

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

На правах рукописи

Егоров Иван Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО УСКОРИТЕЛЯ
С УЧЁТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ В ДИОДЕ**

**Специальность: 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника**

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

**Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Ремнёв Геннадий Ефимович**

Томск – 2015

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Сильноточные импульсные ускорители электронов	11
1.1. Генераторы высоковольтных импульсов ускорителей электронов	12
1.2. Электронный диод импульсного ускорителя электронов	19
1.3. Запаздывание тока электронной эмиссии в вакуумном диоде ускорителя	24
1.4. Применение ускорителей электронов для обработки водных растворов	25
Выводы	28
Глава 2. Устройство и диагностическое оборудование импульсного ускорителя электронов «АСТРА»	30
2.1. Принципиальная схема импульсного ускорителя электронов	31
2.2. Диагностическое оборудование импульсного ускорителя электронов	32
2.2.1. Средства измерения импульсного напряжения	33
2.2.2. Средства измерения импульсных токов	34
2.2.3. Средства дополнительной диагностики параметров электронного пучка	35
2.3. Конструктивное исполнение высоковольтного генератора ускорителя	36
2.3.1. Ёмкостный накопитель энергии	37
2.3.2. Высоковольтный коммутатор	38
2.3.3. Импульсный трансформатор	39
2.3.4. Высоковольтный изолятор	40
2.4. Исследование параметров выходной цепи генератора высоковольтных импульсов	42
2.4.1. Исследование параметров выходной цепи генератора в режиме короткого замыкания	42
2.4.2. Испытание генератора с резистивной нагрузкой	45
2.4.3. Параметры схемы замещения выходной цепи генератора	49
2.5. Моделирование выходной цепи генератора высоковольтных импульсов	51
2.5.1. Вычислительная модель выходной цепи генератора	51
2.5.2. Моделирование работы генератора в режиме короткого замыкания	53
2.5.3. Моделирование работы генератора на высокоомную нагрузку	53
Выводы	55
Глава 3. Вакуумный электронный диод ускорителя «АСТРА»	56
3.1. Схема проведения экспериментальных исследований ВАХ вакуумного электронного диода с плоскими катодами	59
3.2. Исследование ВАХ вакуумного электронного диода с плоскими катодами	60

3.3. Определение энергии, выделяемой в вакуумном электронном диоде с плоскими катодами	62
3.4. Вычислительная модель вакуумного электронного диода ускорителя «АСТРА»	65
3.4.1. Закономерности изменения импеданса вакуумного электронного диода	66
3.4.2. Вычислительная модель диода с учётом запаздывания электронной эмиссии	69
3.4.3. Оценка погрешностей, вносимых вычислительной моделью диода	70
3.5. Моделирование работы ускорителя «АСТРА» с учётом запаздывания электронной эмиссии в вакуумном электронном диоде	72
3.5.1. Эффективность передачи энергии, накопленной генератором, в вакуумный электронный диод	73
3.5.2. Зависимость амплитуды импульса напряжения от времени запаздывания тока в нагрузке генератора	75
3.5.3. Зависимость мощности, развиваемой в диоде, от времени запаздывания тока	76
Выводы	77
Глава 4. Частотный импульсный ускоритель электронов на основе диода с учётом запаздывания электронной эмиссии	79
4.1. Генерация электронного пучка в частотном режиме	79
4.2. Инжекция электронного пучка в атмосферу в частотном режиме	80
4.2.1. Выпускное окно без поддерживающей решётки	82
4.2.2. Выпуск электронного пучка в частотном режиме при охлаждении выпускного окна водовоздушным потоком	84
4.2.3. Выпуск электронного пучка в частотном режиме при охлаждении выпускного окна потоком газа	85
4.3. Частотный ускоритель электронов для радиационных технологий	86
4.3.1. Компоновочная схема ускорителя	86
4.3.2. Стабильность функционирования вспомогательных систем при частотной работе ускорителя	89
4.4. Практическое применение ускорителя с выводом пучка электронов в атмосферу в частотном режиме	91
Выводы	94
Заключение	95
Список сокращений и условных обозначений	97
Список литературы	98
Приложение А	108

Введение

Ускорители электронов прямого действия в настоящее время широко используются в качестве источников ионизирующего излучения в промышленности, медицине, для решения экологических задач [1, 2, 3, 4]. Этому способствуют высокие показатели эффективности и безопасности технологических процессов с применением таких ускорителей [2, 5, 6]. Уровень развития ускорителей непрерывного действия с энергией электронов порядка нескольких МэВ и высокой, сотни кВт мощностью достиг промышленного применения [6, 7, 8, 9]. Размеры элементов изоляции, а значит и габаритные размеры корпусов ускорителей прямого действия, главным образом зависят от класса напряжения, применяемого для ускорения электронов, что сказывается на стоимости изготовления ускорителя, удобстве его размещения и эксплуатации. Указанные факторы ограничивают использование упомянутых выше ускорителей непрерывного действия с высокой мощностью пучка для решения локальных задач, требующих компактных, мобильных источников электронных пучков меньшей мощности.

Применение импульсного способа формирования ускоряющего напряжения в ускорителях прямого действия позволяет увеличить пробивное напряжение изолирующих промежутков [10, 11], что делает возможным уменьшение размеров изоляторов по сравнению с ускорителями непрерывного действия аналогичного класса напряжения. Увеличение электрической прочности изолирующих промежутков проявляется уже при импульсах субмикросекундной длительности. Импульсная мощность ускорителей может при этом составлять сотни ГВт, что практически недостижимо для ускорителей непрерывного действия. Для увеличения средней мощности импульсных ускорителей электронов увеличивают частоту повторения импульсов тока пучка. Уменьшение размеров и веса импульсного ускорителя приводит к уменьшению его стоимости, к повышению удобства размещения и эксплуатации.

Актуальность работы

Формирование импульсов мощности субмикросекундной длительности для различных значений величины энергии, запаасаемой в первичном накопителе, является достаточно сложной задачей, не имеющей однозначного решения [12, 13]. Так, например, применение ёмкостного и индуктивного типов накопителей энергии, подразумевает использование разных (замыкающих и размыкающих соответственно) коммутаторов, формирующих фронт импульса мощности [11, 12]. Распространены схемы построения ускорителей, основанные на применении формирующих линий, импеданс которых определяет параметры генерируемых импульсов мощности [12, 14].

Обзор существующих импульсных ускорителей электронов, их принципиальных схем и конструктивного исполнения, которые представлены в современной научной и технической литературе [31–75], показал, что зачастую, применение сложных схем формирования

импульсов напряжения зачастую удорожает конструкцию, снижает надёжность и накладывает ограничения на возможные области практического применения оборудования. При этом основными проблемами при построении импульсных схем генерации электронных пучков, являются вопросы, связанные с коммутационными и эксплуатационными параметрами применяемых коммутаторов, электрической прочностью изолирующих промежутков, а так же вопросы генерации импульсного электронного пучка и его инжекции из вакуумной области генерации в области применения с атмосферным или повышенным давлением среды. В ряде случаев практического использования ускорителей, например при радиационно-химическом обеззараживании [78–80], становится целесообразным применение более простых, надёжных и дешёвых для реализации схем ускорителей с хорошими эксплуатационными характеристиками, при ухудшении энергетического спектра электронов пучка. Уширение энергетического спектра электронного пучка повышает требования к эксплуатационным характеристикам узла инжекции пучка в атмосферу, особенно для режимов с высокой частотой повторения импульсов для ускорителей с энергией электронов сотни кэВ. Таким образом, актуальными являются вопросы как усовершенствования "простых" схем формирования импульсов ускоряющего напряжения, так и вопросы генерации электронного пучка и инжекции его из диодной системы в атмосферу.

Диссертационная работа посвящена разработке и исследованию характеристик ускорителя электронов со схемой формирования импульсов ускоряющего напряжения [15*¹, 16*, 17*], основанной на разряде ёмкостного накопителя энергии через импульсный трансформатор, с вакуумным электронным диодом, использующим плоский композиционный катод на основе медной матрицы [18*]. Для диода с таким катодом было обнаружено существенное запаздывание протекания тока электронной эмиссии после приложения импульса ускоряющего напряжения [19*]. При этом были достигнуты значения ускоряющего напряжения, превышающие значения, полученные для катодов с меньшим временем запаздывания тока электронной эмиссии [20*], что привело к уменьшению потерь электронного пучка в разделительной фольге выпускного окна ускорителя [21*, 22*] и, как следствие, к улучшению условий эксплуатации ускорителя с высокой частотой повторения импульсов тока пучка. Экспериментально показано, что ускоритель с плоским композиционным катодом на основе медной матрицы способен генерировать и инжектировать импульсный электронный пучок в атмосферу с частотой до 50 имп./с [23*–26*]. Полученный режим генерации импульсного электронного пучка нашёл практическое применение для обеззараживания водных растворов в водовоздушном потоке [27*–30*].

¹ Ссылки, отмеченные символом «*», относятся к публикациям автора.

Исходя из значительного влияния времени запаздывания тока электронной эмиссии на параметры импульса ускоряющего напряжения, была сформулирована цель исследования.

Цель настоящей работы – определить основные закономерности влияния запаздывания тока электронной эмиссии в вакуумном диоде на параметры импульса напряжения в схеме ёмкостный накопитель, импульсный трансформатор, электронный диод, и, с учётом выявленных закономерностей, разработать импульсный ускоритель электронов с выпуском пучка в реакционную камеру атмосферного давления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Определить закономерности формирования импульсов мощности в вакуумном электронном диоде при разряде ёмкостного 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 ёмкостного 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 ёмкостного 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 ёмкостный 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 ёмкостном 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 ёмкостного 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 сточных вод.

Положения, выносимые на защиту

1. Расчётная модель схемы замещения позволяет определять величину энергии, выделенной в диоде импульсного электронного ускорителя на основе ёмкостного 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 ёмкостном 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 ёмкостного 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 ёмкостном 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 ёмкостного 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 поверхностей ускорителя, полученной с помощью тепловизора. Калибровка применяемого диагностического оборудования показала, что параметры функционирования ускорителя могут быть измерены с точностью не хуже 10 %. Результаты, полученные с применением программных пакетов для моделирования электрических процессов, подтверждаются результатами, полученными эмпирическим путём.

