A. Mesyats, E.S. Sakharov // 10th Int. Conf. High-Power Part. Beams. – 1994. – P. 817–820.
127. Костин, А.В. Стерилизация адсорбирующей повязки на основе нанографита / А.В. Костин, П.В. Выходцев, А.П. Алексеенко, О.В. Попёнов, И.М. Скурихин, А.В. Штейнле, Г.И. Дубов, А.В. Раткин, В.В. Ростов, П.И. Алексеенко // Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. – 2010. – Т. 75, № 5. – С. 182–184.
128. Burenina, A.A. Effect of Nanosecond Repetitively Pulsed X-Ray Radiation on the Sowing Quality of Seeds and the Productivity of Wheat / A.A. Burenina, T.P. Astafurova, E. Surnina, A.N. Butenkova, O.P. Kutenkov, E.A. Sosnin, M.A. Bolshakov, V.V. Rostov // High Energy Chem. – 2021. – Vol. 55, N 4. – P. 324–328.
129. Литвяков, Н. В. Ингибирование пролиферации опухолевых клеток импульсно-периодическим рентгеновским излучением / Н.В. Литвяков, В.В. Ростов, М.А. Булдаков, Н.В. Чердышцева, М.А. Большаков, К.В. Афанасьев, С.Д. Коровин, О.П.Кутенков, С.Ю. Семенов // Сибирский онкологический журнал. – 2006. – Т. 17, № 1. – С. 24–31.
130. Mostovshchikov, A.V. Thermal Stability of Iron Micro- and Nanopowders after Electron Beam Irradiation / A. Mostovshchikov, A. Ilyin, I. Egorov, D.V. Ismailov // Key Eng. Mater. – 2016. – Vol. 712. – P. 60–64.
131. Mostovshchikov, A.V. The Energy Stored in the Aluminum Nanopowder Irradiated by Electron Beam / A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, A.A. Azanov, I.S. Egorov // Key Eng. Mater. – 2016. – Vol. – 685. – P. 639–642.
132. Кайканов, М.И. Исследование реологических свойств нефти при облучении импульсным сильноточным электронным пучком / М.И. Кайканов, Г.Е. Ремнев, Н.В. Юдина, И.С. Егоров, Ю.В. Лоскутова // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 6/2. – С. 37–41.
133. Kaikanov, M.I. Effect of high current electron beam of nanosecond duration on n-decane / M.I. Kaikanov, I.S. Egorov // Известия вузов. Физика. – 2012. Т. 55, № 10/3. – С. 133–135.
134. Ремнёв, Г.Е. Очистка и стерилизация промышленно-бытовых стоков импульсным электронным пучком наносекундной длительности / Г.Е. Ремнев, А.В. Степанов, Д.А. Войно, И.С. Егоров, М.И. Кайканов, А.С. Маслов, Л.Р. Меринова, А.В. Попов, Б.А. Сярг, Л.Н. Шиян // Тезисы докладов 8-ой международной конференции “Ядерная и Радиационная Физика.” –2011. – С. 506–509.
135. Патент № 165911 Российская Федерация, МПК C02F 9/02 (2006.01). Комплекс для очистки и обеззараживания промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод : №2015157481/05 : заявлено 29.02.2016 : опубликовано 10.11.2016 / Ремнёв Г.Е. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ООО "Газпром трансгаз Томск". - 13 с. : 4 ил. : 1 табл.
136. Kaikanov, M.I. Study on improving efficiency of phenol aqueous solution oxidation using pulsed electron beam / M.I. Kaikanov, G.E. Remnev, L.R. Merinova // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 10/3. – С. 139–141.
137. Kaikanov, M.I. Pulsed electron beam effects on the water solutions of methanol investigation / M.I. Kaikanov, G.E. Remnev // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 10/3. – С. 136–138.
