

Егоров Иван Сергеевич

**Разработка и исследование импульсного ускорителя с учётом запаздывания
электронной эмиссии в диоде**

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная
техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в лаборатории пучково-плазменных технологий (Лаборатория №1) Института физики высоких технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ремнёв Геннадий Ефимович

**Официальные
оппоненты:** Соковнин Сергей Юрьевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Группы Электрофизических Технологий Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург).

Крастелев Евгений Григорьевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией мощных электрофизических устройств Объединенного института высоких температур Российской академии наук (г. Москва).

Ведущая организация: Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск.

Защита диссертации состоится 15 сентября 2015 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 при ФГАОУ ВО НИ ТПУ, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2А.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/912/worklist>

Автореферат разослан «10» июля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.ф.-м.н., доцент


Кожевников А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Область применения импульсных электронных пучков в промышленности, науке и технике непрерывно расширяется: возбуждение эксимерных лазеров, инициирование химических процессов, обработка различных деталей машин, инструмента, обеззараживание сельскохозяйственной, фармацевтической, медицинской продукции и множество других применений. Отдельно стоит отметить использование электронных ускорителей в технологиях экологической направленности.

Вместе с тем, конструкции импульсных электронных ускорителей, представленные в современной научной и технической литературе, не могут обеспечить массовое их использование в промышленности и народном хозяйстве, стоимость изготовления ускорителей относительно высока, а их эксплуатация требует специальных условий. Данное положение делает актуальной разработку новых и развитию существующих подходов к созданию импульсных ускорителей электронов, ориентированных на практическое использование. Большое значение при этом имеют эксплуатационные характеристики оборудования: срок службы, повторяемость параметров пучка, средняя мощность выведенного пучка, возможность автоматического управления.

Диссертационная работа посвящена исследованию электронного ускорителя на основе известной схемы формирования импульсов ускоряющего напряжения, основанной на разряде емкостного накопителя через импульсный трансформатор на вакуумный электронный диод. В настоящей работе, электронный диод содержит плоский катод из композиционного материала, состав которого и технология изготовления разработаны научным коллективом под руководством д.ф.-м.н. профессора Савицкого А. П. в Институте Физики прочности и материаловедения СО РАН. Для такого катода было обнаружено существенное запаздывание тока взрывной электронной эмиссии после приложения импульса ускоряющего напряжения со скоростью нарастания $(3,5-4,5) \times 10^{12}$ В/с. Таким образом, в описанной схеме включения, диод выполняет функции коммутатора тока без использования дополнительного обостряющего разрядника, что является важным для создания ускорителей электронов для практического использования. При исследовании характеристик электронного пучка в диоде с указанным композиционным катодом были достигнуты значения ускоряющего напряжения, превышающие значения, полученные для катодов с меньшим временем запаздывания эмиссии. Это обеспечило уменьшение потерь электронного пучка в разделительной фольге выпускного окна ускорителя. Ускоритель с частотой следования импульсов до 50 имп./с и инъекцией пучка электронов в атмосферу апробирован и используется в качестве источника импульсных электронных пучков для разработки радиационных технологий. Эксплуатационные характеристики и практическая применимость ускорителя были исследованы при обработке водных растворов в потоке с целью обеззараживания.

Цель настоящей работы – найти основные закономерности влияния запаздывания тока электронной эмиссии в вакуумном диоде на параметры

импульса напряжения в схеме емкостной накопитель, импульсный трансформатор, электронный диод, и, с учётом выявленных закономерностей, разработать импульсный ускоритель электронов с выпуском пучка в реакционную камеру атмосферного давления.

Основные задачи настоящей работы заключались в следующем:

1. Определить закономерности формирования импульсов мощности в вакуумном электронном диоде при разряде емкостного накопителя через импульсный трансформатор с минимальным запаздыванием протекания эмиссионного тока после приложения импульса напряжения;

2. Исследовать временные и вольтамперные характеристики вакуумного электронного диода с плоскими катодами, обеспечивающими различное время запаздывания протекания тока электронной эмиссии в схеме ускорителя, основанной на разряде емкостного накопителя на электронный диод через импульсный трансформатор;

3. Разработать расчётную модель схемы формирования импульсов ускоряющего напряжения, которая учитывает запаздывание протекания тока в вакуумном электронном диоде и влияние элементов конструкции ускорителя, основанного на разряде емкостного накопителя через импульсный трансформатор на электронный диод. Провести сопоставление расчётной формы и амплитуды импульса ускоряющего напряжения с данными, полученными экспериментальным путём;

4. С помощью расчётной модели определить основные закономерности влияния запаздывания тока электронной эмиссии в вакуумном диоде на выходные параметры ускорителя по схеме емкостной накопитель, импульсный трансформатор, электронный диод;

5. С учётом выявленных закономерностей разработать импульсный ускоритель электронов с учётом запаздывания электронной эмиссии в диоде и экспериментально определить режимы частотной генерации и инжекции электронного пучка в атмосферу;

6. Провести испытания по использованию разработанного импульсного ускорителя для обеззараживания водных растворов в водовоздушном потоке.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. С помощью расчётной модели схемы замещения импульсного ускорителя электронов субмикросекундной длительности с энергозапасом 50 Дж на основе импульсного трансформатора установлено и экспериментально подтверждено, что амплитуда импульса мощности, развиваемой в диоде, и коэффициент использования запасённой в первичном емкостном накопителе энергии зависят от времени запаздывания тока электронной эмиссии и максимальных значений достигают при времени запаздывания 125 нс.

2. Установлено, что при увеличении времени запаздывания тока электронной эмиссии свыше 125 нс диапазон изменения амплитуды импульса напряжения в зависимости от импеданса нагрузки в диапазоне 200-500 Ом, который соответствует апериодической форме разряда основного емкостного

накопителя энергии ускорителя (50 Дж), составляет 5%, а при запаздывании более 145 нс менее 1%.

3. Экспериментально установлено, что запаздывание тока электронной эмиссии 50–130 нс может быть получено в вакуумном диоде импульсного ускорителя электронов с энергозапасом 50 Дж при использовании плоского композиционного катода на основе медной матрицы с включением частиц BaTiO_3 размером 50–120 мкм в пропорции 1:1, при скорости нарастания напряжения в диапазоне $3,7\text{--}4,2 \times 10^{12}$ В/с и напряжённости электрического поля в зазоре 10–20 МВ/м.

Практическая значимость работы определяется применением результатов для разработки импульсного электронного ускорителя с инжекцией пучка в атмосферу, предназначенного для работы в составе установки очистки и обеззараживания сточных вод.

Положения, выносимые на защиту

1. Расчётная модель схемы замещения позволяет определять величину энергии, выделенной в диоде импульсного электронного ускорителя на основе емкостного накопителя и импульсного трансформатора, с погрешностью менее 5%.

2. При времени запаздывания тока электронной эмиссии 125 нс и скорости нарастания напряжения на диоде 4×10^{12} В/с в ускорителе электронов на основе импульсного трансформатора достигается максимальная амплитуда импульса развиваемой в диоде мощности, а так же максимальный коэффициент использования энергии запасённой в первичном емкостном накопителе энергозапасом 50 Дж.

3. Диапазон изменения амплитуды ускоряющего напряжения, развиваемого на диоде электронного ускорителя на основе импульсного трансформатора, соответствующий значениям импеданса диода для апериодической формы разряда основного емкостного накопителя энергии, уменьшается при увеличении времени запаздывания тока в диоде.

4. Использование плоского композиционного катода на основе медной матрицы с включением частиц BaTiO_3 размерами 50–120 мкм в пропорции 1:1, обеспечивает изменение времени запаздывания тока электронной эмиссии 50–130 нс относительно приложенного напряжения при изменении напряжённости электрического поля в зазоре в диапазоне 10–20 МВ/м.