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, из 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, по сравнению с плоскими катодами из других материалов. Автором самостоятельно разработана и проверена расчётная модель схемы формирования импульсов ускоряющего напряжения, которая учитывает запаздывание протекания 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, конструкция высоковольтного блока 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.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель работы, поставлены задачи и аргументирована научная новизна результатов исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту положения.

В первой главе приведён анализ результатов литературного обзора по теме диссертации.

Во второй главе приведено описание принципа действия, конструктивного исполнения и состав диагностического оборудования импульсного электронного ускорителя «АСТРА», послужившего экспериментальным стендом для исследования характеристик катодов и прототипом создания ускорителя с диодом на основе запаздывания тока электронной эмиссии. Приведены результаты разработки и проверки расчётной модели схемы формирования импульсов ускоряющего напряжения.

Третья глава посвящена исследованию характеристик вакуумного электронного диода с плоскими катодами, для которых обнаружено разное запаздывание протекания тока электронной эмиссии от момента приложения импульса ускоряющего напряжения. Исследовано влияние характеристик диода на формирование импульса ускоряющего напряжения в схеме ёмкостный накопитель, импульсный трансформатор, электронный диод.

В четвертой главе приводятся результаты исследования генерации и инжекции пучка электронов в атмосферу с частотой повторения импульсов до 50 имп./с ускорителем с диодом на основе запаздывания протекания электронного эмиссионного тока. Глава содержит результаты исследований практического использования электронного пучка с частотой повторения 40 имп./с для обработки водных растворов в водовоздушном потоке с целью обеззараживания.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Глава 1. Сильноточные импульсные ускорители электронов

Потребность промышленности в простых, надёжных, удобных в использовании и обслуживании импульсных ускорителей электронов стимулирует развитие различных подходов к их созданию. Максимальная частота следования импульсов тока электронного пучка при этом ограничивается характеристиками узла с наименьшей рабочей частотой, минимальная же, должна совпадать с минимальной частотой, достаточной для успешного выполнения поставленной задачи. Для этого, с одной стороны, необходимо совершенствовать элементную базу ускорителя, соотнося для каждого узла, входящего в состав ускорителя, его стоимость и электрофизические характеристики, делая уклон в сторону стандартизации и унификации узлов. Несомненным преимуществом в таком случае будут обладать ускорители, содержащие в своём составе минимальное количество уникальных компонентов, не производимых промышленностью, прежде всего коммутаторов. С другой стороны, возможно также, учитывая условия работы узлов, разработать схемные решения, позволяющие упростить конструкцию, а, значит, и уменьшить стоимость ускорителя при оправданном снижении его рабочих характеристик.

При всем многообразии существующих подходов к построению сильноточных ускорителей прямого действия, разделение на функциональные части можно представить следующим образом:

- *Источник питания* (ИП). Преобразовывает энергию питающей промышленной сети в энергию первичного накопителя.
- *Генератор высоковольтных импульсов* (ГВИ). Осуществляет амплитудно-временную компрессию энергии, накопленной в первичном накопителе.
- *Электронный диод* (ЭД) предназначен для трансформации накопленной энергии в энергию электронного пучка, а так же для транспортировки пучка к области применения.
- *Диагностическое оборудование* осуществляет функцию оперативного контроля процессов, протекающих во время работы ускорителя.
- *Система управления и автоматики* для удобного и безопасного изменения режимов работы оборудования.
- *Вспомогательное оборудование*. Состав зависит от реализуемого технологического процесса, например, системы охлаждения, системы подачи объектов и т.д.

Каждая из этих частей критически важна для успешного функционирования ускорителя в целом, части являются самостоятельными направлениями для исследований и не могут быть охвачены подробно в пределах одной, отдельно взятой работы. Поэтому, автор считает целесообразным ограничиться рассмотрением их ключевых характеристик имеющих отношение к исследованиям, проводимым в рамках данной работы.

1.1. Генераторы высоковольтных импульсов ускорителей электронов

В общем случае, функциональная задача генератора импульсов относительно медленно накопить энергию, сообщаемую им от ИП [31].и максимально быстро передать её в нагрузку. При всем многообразии схемных решений, их можно разделить по применяемому способу промежуточного накопления энергии в электрическом либо магнитном поле [12]. В электрическом поле запасается энергия:

$$E_{\text{эл}} = CU_0^2/2, \quad (1)$$

где C – ёмкость накопителя энергии;

U_0 – напряжение, до которого заряжен накопитель,

в магнитном поле:

$$E_{\text{эм}} = LI_0^2/2,$$

где L – индуктивность накопителя;

I_0 – ток протекающий по индуктивности.

В случае ёмкостного накопителя, формирование импульса происходит при подключении нагрузки к обкладкам ёмкости с помощью замыкающего коммутатора, при этом через нагрузку протекает ток:

$$I_n = CdU/dt, \quad (2)$$

где $U(t)$ – напряжение на конденсаторе в процессе его разрядки.

В случае применения индуктивного накопителя энергии, для формирования импульса напряжения на выходе генератора, необходимо разорвать ток, протекающий через индуктивность, в таком случае, на ней появляется э.д.с. самоиндукции:

$$\mathcal{E}_n = -LdI/dt,$$

где $I(t)$ – ток в процессе формирования импульса.

В [11] рассмотрены ограничения, определяющие максимальную плотность запасаемой энергии для вариантов указанных накопителей. Из оценочных расчётов [11] следует, что максимальная плотность запасённой в индуктивном элементе энергии может более чем в 100 раз превышать энергию, запасённую в ёмкости. Для того чтобы запасённая энергия высвободилась в нагрузке, состояние «контура сжатия энергии» изменяется с помощью коммутатора. Зачастую, именно параметры коммутатора определяют максимальную частоту следования генерируемых импульсов.

Коммутаторы, применяемые вместе с ёмкостными накопителями энергии, замыкающие ключи, подробно представлены в литературе, имеют широкий диапазон рабочего напряжения и коммутируемых токов. Высоковольтные (>5 кВ) замыкающие ключи, прежде всего, представлены тиратронами, искровыми и псевдоискровыми разрядниками [32]. Особые

требования предъявляются к коммутаторам генераторов, в составе которых присутствуют формирующие линии с распределёнными параметрами, так как параметры импульса на нагрузке напрямую зависят от характеристик коммутатора [12]. Традиционным видом коммутаторов для таких схем свыше 200 кВ являются искровые разрядники, которые, как правило, выполняются газовыми, с повышенным давлением, что в ряде случаев ограничивает максимальную частоту следования импульсов 100 Гц при относительно небольшом (в сравнении с полупроводниковыми приборами) ресурсе [33].

Вместе с тем, изготовление размыкающего ключа для индуктивных накопителей представляется технически более сложной задачей. Наиболее успешно для этих целей применяются полупроводниковые прерыватели тока (ППТ) [34], которые, обладая рядом существенных преимуществ [35], не могут на текущий момент по доступности и степени освоения всё же превзойти замыкающие коммутаторы. По этой причине, с индуктивными накопителями, как правило, выполняются выходные звенья сжатия мощности генераторов.

Наряду с искровыми и полупроводниковыми коммутаторами, в схемах генераторов импульсных ускорителей электронов так же используются магнитные коммутаторы, дроссели насыщения, которые в ряде случаев могут также выполнять роль накопителей энергии [36]. Примером применения магнитных элементов в схеме формирования импульса высокого напряжения являются ГВИ ускорителей электронов ГЕЗА [37, 38], созданных для модификации поверхности материалов в НИИ ЭФА, г. Санкт-Петербург.

Традиционными, для формирования импульсов высокого напряжения, являются генераторы Аркадьева-Маркса. При работе схемы, заданное количество конденсаторов n заряжаются параллельно до значения U_z , затем с помощью замыкающих коммутаторов соединяются последовательно при генерации на нагрузке импульса напряжения nU_z в идеальном приближении. В зависимости от компоновки и параметров разрядного контура, генератор Аркадьева-Маркса может использоваться как зарядное устройство накопительных линий генераторов, либо непосредственно формировать на нагрузке импульс длительностью порядка $10^8 \div 10^9$ секунд.

Применение и развитие данной схемы формирования импульсов имеет практически вековую историю, в том числе известно о применении схемы для создания импульсно-периодических генераторов [39]. Однако основной областью применения данного типа генератора является создание ускорителей, предназначенных для генерации электронных пучков большого сечения при плотностях тока до 15-20 А/см² и частоте следования импульсов единицы герц. Например, ускоритель «Модуль», способный генерировать электронный пучок с энергией 500-600 кэВ на площади до 1 м². Созданный в Институте сильноточной электроники СО РАН ускоритель использует ГВИ по схеме Аркадьева-Маркса с вакуумной изоляцией [39].

Газовую изоляцию при повышенном давлении использует ГВИ по схеме Аркадьева-Маркса ускорителя ТЭУ-500, разработанный в ТПУ [40]. Указанный генератор используется для заряда ДФЛ нагруженной на вакуумный электронный диод с взрывоэмиссионным катодом через согласующий трансформатор [41, 42]. Описанная схема ускорителя позволила получать электронный пучок с энергией электронов до 500 кэВ при длительности импульса тока пучка 60 нс и выведенной энергии в пучке до 200 Дж.

В настоящий момент, схема Аркадьева-Маркса до сих пор остаётся популярной, в том числе за рубежом, для формирования коротких импульсов высокого напряжения. Например, представленный компанией Applied Physical Electronics генератор [43] обеспечивает импульс напряжения длительностью 20 нс на полувысоте при времени нарастания напряжения 3 нс до 270 кВ на нагрузке 50 Ом, в которой выделяется за импульс 32 Дж энергии.