138. Исемберлинова, А.А. Влияние обработки импульсным электронным пучком на фитопатогенные грибы Р. PENICILLIUM в семенах пшеницы / А.А. Исемберлинова, И.С. Егоров, С.А. Нужных, М.А. Серебренников, А.В. Полосков, Г.Е. Ремнев // Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве. – Обнинск. – 2020. – С. 329–331.

139. Isemlerlinova, A.A. Influence of a Pulsed Electron Beam on the Sowing Quality of Wheat / A.A. Isemlerlinova, A.V. Poloskov, I.S. Egorov, A.A. Kurilova, S.A. Nuzhnyh, G.E. Remnev // Key Eng. Mater. – 2018. – Vol. 769. – P. 172–180.
140. Исе́мберлино́ва, А.А. Влияние импульсной рентгеновской обработки на грибные инфекции в семенах пшеницы / А.А. Исе́мберлино́ва, С.А. Нужных, М.В. Чубик, Е.А. Покровская, А.В. Полосков, М.А. Серебренников, И.С. Егоров, Г.Е. Ремнев // Современные проблемы радиобиологии, радиоз экологии и агроэкологии: сборник докладов международной молодёжной конференции. – Обнинск. – 2019. – С. 268–270.
141. Isemlerlinova, A.A. The pulsed X-ray treatment of wheat against pathogenic fungi / A.A. Isemlerlinova, I.S. Egorov, S.A. Nuzhnyh, A.V. Poloskov, E.A. Pokrovskaya, A.V. Vertinskiy, F.V. Konusov, E.S. Sukhikh, M.V. Chubik, G.E. Remnev // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. – 2021. – Vol. 503 – P. 75–78.
142. Патент № 2526552 Российская Федерация, МПК C01B 13/14 (2006.01). Способ получения наноразмерных оксидов металлов из металлоорганических прекурсоров : №2012154442/05 : заявлено 17.12.2012 : опубликовано 27.08.2014 / Сазонов Р.В. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет. - 8 с. : 1 ил. : 2 табл.
143. Сазонов, Р.В. Импульсный плазмохимический синтез и свойства наноразмерных порошков оксидов титана и кремния / Р.В. Сазонов, Г.Е. Холодная, Д.В. Пономарёв, М.И. Кайканов, И.С. Егоров // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54, № 11/3. – С. 68–73.
144. Михайлов, М.М. Повышение радиационной стойкости порошков TiO₂ модифицированием наночастицами SiO₂ / М.М. Михайлов, Г.Е. Ремнёв, Т.А. Утебеков, Р.В. Сазонов, С.А. Джабиев, С.А. Юрьев. // Перспективные материалы. – 2012. – № 6. – С. 17–22.
145. Патент № 2222625 Российская Федерация, МПК C22B 60/02, 5/12. Способ переработки гексафторида урана на металлический уран : №2002106474/02 : заявлено 12.03.2002 : опубликовано 27.01.2004 / Ремнёв Г.Е. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт высоких напряжений при Томском Политехническом Университете, ООО "Инженерно-физический центр" - 6 с. : 2 ил.
146. Sazonov, R.V. Investigation of the effect of condensed phase on the energy conditions for the initiation of the plasma-chemical process of flue gas cleaning by a pulsed electron beam / R.V. Sazonov, G.E. Kholodnaya, D.V. Ponomarev, I.S. Egorov, A.V. Poloskov, M.A. Serebrennikov // J. Phys. Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2064, № 1.
147. Kurilova, A.A. Application of Electron Beam for Wastewater Disinfection / A.A. Kurilova, A.V. Poloskov, M.V. Chubik, D.V. Ponomarev // Procedia Chem. – 2015. – Vol. 15. – P. 187–192.
148. Kotov, Yu.A. Using high-current nanosecond electron beams to sterilize bone meal / Yu.A. Kotov, S.Yu. Sokovnin, P.V. Kolotov // BEAMS 1998 - Proc. 12th Int. Conf. High-Power Part. Beams. – 1998. – Vol. 2. – P. 1001–1003.