5. Плоский композиционный катод на основе медной матрицы, обеспечивает непрерывный режим работы ускорителя с энергозапасом в первичном емкостном накопителе 50 Дж и инжекцией электронного пучка в атмосферу при частоте повторения импульсов тока пучка 50 имп./с.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Выводы, приведённые в работе, были сформулированы на основании анализа данных, полученных в результате комплексных экспериментальных исследований, включающих в себя: анализ осциллограмм токов и напряжений вакуумного электронного диода и высоковольтного емкостного накопителя ускорителя; измерения энергии, переданной электронным пучком за импульс с

помощью калориметра полного поглощения; оценку распределения плотности энергии электронного пучка по тепловому отпечатку на поверхности мишени из пенополистирола и по автографу пучка на дозиметрической плёнке ПОР; оценку тепловых режимов работы конструктивных элементов ускорителя из термограммы поверхности корпуса ускорителя, полученной с помощью тепловизора. Калибровка применяемого диагностического оборудования показала, что параметры ускорителя могут быть измерены с точностью не хуже 10 %. Результаты, полученные с применением программных пакетов для моделирования электрических процессов, подтверждаются результатами, полученными экспериментальным путём. Результаты диссертации сопоставлялись с опубликованными результатами других учёных, в частности, увеличение эффективности генерации электронного пучка при увеличении запаздывания электронной эмиссии в диоде ускорителя без формирующей линии.

Основные положения и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на научном семинаре Института физики высоких технологий НИ ТПУ, г. Томск, на профильных международных конференциях: 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, IPMHVC 2012, USA, San Diego; 4th Euro-Asian Pulsed Power Conference and 19th International Conference on High-Power Particle Beams, Karlsruhe, Germany, 2012; 8-ой международной конференции Ядерная и радиационная физика, Алма-Ата, Казахстан, 2011; 3rd International Congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Томск, 2012; 41st IEEE International Conference on Plasma Science and 20th International Conference on High-Power Particle Beams, Washington, May 25-29, 2014, а также на конференциях студентов и молодых учёных.

Публикации

По результатам исследований по теме диссертации опубликовано 20 работ, в числе которых 14 статей в реферируемых журналах из перечня ВАК, в том числе 12 статей в соавторстве, 1 патент РФ.

Личный вклад автора

Диссертационная работа является итогом разработки, создания, исследования характеристик, оптимизации параметров и практического применения частотного импульсного электронного ускорителя. Концепция и общий план выполненных исследований определялись в результате обсуждения задач исследования, научных результатов с научным руководителем и коллективом соавторов работ, выполненных по теме диссертации. Автором самостоятельно определены задачи исследования по теме диссертации, проведены и обработаны эксперименты, показавшие значительное время запаздывания тока электронной эмиссии в вакуумном диоде с плоским композиционным катодом на основе медной матрицы, в сравнении с плоскими катодами из других материалов. Автором самостоятельно разработана и проверена расчётная модель схемы формирования импульсов ускоряющего напряжения, которая учитывает запаздывание тока в вакуумном электронном диоде и влияние элементов конструкции ускорителя. Подготовлены, проведены и проанализированы

экспериментальные исследования генерации импульсов электронного пучка с инжекцией в атмосферу с частотой следования импульсов до 50 имп./с. При непосредственном участии автора: была разработана и изготовлена схема импульсного питания, высоковольтный блок ускорителя; разработан и изготовлен вакуумный электронный диод с инжекцией пучка в атмосферу, реакционная камера ускорителя; были проведены экспериментальные исследования по обработке импульсным электронным пучком водовоздушного потока для обеззараживания водных растворов.

Автором самостоятельно сформулированы защищаемые научные положения, сделаны выводы по работе.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 135 наименований и 1 приложение. Работа изложена на 109 страницах машинописного текста, включая 72 рисунка и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель, поставлены соответствующие задачи и аргументирована научная новизна результатов исследований, показана практическая значимость полученных результатов и приведены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ результатов обзора литературных источников по теме диссертации. Приведено описание наиболее известных и часто применяемых схем ускорителей прямого действия [a, b]. Отмечены конструктивные особенности некоторых импульсных ускорителей электронов, предназначенных для генерации электронного пучка с высокой частотой следования импульсов, освещены прикладные задачи, которые успешно решаются с помощью упомянутых ускорителей [c, d]. Анализ изложенного в главе материала позволил сформировать ряд ключевых требований к конструкции и параметрам ускорителей для успешного применения в промышленности, медицине, сельском хозяйстве, экологии, а так же сделать вывод, что в настоящий момент отсутствуют образцы ускорительной техники, исчерпывающе удовлетворяющие всем потребностям промышленности в импульсных источниках электронных пучков. Таким образом, определяется актуальность разработки новых и развития существующих подходов к формированию импульсов ускоряющего напряжения, генерации и инжекции электронного пучка. Немаловажное значение имеют также средства управления и диагностики состояния оборудования. Неотъемлемым современным требованием является способность ускорителя работать в составе автоматической линии.

Соответствие этим требованиям позволяет предположить функциональный состав и основные характеристики ускорителя, имеющего перспективы практического использования. Так, сложность технического устройства, отсутствие промышленно-выпускаемых и широко-распространённых прерывателей тока, предопределяет использование емкостных накопителей

энергии вместо индуктивных, обладающих существенно более высокой объёмной плотностью запасаемой энергии. С другой стороны, наличие производимых в промышленном масштабе псевдоискровых коммутаторов с приемлемыми частотными характеристиками на напряжения до 100 кВ [e] подразумевает возможность построения простой и надёжной схемы генерации импульсов высокого напряжения без использования высоковольтных формирующих линий с искровыми разрядниками и с трансформаторной связью в выходном каскаде генератора. В качестве прототипа взят генератор, рассмотренный в [f]. Описанный подход обуславливает форму генерируемого импульса напряжения отличную от прямоугольной. Это делает востребованным применение средств формирования импульса, которые основаны на процессах, происходящих в электронном диоде ускорителя при генерации электронного пучка. Одним из таких средств является использование катодов со значительным временем запаздывания протекания электронного эмиссионного тока. Применение указанного подхода к построению импульсного ускорителя электронов рассмотрено в данной диссертационной работе.

В первой главе также рассматриваются работы, описывающие применение источников ионизирующего излучения для решения одной из самых насущных проблем современности и ближайшего будущего – проблемы чистой воды. Проанализированные работы показывают возможность применения электронных пучков для очистки сточных и природных вод от химических загрязнителей и обеззараживания в степени, определяемой поглощённой дозой [g].

Во второй главе приведено описание принципа действия, конструктивного исполнения и диагностического оборудования импульсного электронного ускорителя Астра, послужившего экспериментальным стендом для исследования характеристик нового катода из композиционного материала [h].

Упрощенная принципиальная электрическая схема генератора импульсов ускоряющего напряжения приведена на рисунке 1. Импульс ускоряющего напряжения формируется при разряде высоковольтного емкостного накопителя $C2$ на вакуумный электронный диод через импульсный трансформатор $T2$ при коммутации высоковольтного ключа $VT2$.

Заряд высоковольтного емкостного накопителя так же осуществляется импульсно, через трансформаторную связь $T1$. Срабатывание $VT2$ автоматически происходит в момент достижения максимального зарядного напряжения высоковольтной ёмкости $C2$, который детектируется системой запуска коммутатора $C3K$ по моменту смены направления тока заряда накопителя $C2$.

Напряжение заряда емкостного накопителя $C2$ и напряжение на катододержателе вакуумного электронного диода контролировалось соответственно по сигналам с омического и ёмкостного делителей напряжения. Измерения импульсных токов производили с применением поясов Роговского. Электрические сигналы с датчиков регистрировали осциллографом *Tektronix 2024B* (200 МГц, 2×10^9 отсч./с).

Калибровка датчиков показала, что регистрация сигналов тока и напряжения возможна с точностью не хуже 10% при временном разрешении в единицы наносекунд.