Построение по схеме Аркадьева-Маркса генератора с быстродействующими твердотельными коммутаторами для заряда формирующей линии с коммутацией магнитным ключом (Рисунок 1) позволяет существенно улучшить частотные и ресурсные характеристики ускорителя [44]. Приведённый ускоритель способен генерировать импульсный пучок с энергией электронов до 500 кэВ, током до 100 кА и длительностью 140 нс с частотой повторения до 5 имп./с.

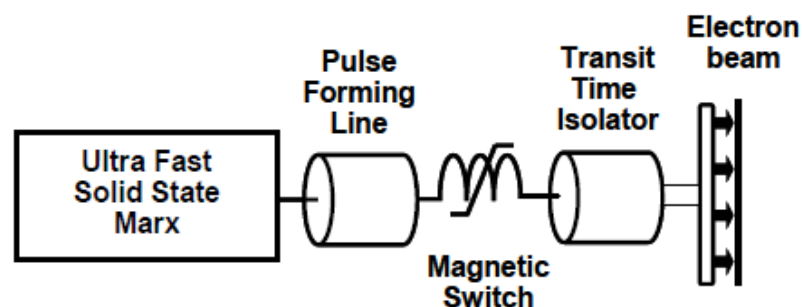


Рисунок 1. Схема ускорителя с магнитной коммутацией для накачки лазера Electra: A Repetitively Pulsed, Electron Beam Pumped KrF Laser [44].

Согласно [44], ресурс генератора может составлять 10^{10} импульсов. По схожим принципам построен генератор ускорителя RHEPP II (2,5 МВ, 25 кА) [45], время непрерывной работы которого при 120 имп./с ограничивалось лишь ресурсом катода 10^8 импульсов. Существенным недостатком, с точки зрения промышленного применения данных систем, являются высокая стоимость ускорителя, значительные габариты и вес.

Зарядка формирующей линии с магнитным коммутатором также может осуществляться по трансформаторной схеме, как например в ускорителе ETIGO-IV [46], способном генерировать электронный пучок током до 13 кА длительностью 120 нс под действием импульса ускоряющего напряжения 400 кВ с частотой повторения 1 имп./с.

Одним из успешных схемных решений, при построении генераторов высоковольтных импульсов, является применение трансформатора Тесла. Трансформатором Тесла называется система из двух контуров, связанных индуктивно, которая работает в режиме свободных колебаний. Схема трансформатора Тесла приведена на рисунке 2.

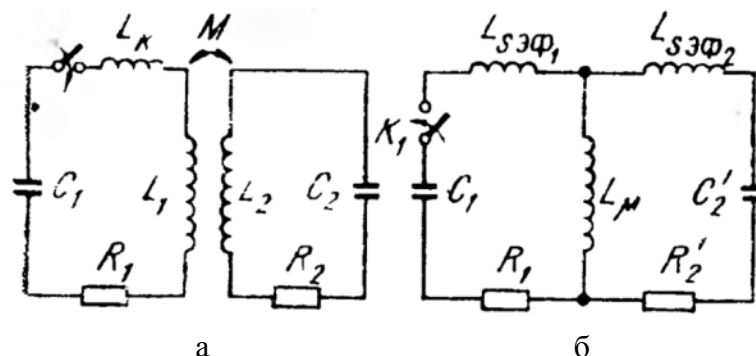


Рисунок 2. Схема трансформатора Тесла (а), приведенная к первичной цепи (б)

Токи свободных колебаний, в общем случае описываются системой уравнений [47]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{L_1 C_1} I_1 + \frac{R_1}{L_1} \dot{I}_1 + \ddot{I}_1 + \frac{M}{L_1} \ddot{I}_2 &= 0; \\ \frac{1}{L_2 C_2} I_2 + \frac{R_2}{L_2} \dot{I}_2 + \ddot{I}_2 + \frac{M}{L_2} \ddot{I}_1 &= 0. \end{aligned}$$

где M - коэффициент взаимной индукции;

L_1 L_2 - соответственно индуктивности первичного и вторичного контуров с учетом индуктивностей обмоток трансформатора и собственных конструктивных индуктивностей контуров.

Примеры применения трансформаторов Тесла, при построении генераторов импульсов ускорителей электронов, широко представлены в России и за рубежом (Таблица 1). Ускорители Синус-6 (1980г.), Синус-5 и Рита-150 (Таблица 1) используют трансформатор Тесла, встроенный в формирующую линию, отделённую от вакуумного электронного диода газовым обостряющим разрядником рис. [47]. Разрядник на самопробое заполнялся азотом под давлением 10-15 атмосфер.

Применяемая в [48] система прокачки газа поперёк канала разряда, одновременно с охлаждением и очисткой, позволила стабилизировать параметры срабатывания разрядника, в том числе при повторно-периодическом режиме работы.

Таблица 1. Характеристики импульсно-периодических ускорителей электронов с генераторами на основе трансформатора Тесла.

Ускоритель	Амплитуда ускоряющего напряжения, кВ	Амплитуда импульса тока пучка, кА	Длительность импульса, нс	Частота следования импульсов, имп./с	Литература
Синус-6	400	8,0	25	100	[47]
Синус-5	700	6,0	5	100	[47]
РИТА-150	150	0,5	10	15	[47]
Sinus-160	300	3,0	4,5	100	[49]
Sinus-500	550	5,5	22	150	[49]
Sinus-700/90	450	7,5	90	200	[49]
Sinus-700	1000	10	30	0,1	[50]
РАДАН-220	200	-	~3	10	[51]
РАДАН-303	300	6	4-5	10	[51]
РАДАН-ЭКСПЕРТ	150-160	-	~2	10	[52]

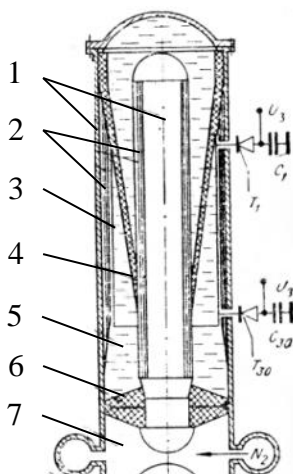


Рисунок 3. Конструктивная схема ускорителей с трансформатором Тесла, встроенным в формирующую линию: 1 – формирующая линия; 2 – магнитопровод; 3 – первичный виток; 4 – катушка вторичной обмотки; 5 – трансформаторное масло; 6 – проходной изолятор; 7 – обостряющий разрядник;

Похожие схемы применялись при построении ускорителей серии SINUS (1990-2002 гг.) [49], примеры параметров генераторов приведены в таблице 1. Здесь, для увеличения стабильности срабатывания и малого джиттера, был применён высоковольтный разрядник тригatronного типа, что позволило управлять амплитудой генерируемого импульса напряжения. Применение спиральной формирующей линии [53], как индивидуально, так и последовательно в сочетании с коаксиальной линией с распределёнными параметрами (Рисунок 4), позволило увеличить выходной импеданс генератора до 180 Ом без существенного изменения его размеров.

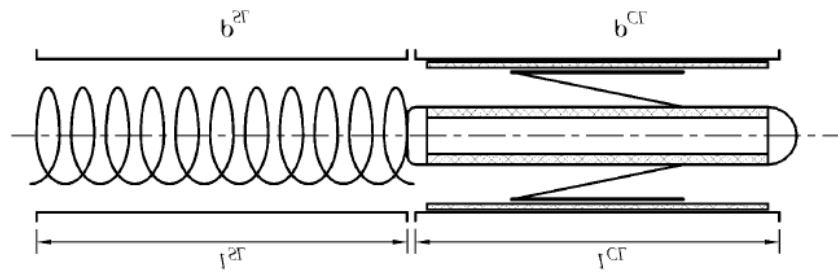


Рисунок 4. Спиральная линия, сопряжённая с коаксиальной линией со встроенным трансформатором Тесла.

Генераторы высоковольтных импульсов, использующие трансформатор Тесла для зарядки формирующей линии, описанные в [49], позволяют получать на нагрузке импульс напряжения длительностью 4 - 130 нс при амплитуде 200 - 2000 кВ. Частота посылы импульсов при этом достигает 400 имп./с в повторно-периодическом режиме.

Газовые коммутаторы тригатронного типа, применяемые в конструкции ускорителей серии SINUS [49], нуждаются в замене каждые $10^5 \div 10^6$ импульсов из-за эрозии управляющего электрода. Ресурс коммутатора может быть увеличен до 10^8 импульсов, но при этом диапазон регулировки по напряжению снижается с 75% до 30÷50%. Для большинства схем генераторов ускорителей электронов, где используются газовые разрядники, обозначен ресурс в диапазоне $10^5 \div 10^7$ импульсов [49].

Генераторы высоковольтных импульсов РАДАН [54], используются как наносекундные драйверы для создания субнаносекундных генераторов импульсов [55]. Генераторы содержат трансформатор Тесла с разомкнутым стальным магнитопроводом для зарядки несимметричной двойной формирующей линии [56].

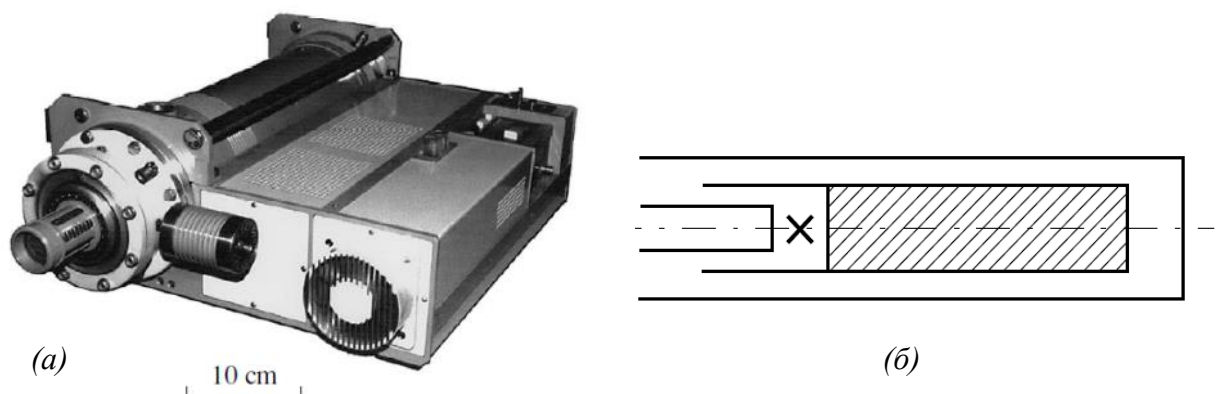


Рисунок 5. Внешний вид генератора РАДАН 303-Б с несимметричной двойной формирующей линией (б). Знаком X отмечено место установки коммутатора

Ускорители, основанные на генераторах с трансформатором Тесла, представлены также и за рубежом. Например, ускоритель, описанный в [57], устройство которого представлено на рисунке 6, способен длительно генерировать электронный пучок током 7-13 кА при импульсе

ускоряющего напряжения амплитудой 300-700 кВ длительностью 35 нс с частотой повторения до 100 имп./с.