149. Патент № 2479329 Российская Федерация, МПК A61N 5/10 (2006.01). Установка для радиационной обработки крови наносекундным рентгеновским излучением : №2011113900/14 : заявлено 08.04.2011 : опубликовано 20.04.2013 / Соковнин С.Ю. ; заявитель и патентообладатель Институт электрофизики Уральского отделения РАН - 5 с.
150. Патент № 2235470 Российская Федерация, МПК A23B 5/015. Способ стерилизации меланжа и устройство для его осуществления : №2001103961/13 : заявлено 12.02.2001 : опубликовано 20.09.2004 / Котов Ю.А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Институт электрофизики Уральского отделения РАН, Питер А. А., Наконечный В. И. - 6 с. : 2 ил.
151. Патент № 2767065 Российская Федерация, МПК A23L 15/00 (2016.01). Способ дезинфекции меланжа и устройство для его осуществления : №2020135798 : заявлено 29.10.2020 : опубликовано 16.03.2022 / Соковнин С.Ю. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Институт электрофизики Уральского отделения РАН, Уральский государственный аграрный университет - 13 с. : 3 ил. : 1 табл.

152. Патент № 2713275 Российская Федерация, МПК A23C 9/142 (2006.01). Способ производства сывороточного изолята для изготовления адаптированных молочных смесей и загустителей грудного молока : №2019126200 : заявлено 20.08.2019 : опубликовано 04.02.2020 / Алексеев Д.С. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ООО "Победа-1" - 15 с. : 7 ил. : 4 табл. : 1 пр.
153. Донник, И.М. Применение электрофизических методов санации жидких сред в животноводстве / И.М. Донник, А.С. Кривоногова, А.Г. Исаева, С.Ю. Соковнин // IV Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки. – 2019. – С. 335–337.
154. Чернобровкин, Т.В. Влияние облучения низкоэнергетическим электронным пучком на прорастание и рост вида TRITICUM L. / Т.В. Чернобровкин, Р.А. Вазиров, С.Ю. Соковнин // IV Современные проблемы радиобиологии, радиэкологии и агроэкологии. – Обнинск. – 2021. – С. 103–107.
155. Патент № 2654622 Российская Федерация, МПК A23L 3/26 (2006.01). Способ поверхностной дезинфекции яйца : №2017100768 : заявлено 10.01.2017 : опубликовано 21.05.2018 / Соковнин С.Ю. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Институт электрофизики Уральского отделения РАН, Уральский государственный аграрный университет - 11 с. : 3 ил. : 2 табл.
156. Sokovnin, S.Yu. The use of nanosecond electron beam for the eggs surface disinfection in industrial poultry / S.Yu. Sokovnin, I.M. Donnik, I.A. Shkuratova, A.S. Krivonogova, A.G. Isaeva, M.E. Balezin, R.A. Vazirov // J. Phys. Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1115, N 2. – P. 022034
157. Vazirov, R.A. Surface irradiation of hatching eggs with nanosecond electron beam before incubation for stimulation. / R.A. Vazirov, S.Yu. Sokovnin, N. Musikhina, K. Moiseeva // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Digital agriculture - development strategy”. – 2019. – Vol. 167. – P. 482–485.
158. Sokovnin, S.Yu. Properties of hens' eggs after surface irradiation by nanosecond electron beam / S.Yu. Sokovnin, M.E. Balezin, R.A. Vazirov, O.R. Timoshenkova, A.S. Krivonogova, A.G. Isaeva, I.M. Donnik // Radiat. Phys. Chem. – 2019. – Vol. 165. – P. 108398.
159. Sokovnin, S.Y. An investigation of the disinfection effect in joint action of the nanosecond electron beam and plasma radiation / S.Yu. Sokovnin, A.G. Isaeva, A.S. Krivonogova, M.E. Balezin // J. Phys. Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1115. – P. 022035.