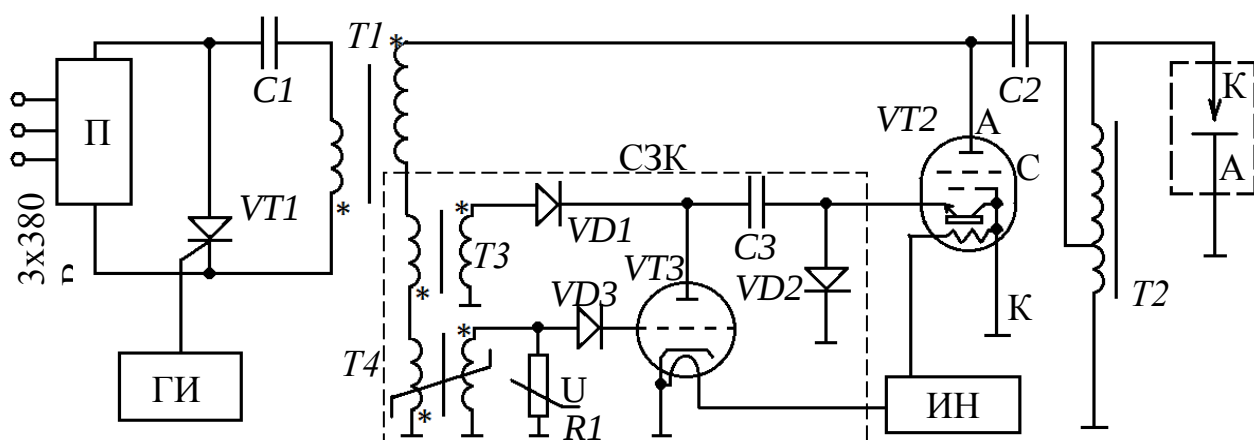


Рисунок 1. Принципиальная электрическая схема ГВИ ускорителя АСТРА. П - преобразователь напряжения; ГИ - генератор импульсов; C1 - первичный накопитель; VT1 - тиристорный коммутатор; T1 - повышающий импульсный трансформатор; C2 - высоковольтный накопитель; VT2 - коммутатор; T2 - высоковольтный импульсный трансформатор; К-А - ускоряющий промежуток; T3 - импульсный трансформатор тока; C3 - конденсатор; VT3 - маломощный импульсный тиратрон с термокатодом; T4 - пик-трансформатор; R1 - варистор; ИНН - источник накальных напряжений; VD1, VD2, VD1 - диоды, C3K - система запуска коммутатора.

На основании принципиальной электрической схемы, приведённой на рисунке 1, была составлена схема замещения генератора высоковольтных импульсов - ГВИ (рисунок 2), дополненная омическими, индуктивными и емкостными элементами, которые образованы конструктивными узлами ускорителя. Значения индуктивных и резистивных элементов представленной схемы замещения, кроме импульсного трансформатора T были оценены расчётным путём.

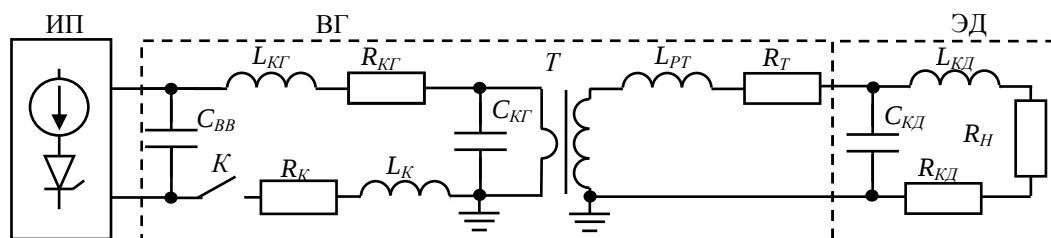


Рисунок 2. Схема замещения высоковольтного генератора ускорителя АСТРА.

ИП – источник питания; ВГ – высоковольтный генератор; ЭД – электронный диод; C_{ВВ} – высоковольтный емкостной накопитель; L_{КГ} – индуктивность контура разряда высоко-вольтного емкостного накопителя; R_{КГ} – сопротивление контура разряда емкостного накопителя; К – высоковольтный коммутатор; R_К – сопротивление токопроводящего канала коммутатора; Т – высоковольтный импульсный трансформатор; L_{PT} – индуктивность рассеяния трансформатора; R_{OT} – сопротивление

обмоток трансформатора; $C_{КГ}$ – конструктивная ёмкость генератора; $L_{КД}$ – индуктивность электронного диода; $C_{КД}$ – конструктивная ёмкость диода; R_H – сопротивление нагрузки;

Оценка величин емкостей схемы замещения производилась при расчёте геометрии конструктивных элементов в программном пакете расчёта электрических полей методом конечных элементов *Elcut*.

Разработанная схема замещения была смоделирована с использованием программного пакета моделирования процессов в электрических цепях NI Multisim. Внешний вид модели для расчёта токов в режиме короткого замыкания в программе приведён на рисунке 3.

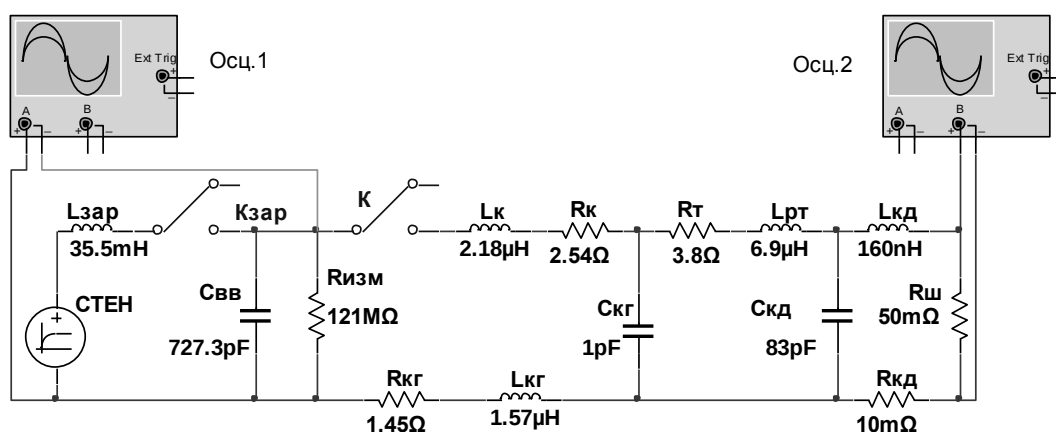


Рисунок 3. Изображение модели электрической цепи в программе NI Multisim. Названия элементов соответствуют схеме замещения генератора показанной на рисунке 2.

Для оценки корректности составленной схемы замещения и разработанной модели было проведено сравнение результатов моделирования и реального измерения токов короткого замыкания. При этом измерялось падение напряжения на низкоиндуктивном шунте ($R_{ш}=50$ мОм), подключённом к выводу генератора высоковольтных импульсов. При уточнении значения индуктивности рассеяния импульсного трансформатора T , было получено хорошее согласование результатов моделирования и натурных измерений (Рисунок 4).

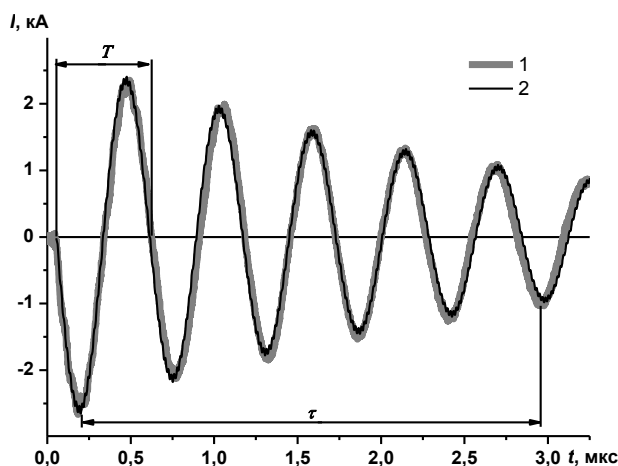


Рисунок 4. Характерные осциллограммы тока короткого замыкания при натурных испытаниях (1) и полученного с помощью модели (2).

При проведении опыта короткого замыкания не представляется возможным оценить влияние конструктивных ёмкостей на формирование импульса ускоряющего напряжения, поэтому были проведены дополнительные исследования работы генератора высоковольтных импульсов на омическую нагрузку - жидкостный резистор (R_H) с компенсацией давления электролита. Нагрузка устанавливалась в вакуумной камере ускорителя для обеспечения необходимой электрической прочности по поверхности изолятора. Испытания проводились при частоте следования импульсов 10 имп./с, электролит в жидкостном резисторе разогревался, что приводило к снижению его сопротивления, позволяя фиксировать параметры работы генератора без дополнительных операций. Последовательно фиксировались осциллограммы тока и напряжения диода (Рисунок 5) для разных значений R_H .