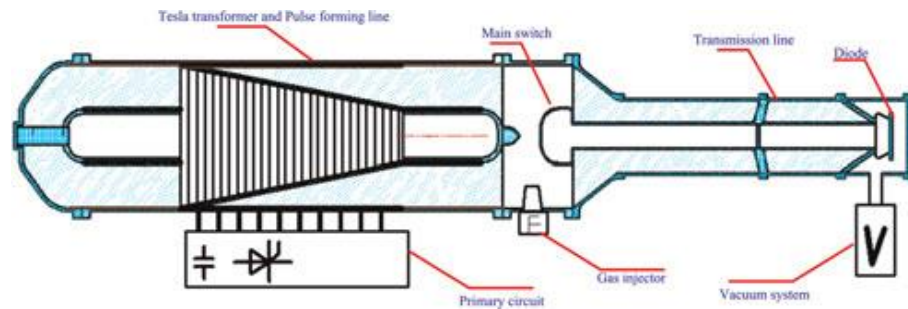


Рисунок 6. Схематичное устройство ускорителя IEBA [57].

Ускоритель IEBA содержит в своём составе газовый разрядник в качестве основного коммутатора, который определил продолжительность непрерывной работы 6×10^5 импульсов тока пучка [57].

Исходя из примеров ускорителей, описанных выше, можно заключить, что трансформаторы Tesla в основном применяются для заряда формирующих линий. Формирующие линии содержат коммутатор, частотные характеристики которого и определяют частотные свойства ускорителя в целом.

Потенциально более простые, энергетически эффективные индуктивные накопители энергии должны коммутироваться прерывателем тока, от характеристик которого зависят параметры импульса ускоряющего напряжения и частотные свойства ускорителя. Принципиальная электрическая схема ускорителя УРТ [4, 58]. приведена на рисунке 7.

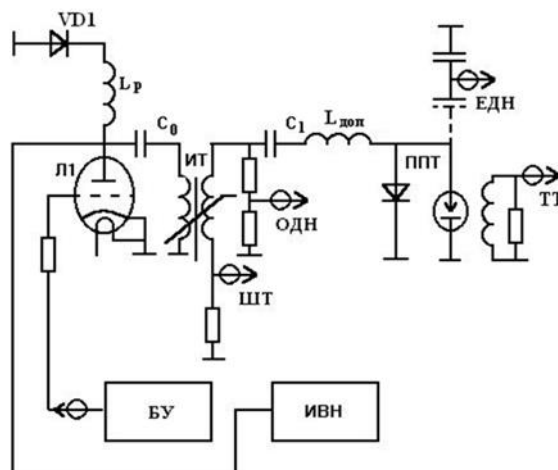


Рисунок 7. Принципиальная схема ускорителя серии УРТ.

Таблица 2 содержит основные характеристики ускорителей с ППТ, разработанных в ИЭФ УрО РАН [4, 58]. Следует отметить, что частота следования данных ускорителей составляет сотни Гц, что в ряде случаев превышает возможности искровых коммутаторов.

Таблица 2. Параметры разработанных в ИЭФ УрО РАН ускорителей электронов с использованием ППТ

Ускоритель	Система сжатия импульса	U, кВ	W, Дж	T _и , нс	Частота следования импульсов, Гц
Малахит	ПТСК	250	3	50	300 (3000)
Технологический	ПТСК	350	7	25	100
УРТ-0,2	Тиратрон+ППТ	200	1,75	35	250
УРТ-0,5	Тиратрон+ППТ	500	6,25	50	200
УРТ-1	Тиратрон+ППТ	900	25	60	50
Б/н	ПТСК	400	7	40	200

ПТСК - установка с полностью твердотельной системой коммутации; U – максимальное или ускоряющее напряжение; W – энергия в импульсе на нагрузке (в пучке электронов); T_и - длительность импульса на полувысоте; Б/н – без названия.

Представленные ускорители модернизируются с применением современной элементной базы и с учётом опыта предыдущей практической эксплуатации [59].

Основным условием, сдерживающим внедрение ускорителей с ППТ в промышленность, является в данный момент сложность схемной реализации, что накладывает дополнительные требования на условия эксплуатации и ремонта ускорителей.

1.2. Электронный диод импульсного ускорителя электронов

Основная функция диода – эффективное преобразование электрической энергии, накопленной в генераторе в кинетическую энергию потока заряженных частиц – электронов. Энергия, запасённая в генераторе и переданная диоду в виде импульса высокого напряжения, используется на ускорение заряженных частиц в импульсном электрическом поле ускоряющего промежутка. При генерации сильноточных электронных пучков (сотни Ампер), в качестве источника электронов используют создаваемую различными способами плазменную эмитирующую поверхность (катод), с плотностью порядка 10^{14} см⁻³. При этом эмиттер стремятся выделить конструктивно таким образом, чтобы минимизировать вероятность автоэлектронной эмиссии с поверхности других элементов находящихся под высоким потенциалом.

Устройство вакуумного электронного диода

Для обеспечения электрической прочности ускоряющего промежутка и высоковольтного изолятора с выводом генератора, диоды ускорителей электронов выполняют, как правило, вакуумными. Импульсный характер воздействия напряжения позволяет значительно уменьшить размеры изоляции диодов импульсных ускорителей электронов по сравнению с постоянными [11]. Требуемое давление остаточной атмосферы зависит от амплитуды, длительности импульсов ускоряющего напряжения, а так же от частоты их повторения, и, как

правило, лежит в диапазоне $10^{-2} - 10^{-6}$ торр. На рисунке 8 показано устройство диода сильноточного электронного ускорителя СИНУС-6 [47]. Вакуумный изолятор 1 (рисунок 8) выполнен секционированным с активным делителем напряжения из резисторов марки ТВО-2х82к [60]. Изолятор секции – полиэтилен с толщиной листа 5 мм. С газовой стороны 32 секции стянуты шпильками из капролона.

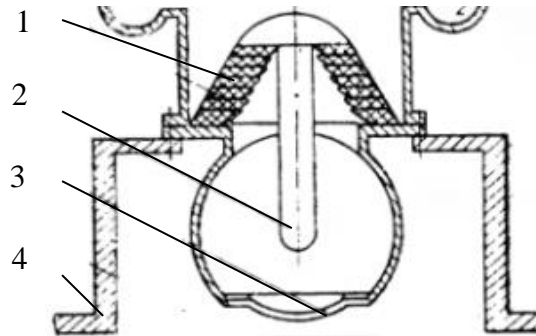


Рисунок 8. Вакуумный электронный диод ускорителя СИНУС-6: 1 - секционированный вакуумный изолятор; 2 – катод; 3 - выходное окно; 4 опора.

Описанная конструкция диода обеспечивала генерацию пучка электронов с частотой следования вплоть до 100 имп./с.

Дополнительную конструктивную экранировку поверхностей диэлектрика изолятора использовали в конструкциях изоляторов (Рисунок 9) для частотных ускорителей производимых в Институте Электрофизики УрО РАН [61].

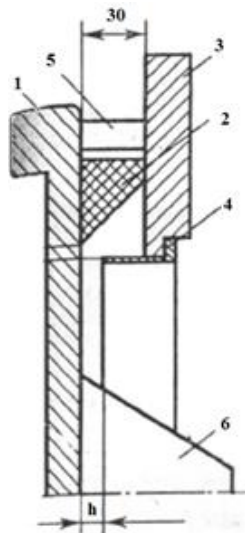


Рисунок 9. Вакуумный изолятор с экранированием поверхности диэлектрика [61]:
1 – высоковольтный электрод; 2 – полиэтиленовое кольцо; 3 – заземлённый электрод; 4 экран;
5 – капролоновая шпилька; 6 – держатель катода.

В Институте Сильноточной Электроники СО РАН, дополнительно, на экранирующих электродах выделяли конструктивные области эмиссии (Рисунок 10), чтобы улучшить распределение напряжения между секциями изолятора и выполняющими охранные функции экранами [62].

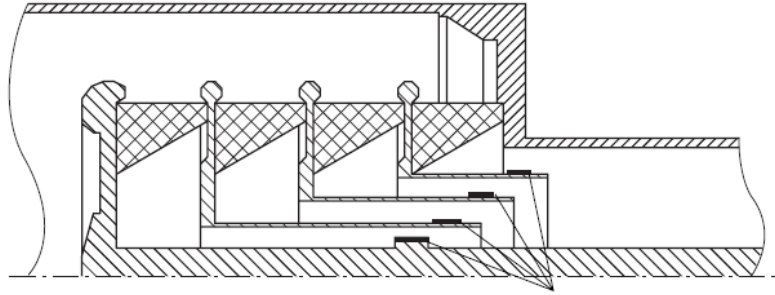


Рисунок 10. Конструкция проходного вакуумного изолятора на 1 МВ с выделенными эмитирующими поверхностями [62].

Исходя из описанной в литературных источниках информации, высоковольтные изоляторы для вакуумных электронных диодов ускорителей в большинстве случаев выполняются секционированными.