160. Вазиров, Р.А. Радиационная поверхностная дезинфекция пищевой продукции наносекундным электронным пучком / Р.А. Вазиров, С.Ю. Соковнин, М.Е. Балезин // Современные проблемы радиобиологии, радиэкологии и агроэкологии: сборник докладов международной молодёжной конференции. – 2019. – С. 257–260.
161. Vazirov, R.A. Investigation of the effectiveness of antimicrobial treatment of poultry products by electrophysical methods / R.A. Vazirov, S.Yu. Sokovnin, A.S. Krivonogova, A.G. Isaeva // J. Phys. Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2064. – P. 012084.
162. Hall, E.J. Dose Rate: Its Effect on the Survival of Hela Cells Irradiated With Gamma Rays. / E.J. Hall, J.S. Bedford // Radiat. Res. – 1964. – P. 305–315.
163. Tallentire, A. The Interrelationship between Pulse Length and Dose-rate within the Pulse in the Enhancement of Anoxic Damage in Wet Bacillus megaterium Spores Irradiated with Pulses of Electrons / A. Tallentire, D.J.W. Barber // Sixth Symposium on Microdosimetry. – 1978. – P. 1061–1069.
164. Sommer, R. Inactivation of bacteriophages in water by means of non-ionizing (UV-253.7nm) and ionizing (gamma) radiation: A comparative approach / R. Sommer, W. Pribil, S. Appelt, P. Gehringer, H. Eschweiler, H. Leth, A. Cabaj, T. Haider // Water Res. – 2001. – Vol. 35, N 13. – P. 3109–3116.
165. Thompson, J.E. Gamma irradiation for inactivation of C. PARVUM, E. COLI, AND COLIPHAGE MS-2 / J.E. Thompson, E.R.III. Blatchley // J. Environ. Eng. – 2000. – Vol. 126,

- N 8. – P. 761–768.
166. Арбузова, Н.А. К оценке эффективности обеззараживания сточных вод радиационным методом / Н.А. Арбузова, В.А. Рябченко, В.А. Гольдин, Э.Л. Мендельсон // Гигиена и санитария. – 1976. – № 5. – С. 103–105.
 167. Borrelly, S.I. Radiation processing of sewage and sludge. A review / S.I. Borrelly, A.C. Cruz, N.L. Del Mastro, M.H.O. Sampa, E.S. Somessari // Prog. Nucl. Energy. – 1998. – Vol. 33, N 1–2. – P. 3–21.
 168. Siwek, M. Application of electron beam water radiolysis for sewage sludge treatment—a review / M. Siwek, T. Edgecock // Environ. Sci. Pollut. Res. Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – Vol. 27, N 34. – P. 42424–42448.
 169. Moreira, R.G. Theoretical approach for the calculation of radiation D10-VALUE / R.G. Moreira, N. Ekpanyaskun, L.A. Braby // J. Food Process Eng. – 2010. – Vol. 33. – P. 314–340.
 170. Gehringer, P. Effluent polishing by means of advanced oxidation / P. Gehringer, H. Eschweiler, S. Weiss, T. Reemtsma // Radiation Treatment of Polluted Water and Wastewater. – 2008. – P. 15–26.
 171. Egorov, I. Note: Numerical simulation and experimental validation of accelerating voltage formation for a pulsed electron accelerator // Rev. Sci. Instrum. – 2014. – Vol. 85, N 6. – P. 066112.
 172. Baginskii, B.A. A power supply for pulsed electron beam sources / B.A. Baginskii, E.Yu. Burkin // Instruments Exp. Tech. – 1998. – Vol. 41, N 3. – P. 365–367.
 173. Egorov, I.S. A self-triggering system for a cold-cathode thyratron in a pulse voltage generator / I.S. Egorov, V.S. Esipov, E.I. Lukonin, A.V. Poloskov // Instruments Exp. Tech. – 2015. – Vol. 58. – P. 64–66.