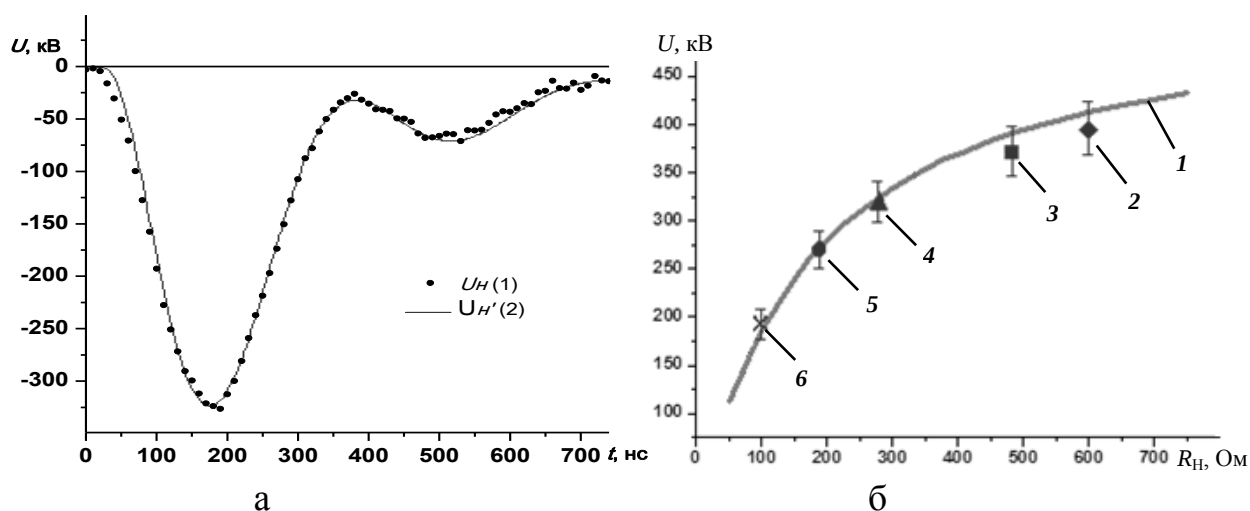


Рисунок 5. Расчётный импульс напряжения (а) $U_{H'}$ (2) на нагрузке $R_H=280$ Ом в сравнении с полученной формой экспериментальным путём U_H (1). Зависимость амплитуды импульса напряжения (б) от импеданса нагрузки. Измеренные значения напряжения для: $R_H = 600$ Ом (2); $R_H = 480$ Ом (3); $R_H = 280$ Ом (4); $R_H = 190$ Ом (5); $R_H = 100$ Ом.

На основании зафиксированных осциллограмм напряжения, производился расчёт энергии, выделенной в нагрузку за один импульс. Сравнения результатов моделирования работы схемы замещения, представленной на рисунке 2, с результатами, полученными экспериментальным путём, показали, что разработанная модель может корректно применяться как для оценки интегральных значений энергии, выделенной за импульс в нагрузку, так и для получения временных и амплитудных характеристик импульсов генератора в широком диапазоне импедансов нагрузки.

Третья глава посвящена сравнительному исследованию характеристик вакуумного электронного диода с плоскими катодами. Для сравнения были взяты: плоский многоострый катод и новый композиционный катод, изготовленный коллективом Института физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск под руководством д.ф.-м.н., профессора А. П. Савицкого. Плоский композиционный катод выполнен в виде медной матрицы с включениями частиц

керамики BaTiO_3 50–120 мкм в пропорции 1:1. Для исследования характеристик катод был закреплен на торце катододержателя с помощью обоймы (Рисунок 6). Ток электронного пучка измерялся цилиндром Фарадея, расположенным после сетчатого анода. В аналогичных условиях испытывался медный многоострый катод. Все исследуемые катоды имели диаметр 40 мм.

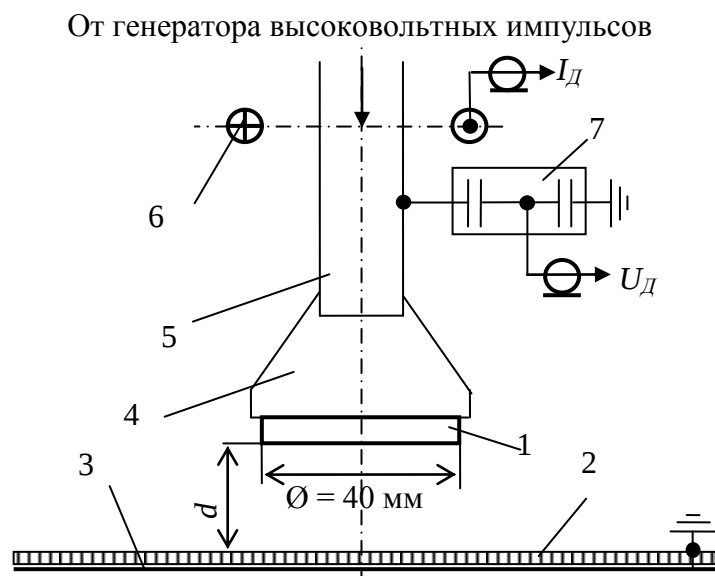


Рисунок 6. Схема проведения экспериментальных исследований характеристик вакуумного диода. 1 - катод; 2 - поддерживающая решётка оптической прозрачностью 92%; 3 - фольга Ti 50 мкм; 4 - обойма катода; 5 - катододержатель; 6 - пояс Роговского; 7 - емкостной делитель напряжения. d - длина катод-анодного промежутка.

Кривые импеданса диода (Рисунок 7) приведены для ускоряющих промежутков в диапазоне от 16 до 43 мм. Резкое падение импеданса определяется формированием взрывоэмиссионной плазмы и, соответственно, нарастанием тока через диод.

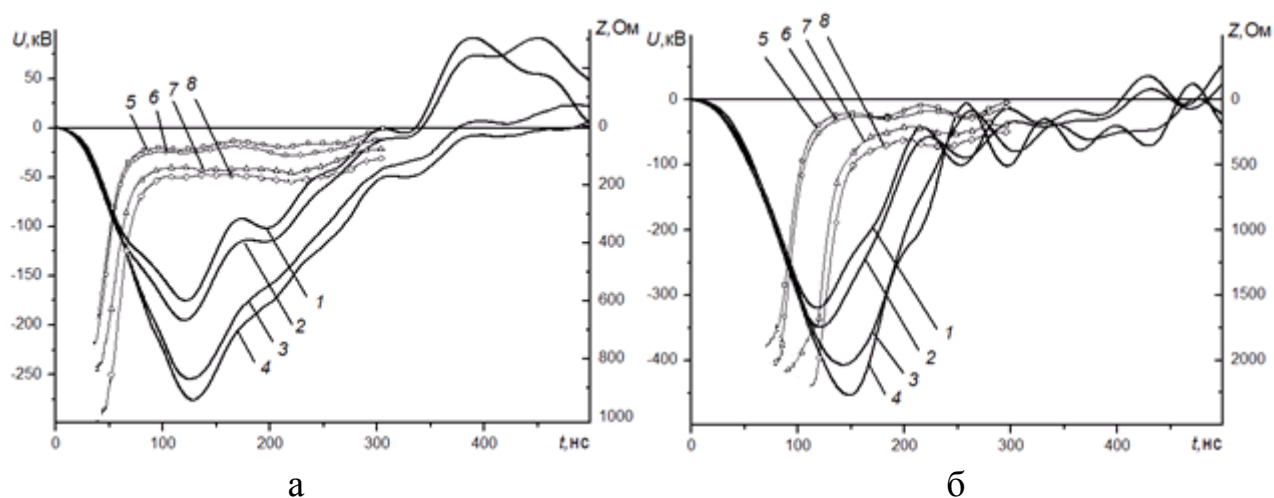


Рисунок 7. Напряжение на ускоряющем промежутке (1, 2, 3, 4) и импеданс диодов (5, 6, 7, 8) с медным многоострийным (а) и композиционным $\text{Cu}+50\text{BaTiO}_3$ (б) катодами при $d=16$ мм (1, 5), $d=20$ мм (2, 6), $d=34$ мм (3, 7), $d=43$ мм (4, 8).

Установлено, что максимальное время запаздывания 135 нс после приложения ускоряющего напряжения обеспечивается в вакуумном электронном диоде с плоским композиционным катодом $\text{Cu}+50\text{BaTiO}_3$ при скорости нарастания ускоряющего напряжения в диапазоне $(3,5-4,5) \times 10^{12}$ В/с и напряжённости электрического поля 1×10^7 В/м в ускоряющем промежутке.

Анализ полученных кривых импеданса диода с разными катодами выявил схожий характер изменения импеданса за время длительности импульса напряжения (рисунок 7, а, б, в). Для описания изменения импеданса диода для всех исследуемых катодов была принята аппроксимация кривой импеданса диода линейными участками, показанная на рисунке 8, а. Для оценки величины вносимой погрешности были проведены сравнительные исследования кривых мощности развиваемой в диоде с разными катодами (рисунок 8, б).