Взрывоэмиссионный катод

Применение взрывоэмиссионных катодов для построения импульсных ускорителей электронов обладает рядом эксплуатационных преимуществ. Как правило, плазменная эмитирующая поверхность на поверхности катода создаётся тем же импульсом напряжения, который ускоряет эмитировавшие электроны. Катод является холодным, то есть, дополнительно не подогревается. При этом отсутствуют дополнительные источники энергии, синхронизированные с основным ГВИ, нет дополнительных высоковольтных электрических вводов от этих источников, существенно упрощается конструкция диода.

Катод, является одним из узлов, ограничивающих ресурс ускорителя в целом. Указанный в литературных источниках ресурс ускорителей Синус-6, Синус-5, Рита-150 составляет не менее 10^8 импульсов тока пучка [47] при средней наработке на отказ 2×10^7 импульсов тока пучка. Вместе с тем, в [63] показано, что для многоострийного катода возможно получить практически неизменные эмиссионные свойства в течение 10^6 - 10^7 импульсов, причём наибольший ресурс показал многоострийный медный катод [11]. Из всех испытанных в [63] на срок службы, стабильным оказался катод из танталовой ленты толщиной 12 мкм. Он обеспечил 10^7 импульсов электронного пучка без заметных изменений эмиссионной способности.

Катоды из чистых металлов обеспечили 10^4 - 10^5 импульсов тока пучка для ускорителей серии SINUS [49], в то время как катод из нержавеющей стали сохранял свою эмиссионную способность вплоть до 10^6 импульсов [64]. Исследуемый при частоте 100 Гц катод из пиролитического графита показал ресурс не менее 10^8 импульсов с плотностью тока пучка $\sim 20 \text{ А/см}^2$, однако этому предшествовал период «приработки» катода, который составил 10^6 импульсов и заключался в формировании кромок специфической формы на поверхности электрода в результате эрозии [64]. Для создания пучков большой площади ($\sim 200 \text{ см}^2$),

применялись разработанные металлодиэлектрические катоды МДМ [65], которые так же обеспечили генерацию 10^8 импульсов тока пучка при частоте повторения 100 Гц.

Исходя из приведённой информации, можно сделать вывод, что наиболее высокими характеристиками для построения частотных ускорителей электронов обладают многоострый медный, плоский графитовый и МДМ катоды.

Выпускное окно электронного ускорителя электронов

Практическое применение ускорителей подразумевает транспортировку электронного пучка из области генерации и ускорения к области применения, при этом параметры пучка, его энергозапас неизменно претерпевают изменения. Зачастую, область применения пучка электронов находится в газовой среде при атмосферном давлении. Задача выпуска электронного пучка является нетривиальной и может решаться различными способами в зависимости от характеристик пучка, условий генерации применения пучка. Важное значение имеет энергетический спектр выводимого пучка электронов, так как количество электронов, не способных преодолеть выпускное окно, определяет потери, тепловой режим работы окна и, в конечном итоге, максимальный поток энергии, которую окно способно пропустить через себя, без нарушения функционирования.

подавляющее число конструкций выходных окон ускорителей имеет похожую конструкцию, содержит в себе разделительную фольгу, задача которой – герметизация вакуумного объёма диода [7]. Для ускорителей, описанных в [47] для вывода ускоренных электронов в атмосферу были разработаны разные типы окон для электронных пучков с разной энергией электронов. Для высокоэнергетичных электронов потери в фольге и в слое воздуха (5 см) между разделительной фольгой и объектом облучения, расположенном на специальном транспортёре, сравнительно малы, выпускное окно с титановой фольгой толщиной $25\div 50$ мкм охлаждалось потоком воздуха, направленного поперёк окна. Для электронов с энергией 200 кэВ и менее, потери фольге и воздушном промежутке составляли порядка 50%, поэтому применялись окна с алюминиевой фольгой $30\div 50$ мкм и рёбрами, охлаждаемыми водой.

Известны конструкции, где выпускное окно оснащается дополнительной тонкой фольгой в вакууме (Рисунок 11), которая играет роль анода ускоряющего зазора и служит для отсечки электронов с малой энергией [44].

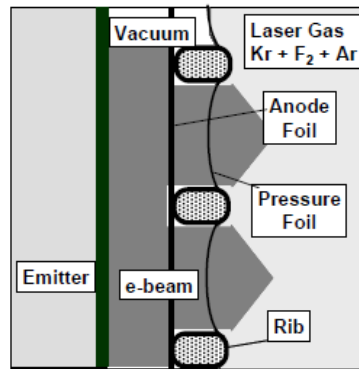


Рисунок 11. Выходное окно ускорителя электронов для накачки лазера [44].

Для инъекции электронного пучка в атмосферу в частотном режиме также используют выпускные окна с опорными структурами, охлаждаемыми проточной водой и содержащие дополнительный газовый объём с контролируемым давлением (Рисунок 12) [66].

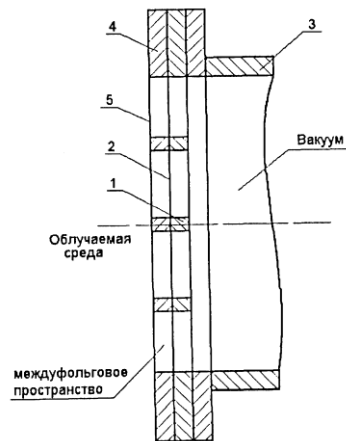


Рисунок 12. Выходное окно ускорителя заряженных частиц [66]: 1 - охлаждаемая опорная решётка; 2 – первая металлическая фольга; 3 – вакуумная камера; 4 - дополнительная охлаждаемая опорная решётка; 5 - дополнительная металлическая фольга.

Известны также конструкции выходных окон, содержащие в своём составе поддерживающие структуры в виде нитей [67]. При этом, фольга прогибается под действием атмосферы в сторону вакуумного ускоряющего промежутка и натягивает нити (Рисунок 13).

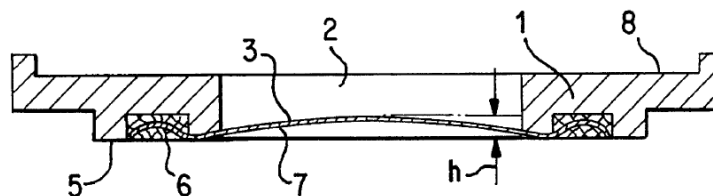


Рисунок 13. Выходное окно ускорителя электронов [67]: 1 – рамка окна; 2 – створ окна; 3 – углеродная нить; 5 – уплотнительный паз; 6 – резиновый вакуумный уплотнитель; 7 – титановая фольга; 8 – поверхность уплотнения вакуумной камеры.

Таким образом, основываясь на информации, полученной из литературных источников, можно сделать вывод, что в большинстве конструкций ускорителей электронов используются вакуумные электронные диоды с медным многоострийными либо плоскими катодами из чистых металлов или графита, а так же МДМ катодами. При этом сформированный электронный пучок либо используется в вакуумной области генерации, либо инжектируется в газовую область повышенного давления через выпускное окно с разделительной фольгой, охлаждаемой потоком жидкости или газа.

1.3. Запаздывание тока электронной эмиссии в вакуумном диоде ускорителя

Формирование плазменной эмиссионной поверхности на катоде происходит за время, зависящее от скорости нарастания напряжённости электрического поля в ускоряющем зазоре, от типа и материала катода [11]. Согласно [68], запаздывание плазмообразования приводило к увеличению напряжения на ускоряющем промежутке, по причине изменения режима работы генератора импульсов ускоряющего напряжения. Используемый в [68] ускоритель содержал в своём составе генератор с двойной формирующей линией, нагруженной на диод через согласующий автотрансформатор [69]. Сравнение производилось для вакуумного электронного диода с плоским графитовым катодом и планарным катодом из углеродной ткани (бархат, многоострийный). Режим дискретной эмиссионной поверхности [70, 71] во время процесса плазмообразования сопровождался высоким импедансом диода 200-300 Ом при зазоре 10 мм, что при импедансе выходной цепи генератора после автотрансформатора 30 Ом, можно близким импедансу "холостого хода" [68]. Величина запаздывания составляла порядка 5-7 нс при длительности импульса напряжения около 100 нс. Полученные в [68] данные показали, что наличие запаздывания не привело к существенному увеличению мощности, развиваемой в диоде и энергии в пучке электронов.

При испытаниях металлокерамических катодов (МК) [72], авторы установили, что испытанные ими катоды имеют хорошую эмиссионную способность при наличии запаздывания протекания эмиссионного тока в диоде ускорителя [73], что позволило существенно обострить и увеличить ток (мощность) пучка, и, таким образом, уменьшить низкоэнергетическую составляющую спектра пучка без применения дополнительных решений. Описываемые катоды [74], представляют собой таблетку диаметром 12 мм и толщиной 2 мм из оксидной нанокерамики (Al_2O_3 , TiO_2) с относительно равномерно распределёнными по объёму металлическими частицами, часть которых выходит на поверхность (Рисунок 14, а). В катододержателе МК пластина (плазмообразующий элемент) закреплялась ребром к аноду (Рисунок 14 б). Крепление плазмообразующего элемента к поверхности может выполняться зажимом края элемента в пазах металлического основания (Рисунок 14 б) или с помощью клея. В

клеящий состав может быть добавлен металлический порошок для увеличения проводимости. Катод может содержать несколько плазмообразующих элементов на одном металлическом основании [74].

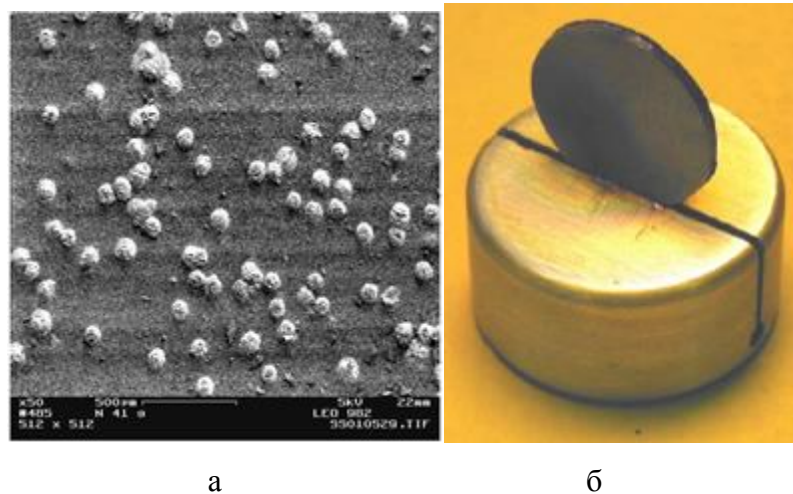


Рисунок 14. Увеличенное изображение МК-пластины (а) и крепление (б) МК-катода [4].