 174. Bochkov, V.D. Pulsed Power Application of TDI-Type Pseudospark Switches / D.V. Bochkov, V.D. Bochkov, V.M. Dyagilev, V.G. Ushich // Acta Phys. Pol. A. – 2009. – Vol. 115, N 6. – P. 1118–1121.
 175. Импульсный тиратрон ТДИ100к/45П // ООО "Импульсные технологии" : сайт. - 2020. - URL: <https://pulsetech.ru/pages/produkcija/impulsnye-tiratrony-silnotochnye-psevdoiskrovye-kommutatory-serii-tdi> (дата обращения: 20.02.2020).
 176. Лабораторный блок питания HY1803D // MASTECH : сайт. - 2020. - URL: <https://www.mastech.ru/catalog/power/hy1803d.html> (дата обращения: 20.02.2020).
 177. Конденсаторы К78-41-3кВ-20мкФ, К75-74-40кВ-47нФ // ЗАО "ЭЛКОД": сайт. - 2020. - URL: <https://elcod.spb.ru/catalogue.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).
 178. Криогенный насос Cryo-Torr 8 // CTI-Cryogenics: сайт. - 2020. - URL: <https://www.cryosciences.com/product-page/cti-cryogenics-cryo-torr-8-cryopump> (дата обращения: 20.02.2020).
 179. Диффузионный вакуумный насос НВДМ-250 // АО "Вакууммаш": сайт. - 2020. - URL: <https://vacma.ru/catalog/vakuumnye-nasosy/vysokovakuumnye-nasosy/diffuzionnye/nvdm/nvdm-250/> (дата обращения: 20.02.2020).
 180. Активный широкодиапазонный вакуумметр CC-10 // Televac: сайт. - 2020. - URL: <https://www.frederickscompany.com/products/cc-10-wide-range/> (дата обращения: 20.02.2020).
 181. Осциллограф TDS 2024C // Tektronix: сайт. - 2020. - URL: <https://tektronix-ltd.ru/oscilloscope/Ostillograf-TDS2024C/> (дата обращения: 20.02.2020).
 182. Ageev, A.I. Discrete liquid-helium level-meter sensors based on TVO carbon resistors / A.I. Ageev, V.N. Alferov, D.A. Vasil'ev, A.V. Lutchev, V.N. Fedorchenko, A.N. Kholkin // Instruments Exp. Tech. – 2014. – Vol. 57, N 3. – P. 374–375.
 183. Резисторы ТВО // ЗАО "РЕОМ": сайт. - 2020. - URL: <https://reom.ru/catalog/detail/rezistory-tvo/> (дата обращения: 20.02.2020).
 184. Liu J.-L. Coaxial capacitive dividers for high-voltage pulse measurements in intense electron beam accelerator with water pulse-forming line / J.-L. Liu, B. Ye, T.-W. Zhan, J.-H. Feng,

- J.-D. Zhang, X.-X. Wang // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2009. – Vol. 58, N 1. – P. 161–166.
185. Anderson, J.M. Wide frequency range current transformers // Rev. Sci. Instrum. – 1971. – Vol. 42, N 7. – P. 915–926.
186. Brown, K.L. Faraday-Cup Monitors for High-Energy Electron Beams / K.L. Brown, G.W. Tautfest // Rev. Sci. Instrum. – 1956. – Vol. 27, N 9. – P. 696–702.
187. Pellinen, D.G. A picosecond risetime high voltage divider / D.G. Pellinen, Q. Johnson, A. Mitchell // Rev. Sci. Instrum. – 1974. – Vol. 45, N 7. – P. 944–946.
188. Gerasimov, A.I. Aqueous-solution high-voltage resistors: Development, study, and application (review) // Instruments Exp. Tech. – 2006. – Vol. 49, N 1. – P. 1–26.