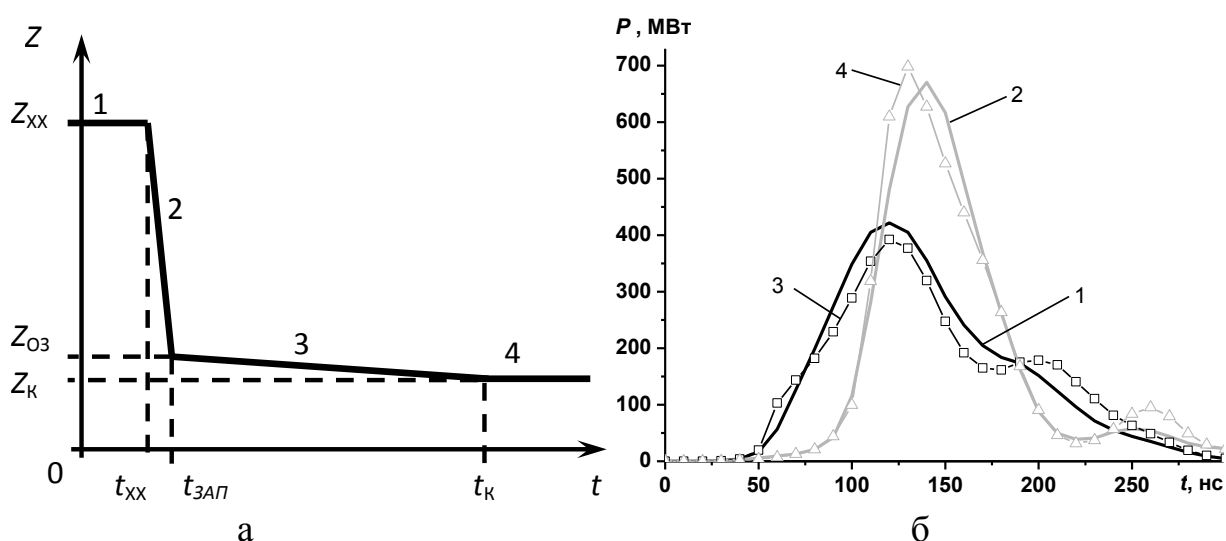


Рисунок 8. Аппроксимация кривой изменения импеданса вакуумного электронного диода (а) с указанием линейных участков (1, 2, 3, 4) и опорных моделируемых величин: Z_{XX} – начальный импеданс диода; Z_{O3} – импеданс диода при ограничении тока объёмным зарядом; Z_K – импеданс диода при окончании импульса ускоряющего напряжения; t_{XX} – длительность действия начального импеданса диода; $t_{3АП}$ – время формирования плазменной эмиссионной поверхности катода; t_K – длительность импульса ускоряющего напряжения. Характерные кривые мощности (б), полученные экспериментально (1,2) и при моделировании (3,4) для вакуумного электронного диода с медным многоострийным катодом (1, 3), композиционным катодом $\text{Cu}+50\text{BaTiO}_3$ (2, 4).

Сравнительный анализ результатов моделирования с полученными экспериментальным путём величинами, показал, что применение аппроксимации линейными участками кривой изменения импеданса вакуумного диода с исследуемыми катодами определяет описание реальных значений амплитуды мощности, развиваемой в диоде с точностью 7%, а интегральных значений выделенной в диоде энергии с точностью 5 % для всех исследуемых катодов.

Расчётная методика описания изменений импеданса за время длительности импульса была использована для разработанной модели генератора высоковольтных импульсов для определения влияния запаздывания тока в

электронном диоде на формы и величины тока пучка и ускоряющего напряжения. Для этого определялась эффективность согласования импедансов генератора высоковольтных импульсов и нагрузки, как отношение энергии, выделенной в диоде за длительность импульса ускоряющего напряжения, к переданной генератором энергии. По результатам обработки более 500 осциллограмм были построены семейства кривых, приведённые на рисунке 9.

Анализ приведённых кривых позволил сделать следующие выводы: максимальное значение эффективности согласования импедансов генератора и диода, а так же мощности в диоде достигается при значении запаздывания 125 нс (рисунок 9, а и б). При этом зависимость амплитуды импульса напряжения на диоде от импеданса диода снижается с увеличением времени запаздывания (рисунок 9, в и г)

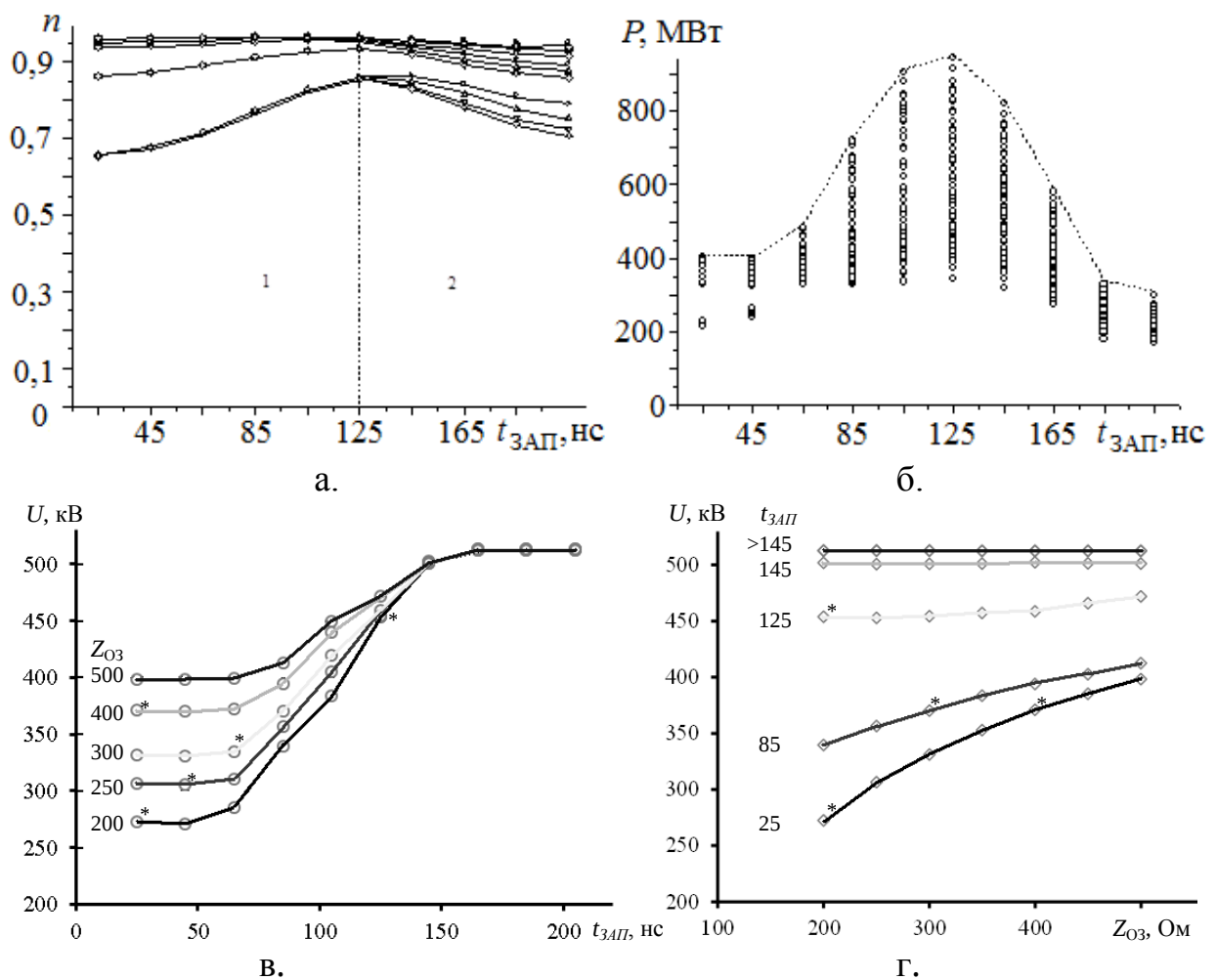


Рисунок 9. Кривые зависимости эффективности согласования генератора высоковольтных импульсов и электронного диода от времени запаздывания тока эмиссии (а, б), а также зависимость амплитуды импульса напряжения на диоде от времени запаздывания тока (в) и импеданса нагрузки (г).