В работе [72], по результатам испытаний авторы сделали вывод, что напряжение, соответствующее началу тока, увеличивается с ростом диэлектрической проницаемости применяемой керамики. Эксплуатация таких катодов показала ресурс 10^7 - 10^8 импульсов тока электронного пучка [72, 75].

1.4. Применение ускорителей электронов для обработки водных растворов

Уникальные по своей совокупности факторы воздействия импульсного электронного пучка наносекундной длительности позволили найти применение импульсным ускорителям во многих сферах народного хозяйства и промышленности [2, 3, 4, 5].

Применение электронного пучка без вывода в атмосферу нашли ускорители серии SINUS [49], например, в качестве источников импульсов высокой мощности микроволнового диапазона [76], а так же генератора импульсов сверх широкого диапазона (UWB) [77].

Повышенное внимание к экологической обстановке в современном мире актуализировало применения радиационных технологий в целом и применение ускорителей электронов в частности для решения задач экологической направленности [1]. Очистка дымовых газов [78], иловых осадков сточных вод, утилизация бытовых отходов, переработка полимеров и множество других задач решаются с помощью источников электронных пучков.

Особенную значимость электронно-пучковая обработка имеет для обработки водных растворов. Многофакторность воздействия электронных пучков на органолептические, химические и биологические показатели воды позволяет успешно применять схожие аппараты

и технологические решения, как для обработки сточных вод, так и для водоподготовки. Преимущество радиационного метода очистки воды заключается, прежде всего, в комплексном действии излучения. Одновременно происходит радиолиз всех входящих в состав соединений, ускоряются процессы коагуляции и седиментации, устраняются цветность и запах, снижаются величины химического потребления кислорода и биологического потребления кислорода, происходит обеззараживание воды.

Данные процессы становятся возможными, благодаря радиолизу непосредственно воды. Ионизирующее излучение образует в системе продукты с высокой реакционной способностью (свободные радикалы, ионы, возбуждённые частицы и т.п.), которые, взаимодействуя с загрязняющими веществами, инициируют их превращения, что в конечном итоге приводит к очистке системы [79]. В случае водных растворов [80, 81] такими продуктами являются радикалы $\cdot\text{OH}$, гидратированные электроны e_{aq} и атомы H. Радикалы $\cdot\text{OH}$ инициируют окислительное разложение загрязняющих веществ, а атомы H - восстановительное разложение. Данные вещества также оказывают угнетающее или летальное действие на микроорганизмы, присутствующие в среде обработки, тем самым обеззараживая или стерилизуя воду.

Конечными продуктами разложения загрязнений являются CO_2 , H_2O , N_2 и другие простые экологически безвредные соединения. Данное основание позволило применять радиационные методы подготовки питьевой воды [82]. Было установлено, что обеззараживание, например, питьевой воды до уровня соответствующего ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая», происходит при дозах порядка 1 кГр [83]. Высокую эффективность использования ускоренных электронов для очистки речной воды показали авторы [84] применившие ускоритель электронов для обработки проб высокоцветной воды реки Сегежа дозой 2 кГр с аэрированием воздухом или озоно-воздушной смесью.

Успешные результаты при водоподготовке питьевой воды получили с помощью ускорителя электронов ЭЛВ-8, который был вписан в промышленную систему забора и транспортирования воды реки Ангара [85]. Производительность комплекса по обеззараженной и очищенной воде составляла не менее $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ при энергетических затратах $5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$. Например, в городе Даегу (Daegu, Южная Корея), запущен и успешно опробирован комплекс по очистке сточных вод текстильного завода [86] основанный на ускорителе электронов с потребляемой мощностью до 400 кВт и производительностью от 1000 до 10 000 $\text{м}^3/\text{день}$.

Обеззараживание водных растворов

Эффект обеззараживания под действием ионизирующего излучения обусловлен гибелью микроорганизмов, а оставшиеся бактерии из-за поражения внутренних структур клетки лишены возможности размножаться. Летальная доза при действии ионизирующего излучения на водные культуры бактерий сравнительно низка и лежит в области 0,5-1,5 кГр, что позволяет

радиационному методу конкурировать с другими методами дезинфекции (химический, термический) воды по энергетическим затратам и экономическим показателям [79]. Однако, радиационная чувствительность микроорганизмов зависит от среды облучения, и доза, необходимая для обеззараживания реального стока или воды определённого химического состава, должна исследоваться в условиях облучения конкретной воды и источника облучения.

В литературе содержатся также данные, указывающие на зависимость эффекта обеззараживания от мощности дозы. Так, в [87] показано, что при общем микробном числе $0,5-4 \times 10^6$ клеток/мл при увеличении мощности дозы с 0,025 кГр/с до 0,24 кГр/с требуемая доза для обеззараживания снижалась с 1,52 кГр до 0,5 кГр.

Камера для обработки водных растворов электронным пучком.

Выявлена зависимость требуемых для обеззараживания доз от условий облучения. Например, в [88] барботирование воздуха через слой обрабатываемой электронным пучком воды, позволил снизить дозу, требуемую для обеззараживания с 4 кГр до 2 кГр. Таким образом проявляется синергетический эффект воздействия на микроорганизмы как непосредственно фактора ионизирующего излучения, так и продуктов радиолитического разложения водного раствора. Данные, приведённые в [79] показали также, что наилучшей эффективностью обладают методы, использующие обработку водных растворов электронным пучком в аэрозольном потоке. По сравнению с барботированием, облучение в водовоздушном потоке увеличивает эффективность обработки примерно в 8,5 раз. Такой эффект объясняется дополнительным воздействием первичных продуктов радиолитического разложения воздуха (в первую очередь, с озоном в момент его образования).

Совместное действие ускоренных электронов и радиолитического озона в водовоздушном потоке даёт возможность увеличить эффект обеззараживания, при уменьшении удельных энергозатрат [89]. Кроме того, длина пробега электронов обратно пропорциональна плотности среды, следовательно, при облучении водовоздушной смеси, плотность которой на 2 порядка ниже плотности воды (коэффициент эжекции 10) возможно использование относительно низкоэнергетических ускорителей электронов (до 1 МэВ).

В источнике [90] приведены результаты экспериментальных исследований, в которых обработку электронным пучком (энергия электронов до 300 кэВ) проходила коммунальная сточная вода. Схема эксперимента приведена на рисунке [79]. Вода в эксперименте предварительно очищалась от механических примесей.

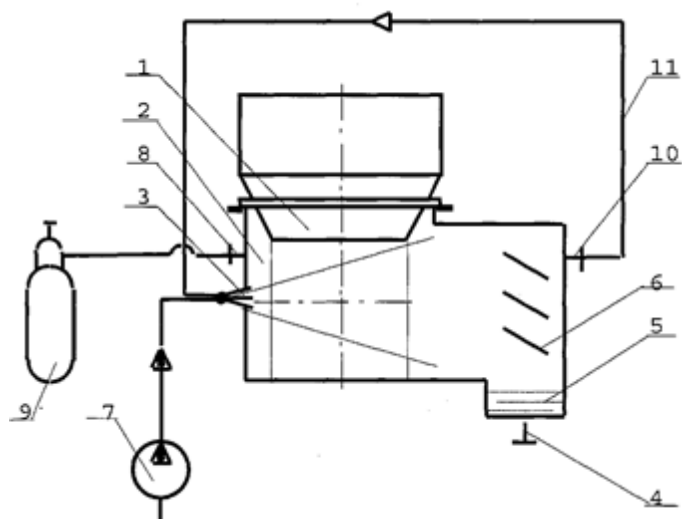


Рисунок 15. Устройство для проведения радиационно-химических процессов в системе газ-жидкость под воздействием ускоренных электронов [79]. 1- выпускное окно электронного ускорителя; 2 - камера обработки, 3 - распылитель; 4 – слив; 5 – обработанная вода; 6 – влагоотделитель; 7 – насос; 8 – впускной газовый клапан; 9 – ёмкость с газом; 10 – выпускной газовый клапан; 11 – оборотный газовый тракт.

Результаты экспериментов [90] показали, что при дозе 1,3 кГр происходит обеззараживание коммунальной сточной воды до уровня требований российских стандартов. Обработка воды приводила также к улучшению органолептических и химических показателей воды.

Анализ приведённых в литературных источниках данных позволяет сделать вывод, что для эффективного обеззараживания водных растворов целесообразно обеспечить обработку водного раствора при поглощённой дозе порядка 4 кГр. При этом, следует учитывать эффект, получаемый при организации водовоздушной смеси для облучения.

Выводы

Приведённые примеры описанных в литературных источниках существующих образцов характеризуют основные направления развития импульсных ускорителей электронов. Анализ изложенного материала позволяет заключить, что в настоящий момент существующие образцы импульсной ускорительной техники, не могут исчерпывающе удовлетворить потребностям промышленности в импульсных источниках ионизирующего излучения всех направлений. Расширение сферы практического применения ускорителей существенно зависят от упрощения, удешевления конструкции, обеспечения ресурса работы и коэффициента полезного действия, достаточного для коммерческого обоснования использования ускорителей. Таким образом, актуальными являются разработки новых и развитие существующих подходов к формированию импульсов ускоряющего напряжения, генерации и инжекции пучка из вакуумного электронного диода в область применения. Немаловажное значение имеют также средства

управления и диагностики состояния оборудования. Неотъемлемым современным требованием является способность ускорителя работать в составе автоматической линии. Соответствие этим требованиям позволяют предположить функциональный состав и основные характеристики ускорителя, имеющего перспективы использования в качестве промышленного образца.