189. Teresov, A. High-Speed Surface Temperature Measurement in Ti-Coated Aluminum During Electron Beam Irradiation / A. Teresov, T. Koval, P. Moskvina, T.M.K. An, N. Koval // 2018 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE). – IEEE. – 2018. – P. 10–14.
190. Степанович, А.П. Диагностика мощных пучков электронов с помощью калориметров полного поглощения / А.П. Степанович, Д.В. Хмельницкий // Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – Т. 44, № 6. – С. 4–11.
191. Egorov, I. Sectioned calorimeter for quick diagnostic of the electron beam energy distribution / I. Egorov, M. Serebrennikov, Yu. Isakova, A. Poloskov // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. – 2017. – Vol. 875. – P. 132–136/
192. Тепловизор Fluke Ti10 // ГК "Новые технологии" : сайт. - 2020. - URL: <https://fluke.nt-rt.ru/price/product/1923140> (дата обращения: 20.02.2020).
193. Плёнка окрашенная радиационно-чувствительная ПОР // ООО НПФ "БИТ" : сайт. - 2020 - URL: <https://www.zaobit.ru/> (дата обращения: 20.02.2020).
194. Оже-спектрометр "Шхуна-2" // Томский Политехнический Университет : сайт. - 2020 - URL: https://portal.tpu.ru/departments/centre/cism_fti/tech_base/shchkhuna (дата обращения: 20.02.2020).
195. Измеритель иммитенса E7-21 // ОАО "МНИПИ" : сайт. - 2020. - URL: <http://en.mnipi.by/catalog/izmeriteli-immitansa-rlc/izmeritel-immitansa-e7-21.html> (дата обращения: 20.02.2020).
196. Egorov, I.S. The Astra repetitive-pulse electron accelerator / I.S. Egorov, M.I. Kaikanov, E.I. Lukonin, G.E. Remnev, A.V. Stepanov // Instruments Exp. Tech. – 2013. – Vol. 56, P. 568–570.
197. Bochkov, V.D. High-power low-gas-pressure current switches / V.D. Bochkov, V.M. Dyagilev, Yu.D. Korolev, V.G. Ushich // Instruments Exp. Tech. – 1998. – Vol. 41, N 5. – P. 676–680.
198. Poloskov, A.V. Commutation of a capacitive energy bank by pseudospark switcher in self-breakdown mode / A.V. Poloskov, I.S. Egorov, V.V. Ezhov, M.A. Serebrennikov // Izvestiya Vuzov. Fizika. – 2016. – Vol. 59, N 9-3. – P. 9-11
199. Wu, P. Characteristics of plasma process in explosive electron emission / P. Wu, J. Sun, Y. Cao, Y. Teng // Proceedings of 2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – 2015. – P. 1–2.
200. Shafir, G. Experimental research of different plasma cathodes for generation of high-current electron beams / G. Shafir, M. Kreif, J.Z. Gleizer, S. Gleizer, Ya. Krasik, A. Gunin, O.P. Kutenkov, I.V. Pegel, V.V. Rostov // J. Appl. Phys. – 2015. – Vol. 118, N 19. – P. 193302.
201. Alekseev, S.B. Subnanosecond electron beams formed in a gas-filled diode at high pressures / S.B. Alekseev, V.P. Gubanov, V.M. Orlovskii, V.F. Tarasenko // Tech. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 30, N 10. – P. 859–861.
202. Egorov, I. Experimental demonstration of a single capillary, water-activated cathode for a sub-microsecond electron accelerator / I. Egorov, A. Poloskov, M. Serebrennikov, G. Remnev // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. – 2019. – Vol. 943. – P. 162459.
203. Yoshimura N. Vacuum technology: Practice for scientific instruments // Vacuum Technology: Practice for Scientific Instruments, 2008. 353 p.