Таким образом, для применяемой схемы формирования высоковольтных импульсов (емкостной накопитель, импульсный трансформатор) определены параметры вакуумного электронного диода (запаздывание тока в диоде при

соответствующем ускоряющем промежутке), которые влияют на эффективность согласования генератора высоковольтных импульсов и нагрузки (вакуумного электронного диода). Параметрами, в наибольшей степени удовлетворяющими найденным условиям, из исследованных, обладает плоский композиционный катод $\text{Cu}+50\text{BaTiO}_3$ при величине ускоряющего зазора 34 мм.

В четвёртой главе диссертации приводятся результаты исследования генерации и инжекции пучка электронов в атмосферу с частотой следования до 50 имп./с. В испытаниях использовали плоский композиционный катод $\text{Cu}+50\text{BaTiO}_3$. Были проведены предварительные испытания генерации электронного пучка без инжекции пучка электронов в атмосферу, при этом разделительная фольга (рисунок 6) заменялась охлаждаемым металлическим фланцем. Испытания показали, что при частоте следования импульсов 60 имп./с и скорости откачки 2350 л/с остаточное давление в вакуумной камере диода, вследствие процессов, происходящих в вакуумной камере ускорителя, повышается до 10^{-3} Торр, что приводит к электрическому пробое вакуумных изоляционных промежутков электронного диода и прекращению генерации электронного пучка.

Частота следования импульсов тока пучка при инжекции в атмосферу с конструкцией выпускного окна, схематично показанной на рисунке 6, ограничивалась величиной 30 имп./с. Ограничение связано с перегревом и деформацией опорной решётки 2 (рисунок 6). Разделительная фольга 3 (Ti 50 мкм) при этом охлаждалась потоком водовоздушной смеси с расходом воды 5 л/мин и 10-ти кратным коэффициентом эжекции.

Для увеличения частоты следования импульсов при инжекции пучка в атмосферу было разработана и испытана конструкция выпускного окна без опорной решётки (рисунок 10а).

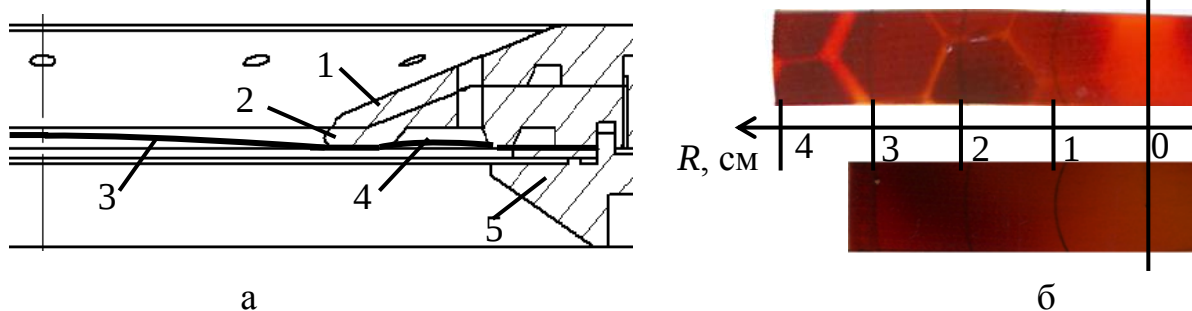


Рисунок 10. Конструкция выпускного окна без поддерживающей решётки (а). 1 – опорный фланец, 2 – теплоотвод, 3 – Фольга Ti 50 мкм, 4 – натяжной паз, 5 – прижимной фланец. Автограф электронного пучка на дозиметрической плёнке ПОР за 5 импульсов для выпускного окна с опорной решёткой (сверху) и без неё (снизу).

Применение выпускного окна без опорной решётки с охлаждением разделительной фольги водовоздушным потоком при одинаковом расходе воды обеспечило увеличение частоты следования импульсов тока пучка до 50 имп./с при испытании в течение 10^5 импульсов тока пучка.

Исследование инъекции электронного пучка при охлаждении разделительной фольги выпускного окна только потоком атмосферного воздуха, показало устойчивую работу ускорителя с частотой следования до 20 имп./с. После 10^5 импульсов тока пучка, инжектированных в атмосферу, на поверхности разделительной фольги со стороны катода обнаружена плёнка серого цвета толщиной 5 мкм. По результатам элементного анализа, определено, что она состоит, в основном, из углерода. Предположительно, основной источник углерода в вакуумной камере диода – пары масла вакуумной откачной системы.

Дальнейшие исследования генерации электронного пучка с частотой следования до 50 имп./с проводились после модернизации ускорителя, связанной с заменой паромасляного вакуумного откачного поста на безмасляный, основанный на криогенном высоковакуумном насосе. Кроме того, ускоритель был компактно размещён в мобильной станине, оснащён микроконтроллерной системой автоматического управления и локальной биологической защитой (рисунок 11).

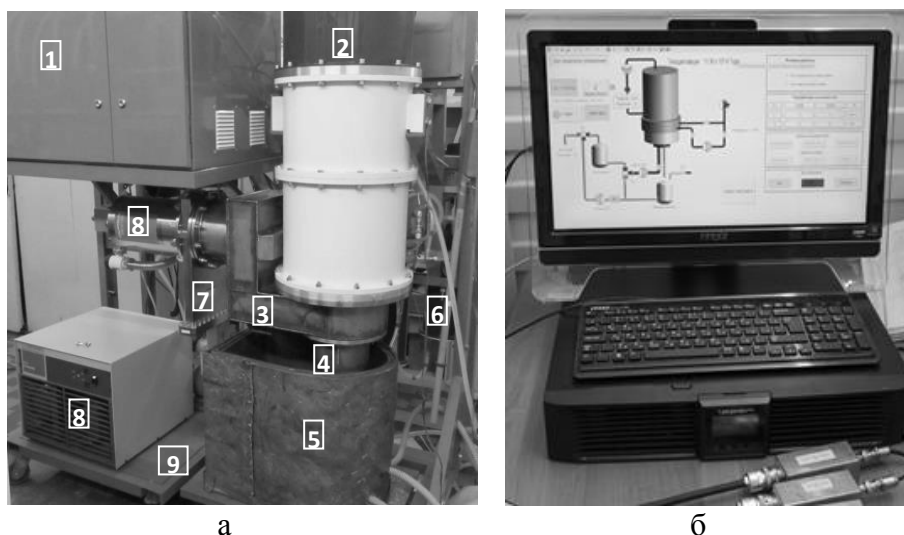


Рисунок 11. Внешний вид импульсного электронного ускорителя АСТРА-М (а) со снятой радиационной защитой. 1 – источник первичного электропитания; 2 – генератор высоковольтных импульсов; 3 – вакуумная камера электронного диода; 4 – камера обработки; 5 – местная радиационная защита; 6 – система регенерации и охлаждения трансформаторного масла; 7 – высоковакуумный затвор; 8 – высоковакуумный насос; 9 – станина. Внешний вид панели оператора (б) ускорителя АСТРА-М.

Система управления ускорителем обеспечивает работу в режиме удалённого контроля и автоматическую регистрацию эксплуатационных параметров ускорителя. Термограмма поверхности высоковольтного блока (рисунок 12а), а так же регистрация температуры трансформаторного масла в высоковольтном блоке ускорителя в течение 2×10^5 импульсов тока пучка (рисунок 12б) подтверждают достаточность применяемого охлаждения элементов высоковольтного блока ускорителя для обеспечения температурных режимов работы ускорителя.

Зависимость остаточного давления в вакуумной камере ускорителя от числа импульсов пучка (рисунок 12в) демонстрирует снижение давления и его стабилизацию после 2×10^4 импульсов.