Отсутствие промышленно-выпускаемых, широко распространённых, надёжных прерывателей тока предопределяет использование схем генераторов с ёмкостными накопителями энергии. С другой стороны, наличие коммутаторов с подходящими частотными характеристиками и рабочим напряжением до 100 кВ подразумевает возможность построения простой и надёжной схемы генерации импульсов высокого напряжения без высоковольтных формирующих линий и с трансформаторной связью в выходном каскаде генератора. Данный подход обуславливает форму генерируемого импульса напряжения отличную от прямоугольной, поэтому становится целесообразным применение средств формирования импульса, основанных на процессах, происходящих в диоде при генерации электронного пучка. Одним из таких средств является использование взрывоэмиссионных катодов со значительным временем (вплоть до 100 нс, при субмикросекундной длительности импульса ускоряющего напряжения) формирования эмитирующей поверхности, которое приводит к запаздыванию протекания тока электронной эмиссии в диоде. В таком случае диод будет играть роль обостряющего разрядника при разряде ёмкости на нагрузку. Применение описанного подхода к построению ускорителя электронов рассмотрено в рамках данной работы.

Анализ литературных источников описывающих применение ускорителей электронов для обработки водных растворов показал, что область применения ускорителей распространяется как на подготовку воды для технологических и питьевых нужд, так и для утилизации сточных вод предприятий и коммунальных сточных вод. Согласно литературным данным, эффект обеззараживания достигается уже при дозах 0,5-4 кГр и усиливается при использовании обработки водного раствора в водовоздушном потоке.

Глава 2. Устройство и диагностическое оборудование импульсного ускорителя электронов «АСТРА»

В настоящей главе содержится описание экспериментального стенда и диагностического оборудования, с помощью которых были получены результаты, представленные в диссертации. Основой для экспериментального стенда является созданный в стенах Томского политехнического университета импульсный ускоритель электронов «АСТРА» [15*] внешний вид которого показан на рисунке 16.

Импульсный ускоритель электронов «АСТРА» был создан на основе генератора высоковольтных импульсов, описанного в [91]. Характеристики генератора позволяют формировать на нагрузке импульсы высокого напряжения длительностью до 1 мкс с частотой следования до 100 имп./с. Замена высоковольтного коммутатора на выпускаемый серийно, дооснащение генератора диодной системой, откачным вакуумным оборудованием и средствами дистанционного контроля и управления позволили получить источник импульсных электронных пучков, имеющий простую надёжную конструкцию, допускающий длительный режим работы с частотой следования десятки импульсов в секунду.



Рисунок 16. Внешний вид частотного импульсного ускорителя электронов «АСТРА» с блоком питания и управления.

Конструкция генератора не содержит формирующей линии, что сказывается на длительности фронта импульса ускоряющего напряжения и требует специфического подхода к методам генерации и выпуска импульсного электронного пучка в атмосферу. Минимизация габаритных размеров ускорителя, увеличение частоты следования импульсов и ресурса, удобство управления и неприхотливость в эксплуатации – с учётом этих требований формировались подходы к построению схемы и конструктивному исполнению ускорителя.

2.1. Принципиальная схема импульсного ускорителя электронов

Принципиальная электрическая схема ускорителя приведена на рисунке 17 [23*]. Заряд высоковольтного накопителя $C2$ происходит следующим образом.

Накопитель $C1$ заряжается квазипостоянным напряжением с регулируемой амплитудой 0,5-2 кВ от источника со стабилизированным током П. При поступлении сигнала управления от внешнего генератора импульсов ГИ тиристорный коммутатор $VT1$ отпирается, и в контуре $C1$, $T1$, $C2$, $T2$ возникают свободные колебания с круговой частотой, близкой:

$$\omega = 1 / \sqrt{(L_P \cdot C_{\text{Э}})}, \quad (3)$$

где L_P – индуктивность рассеяния трансформатора $T1$;

$$C_{\text{Э}} = (C1 \cdot C2') / (C1 + C2');$$

$$C2' = C2 \cdot k_{T1}^2;$$

где k_{T1} – коэффициент трансформации $T1$.

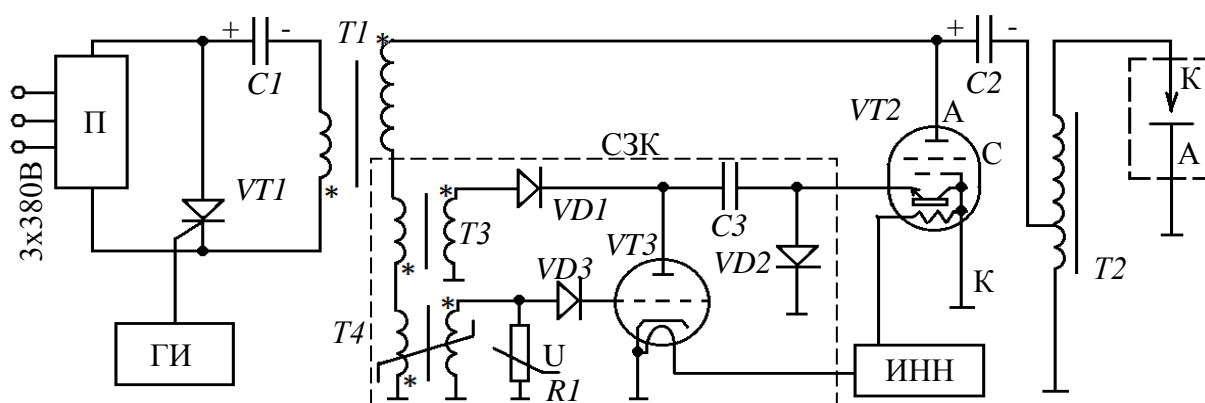


Рисунок 17. Принципиальная электрическая схема ГИН ускорителя «АСТРА». П - преобразователь напряжения; ГИ - генератор импульсов; $C1$ - первичный накопитель; $VT1$ - тиристорный коммутатор; $T1$ - повышающий импульсный трансформатор; $C2$ - высоковольтный накопитель; $VT2$ - коммутатор; $T2$ - высоковольтный 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; $VD1$, $VD2$, $VD3$ - диоды, СЗК - система запуска коммутатора.

При $C1=C2'$, накопитель $C1$ полностью разряжается за время $t=T/2=\pi/\omega$, соответственно $C2$ за это же время заряжается до максимального напряжения, сердечник $T2$ перемагничивается до $-B_s$. Синусоидальный ток в контуре $C1$, L_P , $C2$ становится равным нулю. В этот момент, по сигналу запуска от СЗК открывается $VT2$ - энергия из $C2$ через автотрансформатор $T2$ выделяется в нагрузку. На этом рабочий цикл заканчивается.

При практической реализации схемы ввели небольшое рассогласование $C1 < C2'$, которое позволяет после окончания цикла передачи энергии иметь небольшое отрицательное

остаточное напряжение на $C1$, необходимое для запираания $VT1$ и восстановления его вентильных свойств. Схема показала устойчивую безотказную работу на активную согласованную нагрузку при частотах повторения импульсов до 100 имп./с. При этом параметры работы схемы оценивались по показаниям комплекта диагностического оборудования, описанного ниже.

2.2. Диагностическое оборудование импульсного ускорителя электронов

Средства контроля параметров работы необходимы для оценки правильности функционирования любого типа оборудования, предназначенного для практического применения. Контроль только выходных параметров оборудования позволяет утверждать о корректности работы всей принципиальной схемы. Для импульсных ускорителей электронов, к выходным параметрам можно отнести ускоряющее напряжение диода U_D и ток выведенного за анод пучка электронов $I_{ЭА}$. В случае практического применения полученного пучка электронов, контроль напряжения на диоде дополняется мониторингом нескольких связанных параметров: полного тока диода I_D , давления остаточной атмосферы в вакуумной камере диода, температуры масляной изоляции высоковольтного генератора и тд. Комплексная оценка данных параметров позволяет оценить как текущую работоспособность ускорителя в целом, так и состояние отдельных элементов ускорителя. Применяемые средства диагностики параметров работы ускорителя и их расположение схематически представлены на рисунке 18.

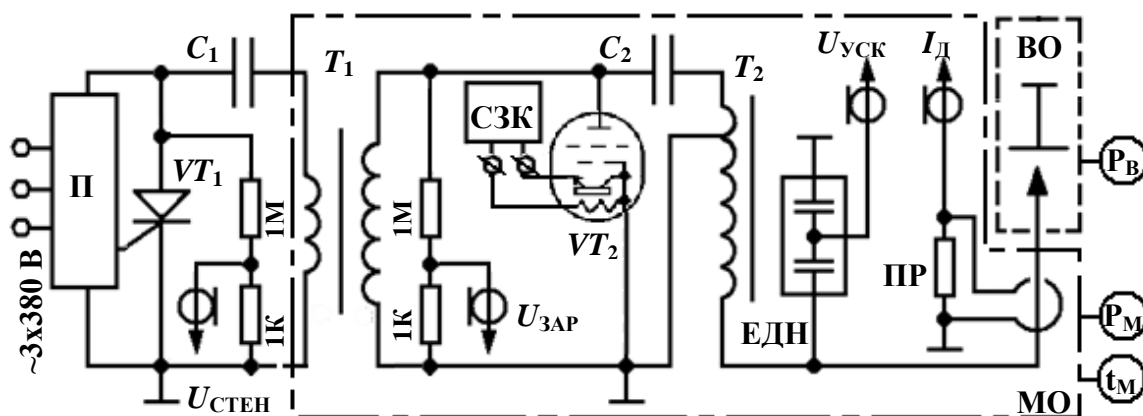


Рисунок 18. Схема расположения диагностического оборудования ускорителя. П, ГИ, $C1$, $VT1$, $T1$, $C2$, $VT2$, $T2$, СЗК (см. Рисунок 17); ЕДН - ёмкостный делитель напряжения; ПР - пояс Роговского; ВО - вакуумный объем; МО - объем с трансформаторным маслом; P_B - датчик давления вакуума; P_M - датчик давления масла; t_M - датчик температуры масла. Сопротивление резисторов в Ом.