204. Poloskov, A.V. High-voltage pulse bushing with induced voltage distribution between sections / A.V. Poloskov, I.S. Egorov, M.A. Serebrennikov // *Vacuum*. – 2021. – Vol. 194, N 110593. doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110593
205. Полосков, А.В. Стабильность параметров вакуумного электронного диода с плоскими катодами / А.В. Полосков, В.С. Есипов // II Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «Высокие Технологии в Современной Науке и Технике». – 2013. – С. 61-63
206. Gleizer J.Z. High-current carbon-epoxy capillary cathode / J.Z. Gleizer, T. Queller, Yu. Bliokh, S. Yatom, V. Vekselman, Ya. E. Krasik, V. Bernshtam // *J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol. 112. – P. 023303.
207. Queller, T. High-current long-duration uniform electron beam generation in a diode with multicapillary carbon-epoxy cathode / T. Queller, J.Z. Gleizer, Ya.E. Krasik // *J. Appl. Phys.* – 2013. – Vol. 114, N 12. – P. 123303.
208. Кайканов, М.И. Исследование генерации импульсного электронного пучка в диоде с высоким импедансом // диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Томский Политехнический Университет Tomsk. – 2013.
209. Poloskov, A. Multicapillary carbon-epoxy tubes as a cathode material for a pulsed electron accelerator / A. Poloskov, I. Egorov, V. Ezhov, G. Remnev // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 685. – P. 667-671. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.667
210. Углеродный волокнистый материал Урал ТМ-4-22 // ООО Компания "Химпром" : сайт. - 2020. - URL: <https://him-prom.perm.ru/index.php?id=11> (дата обращения: 20.02.2020).
211. Сканирующий электронный микроскоп Hitachi P-SEM S-3400N // Norwegian University of Science and Technology : сайт. - 2020. - URL: <https://www.ntnu.edu/documents/140082/1269041159/S-3400NSpecifications.pdf> (дата обращения : 20.02.2020).
212. Egorov, I. Effect of emission current delay on the efficiency of electron beam production / I. Egorov, G. Remnev, A. Poloskov, M. Serebrennikov // *Vacuum*. – 2017. – Vol. 143. – P. 428–432.
213. Poloskov, A. Investigation of the characteristics of the explosive-emission cathode based on carbon fiber in pulsed-periodic electron beam generation / A. Poloskov, M. Serebrennikov, G. Remnev, I. Egorov // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2022. – Vol. 1039, N 167175. doi: 10.1016/j.nima.2022.167175
214. Кузубова Л. И., Кобрина В. Н. Химические методы подготовки воды (хлорирование, озонирование, фторирование) / Л. И. Кузубова, В. Н. Кобрина, Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы, 1996. 132 с.
215. Хоулт Д. Определитель бактерий Берджи. Москва: Мир, 1997. 799 с.
216. Egorov, I. PIN-diode diagnostics of pulsed electron beam for high repetition rate mode / I. Egorov, Y. Xiao, A. Poloskov // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2017. – Vol. 830. – P. 012044.
217. Egorov, I. A high-repetition rate pulsed electron accelerator / I. Egorov, V. Esipov, G. Remnev, M. Kaikanov, E. Lukonin, A. Poloskov // *Proceedings of the 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC)*. – 2012.
218. Poloskov, A.V. Energy depth distribution of pulsed electron beam with wide electron kinetic energy spectrum for an aluminum target / A.V. Poloskov, M.A. Serebrennikov, A.A. Isemlerlinova, I.S. Egorov // *Journal of Physics Conference Series*. – 2019. – Vol. 1393(1). – P. 012115. doi: 10.1088/1742-6596/1393/1/012115
219. Князев, Б.А. Измерение энергетического спектра мощного микросекундного РЭП в пучково-плазменных экспериментах многофольговым анализатором / Б.А. Князев, П.И. Мельников, А.А. Никифоров, В.В. Чикунов // *Журнал технической физики*. – 1993. – Т. 63, № 6. – С. 179-188.