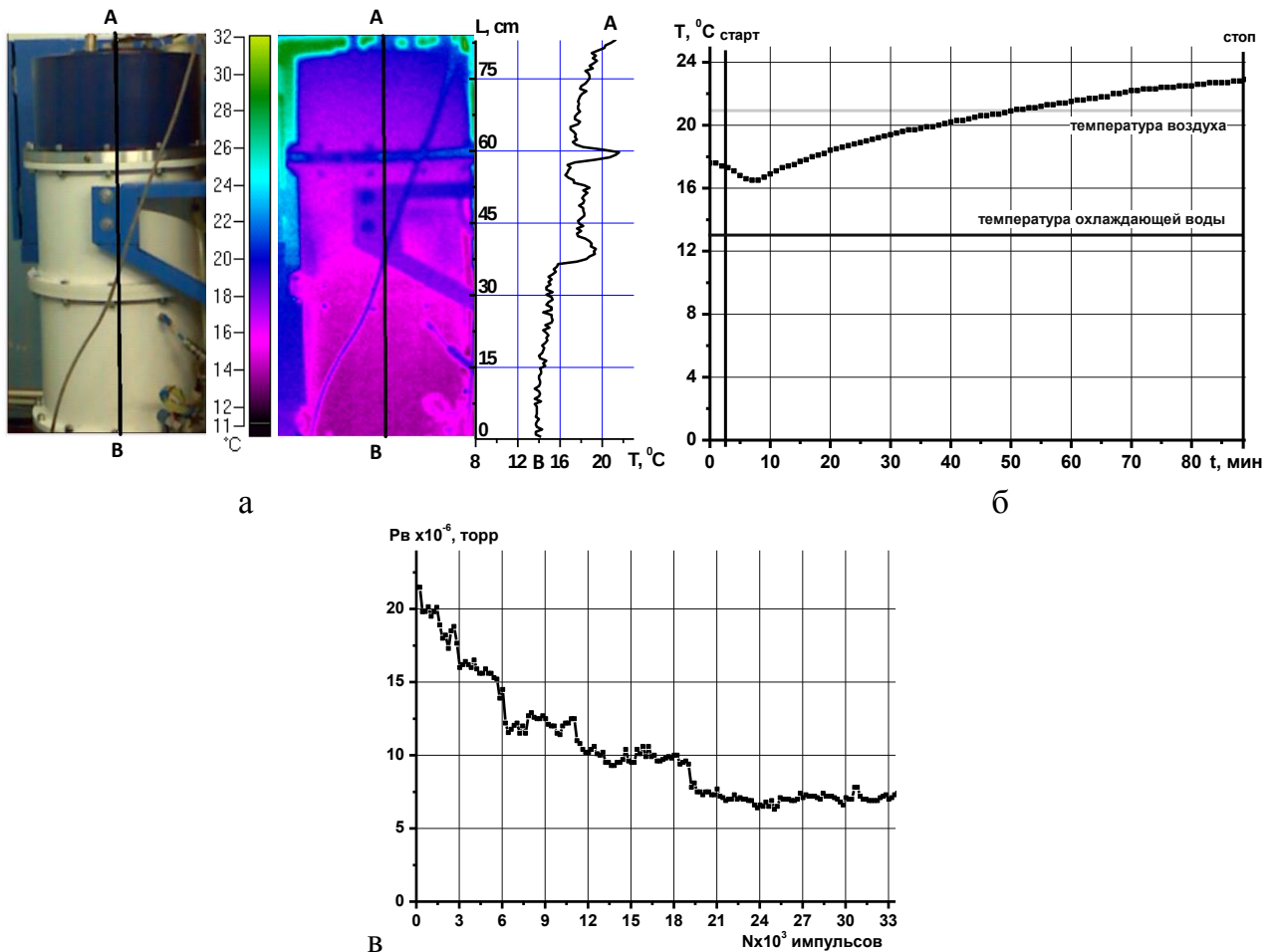


Рисунок 12. Тепловое изображение (тепловизор Fluke Ti10) и распределение температуры на поверхности высоковольтного блока ускорителя (а) после безостановочной работы ($3,3 \times 10^4$ имп., 40 имп./с). Изменение температуры трансформаторного масла (б) за время безостановочной работы ускорителя при частоте следования 40 имп./с. Изменение давления остаточной атмосферы (в) при 40 имп./с.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность генерации импульсного электронного пучка с частотой следования до 50 имп./с и инъекцией его в атмосферу при охлаждении разделительной фольги водовоздушным потоком с расходом воды 5 л/мин.

Пятая глава диссертации содержит результаты исследований практического применения импульсного электронного пучка с частотой следования до 50 имп./с для обработки сточных вод с целью обеззараживания. Из литературных источников и согласно нашим исследованиям, что для обеспечения эффекта обеззараживания сточной воды необходимо обеспечить поглощённую дозу 2-4 кГр. Для создания водовоздушной смеси и подачи сточной воды в область обработки импульсным электронным пучком была разработана реакционная камера, конструкция которой показана на рисунке 13.

Обрабатываемая вода применялась также для охлаждения разделительной фольги выпускного окна ускорителя.

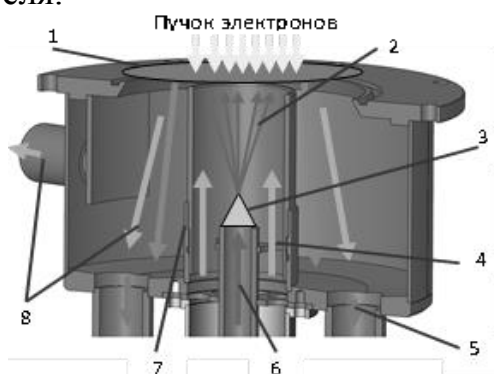


Рисунок 13. Камера обработки воды импульсным электронным пучком. 1 – выпускное окно; 2 - капли воды 50-100 мкм; 3 – форсунка; 4 - поток атмосферного воздуха; 5 – поток обработанной воды; 6 – поток исходной воды; 7 – барьер; 8 – воздухоотвод.

Перед подачей в область обработки импульсным электронным пучком, сточная вода подвергалась очистке от механических примесей. Результаты обработки воды 3 л/мин импульсным электронным пучком с частотой 40 имп./с представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты бактериологического анализа проб.

Определяемые показатели	Результат исследования		Гигиенич. норматив	Ед. изм.	НД
	Исходная вода	После обработки			
Общие колиформные бактерии	2.1×10^6	менее 100	не более 500	КОЕ/100 мл	МУК 4.2.1884-04
Колифаги.	42	не обн.	не более 10	БОЕ/100 мл	МУК 4.2.1884-04
Термотолерантные колиформные бактерии	2.1×10^6	менее 100	не более 100	КОЕ/100 мл	МУК 4.2.1884-04
Возбудители заболеваний семейства кишечных	не обн.	не обн.	отсутствие	–	МУ 2285-81
Жизнеспособные яйца гельминтов, онкосферы тениид	не обн.	не обн.	отсутствие	–	МУК 4.2.2314-08
Жизнеспособные цисты кишечных патогенных простейших	не обн.	не обн.	отсутствие	–	МУК 4.2.1884-04

Таким образом, продемонстрирована возможность практического применения разработанного импульсного ускорителя электронов в частотном режиме для обработки сточных вод с целью обеззараживания.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе, которые заключаются в следующем:

1. С помощью разработанной расчётной схемы генератора ускорителя установлены и экспериментально подтверждены закономерности формирования импульсов мощности в диоде при разряде ёмкости через импульсный трансформатор на вакуумный электронный диод с минимальным запаздыванием эмиссионного тока после приложения импульса напряжения;

2. Исследованы временные и вольтамперные характеристики вакуумного электронного диода с плоскими катодами из различных материалов, обеспечивающие разное время запаздывания тока электронной эмиссии в схеме ускорителя, основанной на разряде ёмкостного накопителя на электронный диод через импульсный трансформатор. Обнаружено, что при одинаковых параметрах генератора и ускоряющего диодного промежутка, увеличение запаздывания тока электронной эмиссии для диода на основе композиционного катода с медной матрицей приводит к увеличению амплитуды импульса ускоряющего напряжения, и к увеличению энергии, переносимой электронным пучком за импульс по сравнению с катодами, имеющими меньшее время запаздывания;

3. Разработана и экспериментально проверена расчётная модель схемы формирования импульсов ускоряющего напряжения, которая учитывает запаздывание протекания тока в вакуумном электронном диоде и влияние элементов конструкции ускорителя, основанного на разряде ёмкостного накопителя через импульсный трансформатор на электронный диод. Расчётная модель позволяет определять энергию, выделяемую в диоде ускорителя с погрешностью менее 5% в диапазоне импеданса диода, обеспечивающего аperiodический разряд ёмкости основного накопителя энергии;

4. С помощью расчётной модели определены основные закономерности влияния запаздывания тока электронной эмиссии в вакуумном диоде на амплитуду импульса ускоряющего напряжения и согласование импедансов генератора и нагрузки (диода) ускорителя по схеме ёмкостной накопитель, импульсный трансформатор, электронный диод. Установлено, что при увеличении времени запаздывания тока в диоде уменьшается зависимость амплитуды импульса ускоряющего напряжения от импеданса нагрузки;

5. Экспериментально определены режимы частотной генерации и инжекции электронного пучка в атмосферу. Установлено, что при использовании выпускного окна без поддерживающей решётки, частота повторения электронного пучка, инжектированного в атмосферу (6-9 Дж/имп.), может составлять 20 имп./с при охлаждении разделительной фольги (Ti 50 мкм) потоком газа и 50 имп./с при охлаждении водовоздушным потоком;

6. Экспериментально проверена возможность использования частотного (40 имп./с) режима работы ускорителя по схеме ёмкостной накопитель, импульсный трансформатор, вакуумный электронный диод с запаздыванием тока электронной эмиссии для обработки водных растворов в водовоздушном потоке с целью обеззараживания. При поглощённой дозе 4 кГр в воде обеспечивается снижение бактериологических показателей до гигиенических нормативов.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. *Egorov I., Esipov V., Remnev G., Kaikanov M., Lukonin E. and Poloskov A.* A high-repetition rate pulsed electron accelerator //IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2013. – V.20. - №4. – P.1334-1339. (импакт-фактор 1.228)
2. *Egorov I. S.* Note: Numerical simulation and experimental validation of accelerating voltage formation for a pulsed electron accelerator // Review of Scientific Instruments. - 2014 - Vol. 85. - Issue 6 Article number 066112. - p. 1-4 (импакт-фактор 1,584)
3. *Egorov I. S., Kaikanov M. I., Kolokolov D. Y., Merinova L. R., Remnev G. E., Sazonov R. V., Stepanov A. V., Voyno D. A., Maslov A. S., Syarg B. A.* Treatment of Industrial and Household Waste Water with the Pulse Electron Accelerator-Based Setup // Известия вузов. Физика. - 2012 - Т. 55 - №. 10/3. - С. 61-64.
4. *Egorov I. S., Remnev G. E., Kaikanov M. I., Lukonin E. I., Esipov V. S., Poloskov A. V., Kolokolov D. Y.* Repetitive source of pulsed electron beams // Известия вузов. Физика. - 2012 - Т. 55 - №. 10/3. - С. 58-60
5. *Kaikanov M. I., Egorov I. S.* Effect of high current electron beam of nanosecond duration on n-decane // Известия вузов. Физика. - 2012 - Т. 55 - №. 10/3. - С. 133-135.
6. Вагнер М. И., *Егоров И. С., Кайканов М. И., Прибытков Г. А., Ремнёв Г. Е., Савицкий А. П., Степанов А. В.* Исследование характеристик планарного диода с композиционным катодом // Известия вузов. Физика. - 2011 - Т. 54 - №. 11/3 - С. 80-85.
7. *Егоров И. С., Ежов В. В., Полосков А. В.* Исследование закономерностей изменения импеданса электронного диода с плоскими катодами // Фундаментальные исследования. - 2014 - №. 9-9. - С. 1964-1968.
8. *Егоров И. С., Кайканов М. И., Луконин Е. И., Ремнёв Г. Е., Степанов А. В.* Частотно-импульсный электронный ускоритель “Астра” // Приборы и техника эксперимента. - 2013 - №. 5. - С. 81-84.
9. *Егоров И. С., Кайканов М. И., Ремнёв Г. Е.* Выходное окно сильноточного ускорителя электронов «АСТРА» // Известия Томского политехнического университета. - 2013 - Т. 322 - №. 2. - С. 91-94.
10. *Егоров И. С.* Оптимизация параметров электронного диода частотного сильноточного ускорителя [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. - 2013 - №. 6. - С. 1-8.
11. Кайканов М. И., Ремнёв Г. Е., Юдина Н. В., *Егоров И. С., Лоскутова Ю. В.* Исследование реологических свойств нефти при облучении импульсным сильноточным электронным пучком // Известия вузов. Физика. - 2012 - Т. 55 - №. 6/2 - С. 37-41.
12. Ремнёв Г. Е., *Егоров И. С., Кайканов М. И., Канаев Г. Г., Луконин Е. И., Нашилевский А. В., Степанов А. В.* Исследование генерации импульсного электронного пучка в частотном режиме работы ускорителя // Известия вузов. Физика. - 2011 - Т. 54 - №. 11/3 - С. 74-79.
13. Ремнёв Г. Е., Степанов А. В., Кайканов М. И., Сазонов Р. В., Колоколов Д. Ю., Меринова Л. Р., *Егоров И. С.* Импульсно-пучковая обработка

промышленно-бытовых сточных вод // Известия вузов. Физика. - 2013 - Т. 56 - №. 7/2. - С. 42-47.

14. *Egorov I. S.*, Есипов В. С., Луконин Е. И., Полосков А. В. Автозапуск тиратрона с холодным катодом в генераторе импульсного напряжения // Приборы и техника эксперимента. - 2015 - №. 5. - С. 63-66.

15. *Egorov I. S.*, Esipov V. S., Remnev G. E., Kaikanov M. I., Lukonin E. I., Poloskov A. V. A high-repetition rate pulsed electron accelerator // Power Modulator and High Voltage: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference, San Diego, June 3-7, 2012. - New York: IEEE, 2012 - p. 716-719.

16. *Egorov I.*, Kaikanov M. Exit window for the Astra repetitive high-current pulsed electron accelerator // 19th International Conference on High-Power Particle Beams, September 30 - October 4, 2012, Karlsruhe, Germany – P.181

17. Remnev G. E., Sazonov R. V., *Egorov I. S.* et al. Tomsk polytechnic university research in designing nanosecond electron sources and their application // 41st IEEE International Conference on Plasma Science and 20th International Conference on High-Power Particle Beams: Abstracts, Washington, May 25-29, 2014.

18. Ремнёв Г. Е., *Egorov I. S.*, Кайканов М. И., Канаев Г. Г., Луконин Е. И., Нашилевский А. В., Степанов А. В. Частотно-импульсный электронный ускоритель для радиационных технологий // Ядерная и радиационная физика: Доклады 8-й Международной конференции, Алматы, 20-23 Сентября 2011. - Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2011 - С. 549-555.

19. Ремнёв Г. Е., Степанов А. В., Войно Д. А., *Egorov I. S.*, Кайканов М. И., Маслов А. С., Меринова Л. Р., Попов А. В., Сярг Б. А., Шиян Л. Н. Очистка и стерилизация промышленно-бытовых стоков импульсным электронным пучком наносекундной длительности // Ядерная и радиационная физика: Доклады 8-й Международной конференции, Алматы, 20-23 Сентября 2011. - Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2011 - С. 506-509.

Патент РФ №2473436 RU, МПК C02F1/30. Способ очистки сточных вод/ Маркелов В.А., Михаленко В.А., Маслов А.С., Сярг Б.А., Попов А.В., Ремнев Г.Е., Степанов А.В., Кайканов М.И., Меринова Л.Р., *Egorov I. S.* Заявлено 05.08.2011. Оpubл. 27.01.2013, Бюл. № 22.

Список цитируемой литературы

- a. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника М: Наука, 2004. 704 с.
- b. Схемотехника и применение мощных импульсных устройств / Хансиоахим Блум; пер. с англ. Рабодзея А. М. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 352 с.
- c. Соковнин С.Ю. Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 225с.
- d. Коровин С.Д., Ростов В.В. Сильноточные наносекундные импульсно-периодические ускорители электронов на основе трансформаторов Тесла // Известия вузов. Физика. – 1996. – №12. – С. 21-30.
- e. Бочков В.Д., Королев Ю.Д., Франк К.Ф. и др. Псевдоискровые разрядники для схем питания импульсных лазеров // Изв. вузов. Физика. – 2000. – № 5.– С. 97-105.

- f. Канаев Г. Г., Кухта В. Р., Лопатин В. В. и др. Высоковольтный импульсный генератор для электроразрядных технологий // ПТЭ. – 2010. – № 1. – С. 105-109.
- g. Импульсный радиолиз и его применение/ Пикаев А.К, Кабакчи С.А., Макаров И.Е., Ершов Б.Г.; М.: Атомиздат, 1980. – 280 с.
- h. Савицкий А.П., Прибытков Г.А., Вагнер М.И., Кутенков О.П. Порошковые композиционные материалы "металл-неметалл" для взрывоэмиссионных катодов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 2. – С. 83-89.