220. Egorov, I. Research of Energy Density for Pulsed Electron Beam of Wide Electron Kinetic Energy Spectrum / I. Egorov, A. Poloskov, M. Serebrennikov, A. Isemlerlinova // *Proceedings – 20th*

- International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE). – 2018. – P. 27–30.
221. Mesyats, G.A. Picosecond runaway electron beams in air / G.A. Mesyats, M.I. Yalandin, A.G. Reutova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov // *Plasma Phys. Reports*. – 2012. – Vol. 38. – P. 29–45.
 222. Berger, M.J. ESTAR, ASTAR, PSTAR: Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions / M.J. Berger, J.S. Coursey, M.A. Zucker, J. Chang // NIST. – 2011. – <http://www.nist.gov/pml/data/star/index.cfm>.
 223. Ezhov, V.V. Using of dosimetric film for analysis of energy density distribution of a high-current pulsed electron beam / V.V. Ezhov, D.V. Goncharov, A.I. Pushkarev, G.E. Remnev, J.A. Mikicha // *Proceedings. The 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology (KORUS)*. – 2005. – P. 139–142.
 224. Koivunoro, H. Accuracy of the electron transport in MCNP5 and its suitability for ionization chamber response simulations: A comparison with the EGSnrc and PENELOPE codes / H. Koivunoro, T. Siiskonen, P. Kotiluoto, I. Auterinen, E. Hippelainen, S. Savolainen // *Med. Phys.* – 2012. – Vol. 39. – P. 1335–1344.
 225. Horita, R. Estimation of the three-dimensional (3D) dose distribution of electron beams from medical linear accelerator (LINAC) using plastic scintillator plate / R. Horita, S. Yamamoto, K. Yogo, Y. Hirano, K. Okudaira, F. Kawabata, T. Nakaya, M. Komori, H. Oguchi // *Radiat. Meas.* – 2019. – Vol. 124. – P. 103–108.
 226. Visbal, J.H.W. Inverse reconstruction of energy spectra of clinical electron beams using the generalized simulated annealing method / J.H.W. Visbal, A.M. Costa // *Radiat. Phys. Chem.* – 2019. – Vol. 162. – P. 31–38.
 227. Tuan, N.A. The depth-dose curve depends on the inhomogeneity of the material irradiated by electron beam / N.A. Tuan, C.V. Tao, C. Rangacharyulu // *Radiat. Phys. Chem.* – 2019. – Vol. 163. – P. 22–25.
 228. Kuksanov, N.K. Development of the model range and improve performance accelerators ELV / N.K. Kuksanov, S.N. Fadeev, Yu.I. Golubenko, D.A. Kogut, A.I. Korchagin, A.V. Lavrukhin, P.I. Nemytov, R.A. Salimov, E. Domarov // *Probl. At. Sci. Technol.* – 2012. – Vol. 3. – P. 15–18.
 229. Kuksanov, N.K. Extended scope of application of industrial ELV accelerator / N.K. Kuksanov, Yu.I. Golubenko, P.I. Nemytov, R.A. Salimov, S.N. Fadeev, A.I. Korchagin, D.A. Kogut, E. Domarov, A.V. Lavrukhin, V.G. Cherepkov // *24th Russ. Part. Accel. Conf.* – 2014. – P. 137–139.
 230. Мембраны МФАС-МА-6 // "Владипор" : сайт. - 2020. - URL: <https://vladipor.ru/katalog/laboratornaja-filtracija/membrany-iz-acetat-celljulozy-jefirov-celljulozy-mfas-i-mfcs/> (дата обращения : 20.02.2020)
 231. Полосков, А.В. Воздействие импульсного пучка с широким спектром кинетических энергий электронов на Е. COLI / А.В. Полосков, А.А. Курилова, М.А. Серебренников // *Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Российский и международный опыт подготовки кадров: сборник научных трудов X Международной научно-практической конференции*. – Томск. – 2020. – стр. 38.