Комплект диагностического оборудования ускорителя «АСТРА», кроме средств контроля выходных параметров ускорителя содержит также диагностические средства для отладки работы электрической схемы ускорителя. Для этого контролируются параметры работы отдельных элементов схемы, такие как: значение квазипостоянного напряжения $U_{СТЕН}$

зарядки первичного ёмкостного накопителя C_1 , напряжение заряда $U_{\text{ЗАР}}$ высоковольтной ёмкости C_2 , параметры импульса запуска коммутатора от СЗК при подключении внешнего омического делителя напряжения.

Коэффициент деления аналоговых датчиков тока и напряжения выбирался из расчёта, чтобы амплитудное значение передаваемого кабелем сигнала не превышало 1000 В для обеспечения электрической прочности кабеля и кабельных разъёмов, а так же составляло не менее 10 В для снижения влияния помех.

2.2.1. Средства измерения импульсного напряжения

Способ измерения амплитуд импульсов напряжения в характерных точках принципиальной схемы ускорителя выбирался согласно диапазону амплитуд измеряемого напряжения и скорости его нарастания. Кроме того, принималась во внимание способность применяемых способов измерения напряжения разрешать высокую частоту повторения измеряемых сигналов. Электрические сигналы с датчиков регистрировали осциллографом Tektronix 2024С (200 МГц, $5 \cdot 10^9$ отсч./с).

Омический делитель напряжения

Для регистрации импульсов напряжения на первой ступени сжатия энергии в микросекундном диапазоне применялись омические делители напряжения [92]. Стационарно установленные делители напряжения (Рисунок 18) удовлетворяли следующим условиям:

- разрешающая способность не хуже 1 мкс;
- электрическая прочность во всем диапазоне измеряемого напряжения;
- низкие токи утечки;
- способность применяемых резисторов рассеивать тепловую мощность при высокой частоте повторения измеряемых сигналов.

В качестве резистивных элементов для изготовления делителей напряжения применялись керамические низкоиндуктивные резисторы ТВО-1 и ТВО-0,5. Для увеличения значения измеряемого напряжения резисторы соединялись последовательно, попарно-встречно, располагаясь на разных сторонах стеклотекстолитовой пластины-опоры для уменьшения общей индуктивности делителя. Делитель, включенный параллельно вторичной обмотке трансформатора T_1 погружен в трансформаторное масло для уменьшения габаритов.

Определение коэффициента деления омических делителей напряжения производилось по результатам измерения сопротивлений высоковольтного и низковольтного плеч делителя измерителем иммитанса Е7-21 [93]. Данный прибор предназначен для проведения измерений сопротивления, индуктивности и ёмкости с паспортной погрешностью не более 1,2 % [94].

Ёмкостный делитель напряжения

Для измерения значений ускоряющего напряжения субмикросекундной длительности применяли ёмкостный делитель напряжения, конструкция которого схематично показана на рисунке 19 [92].

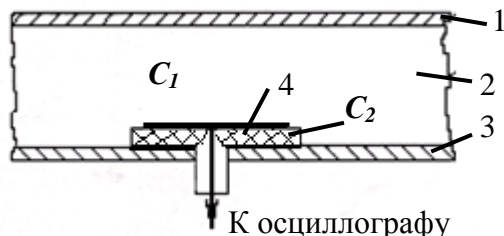


Рисунок 19. Конструктивное исполнение ёмкостного делителя напряжения. C_1 - ёмкость высоковольтного плеча; C_2 - ёмкость низковольтного плеча; 1 - высоковольтный электрод; 2 - трансформаторное масло; 3 - заземлённый корпус; 4 - двусторонний фольгированный текстолит.

Оценка коэффициента деления проводилась расчётным путём и затем проверялась по результатам инструментального измерения ёмкостей плеч делителя. Окончательно значение коэффициента деления подтверждалось по результатам калибровки делителя при работе генератора на активную нагрузку. Для используемого ёмкостного делителя постоянная времени составила $\tau = 1,35 \times 10^{-6}$ с при установленном коэффициенте деления $K = 940$.

Так как в качестве электродов делителя выступают элементы конструкции ускорителя, калибровка делителя производилась каждый раз после монтажа конструкции.

2.2.2. Средства измерения импульсных токов

Токи, протекающие в узлах ускорителя при приложении импульсов напряжения, фиксировались средствами измерения, временные характеристики которых обеспечивали разрешение не хуже 1 нс.

Цилиндр Фарадея, низкоиндуктивный шунт

Измерение тока пучка электронов, прошедших за плоскость анода, производилось с помощью шунта обратного тока - цилиндра Фарадея (ЦФ) с дифференциальной откачкой, схема и внешний вид которого приведены на рисунке 20. Применяемая конструкция ЦФ подробно описана в литературе [95] и позволяет достоверно регистрировать токи в пределах 400 А-100 кА [96].

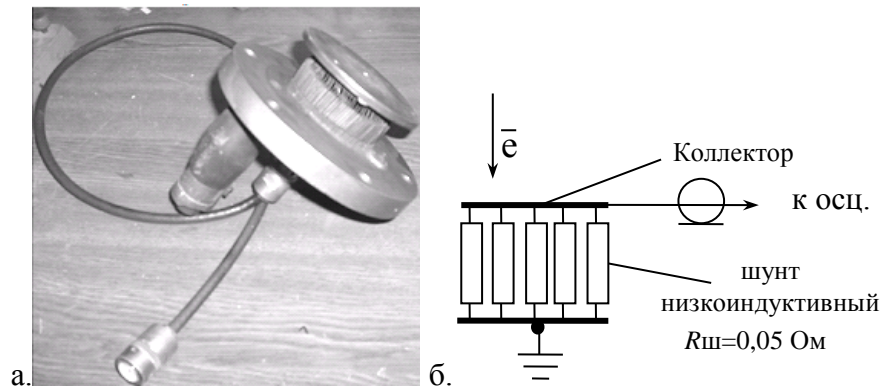


Рисунок 20. Внешний вид (а) и схематичное устройство (б) цилиндра Фарадея с дифференциальной откачкой

Низкоиндуктивный шунт ЦФ использовался для организации работы импульсного генератора в режиме близком к режиму короткого замыкания, а так же в цепи активной нагрузки диода для получения сигнала тока, проходящего через неё. Значение сопротивления шунта $R_{ш}=0,05 \text{ Ом}$ получено с помощью измерителя иммитанса E7-21 [93].

Пояс Роговского

Регистрацию выходного тока генератора, полного тока диода, производили посредством применения трансформатора тока - пояса Роговского (ПР) с обратным витком. Наличие обратного витка позволяет снизить влияние внешних магнитных полей. Параметры пояса Роговского выбирались для регистрации субмикросекундных токов в соответствии с рекомендациями, приведёнными в [97]. Постоянная времени ПР $\tau_{пр} \approx 5 \text{ мкс}$, что обеспечивает работу пояса в режиме трансформации тока. Найденная чувствительность пояса Роговского 160 А/В. Калибровка ПР производилась при сравнении показаний тока, протекающего по низкоиндуктивному шунту при режиме работы генератора близком к короткому замыканию.

2.2.3. Средства дополнительной диагностики параметров электронного пучка

Для получения достаточной информации об условиях генерации и инжекции импульсного электронного пучка в атмосферу, кроме регистрации электрических сигналов применялись дополнительные средства диагностики параметров импульсного электронного пучка.

Калориметр полного поглощения

Использовался для оценки энергии, переносимой электронным пучком за анод вакуумного электронного диода. Калориметр имеет конструкцию, подробно описанную в [98]. Коллектор калориметра выполнен тем же диаметром, что и коллектор ЦФ и представляет собой медный диск известной массы. К коллектору калориметра с помощью сплава Вуда [99] припаян датчик температуры, показания которого передаются на выносной блок индикации. Толщина

диска выбиралась исходя из условий максимального пробега электронов с энергиями ≤ 500 кэВ минимальной тепловой инерции прибора.

Дозиметрические плёнки

Для оценки однородности распределения энергии электронного пучка по сечению использовали дозиметрические плёнки типа ПОР, а так же цвето-визуальные индикаторы дозы (ЦВИД) [100, 101]. Указанные плёнки закрепляли на поверхности коллектора калориметра напротив выпускного окна ускорителя. По изменению цвета и однородности окраса плёнок оценивали однородность энергии, полученной отдельным участком плёнки.

Тепловизионная диагностика

Для оперативной диагностики распределения энергии импульсного электронного пучка по сечению использовали тепловое изображение поверхности пенополистироловой мишени [102] после облучения импульсным электронным пучком, полученное при помощи тепловизора марки Fluke TiR10 (спектральный диапазон 7-14 мкм).

Тепловые изображения поверхности генератора высоковольтных импульсов также использовались для оценки теплового режима работы генератора при продолжительных испытаниях с высокой частотой повторения импульсов.

Дозиметры

Генерация пучка ускоренных электронов сопровождается генерацией тормозного рентгеновского излучения [103]. Таким образом, регистрация мощности дозы, превышающей значения естественного радиационного фона при выключенном ускорителе, может служить индикатором корректной работы ускорителя. Принимая во внимание этот факт, для обеспечения требований [104, 105, 106] следует обеспечить достаточную радиационную защиту оператору ускорителя и персоналу, находящемуся в смежных с ускорителем помещениях. Для измерения мощности дозы ионизирующего излучения в контрольных точках помещения операторской и смежных помещениях применяли дозиметр марки ДКС-1123, способный измерять импульсы доз ионизирующих излучений субмикросекундной длительности в широком диапазоне энергий [107]. В течение всего времени работы с ускорителем в режиме генерации импульсного электронного пучка осуществлялся индивидуальный дозиметрический контроль персонала с помощью дозиметров типа ДТЛ-02.

2.3. Конструктивное исполнение высоковольтного генератора ускорителя

Приведённый обзор конструктивного исполнения генератора позволяет выделить параметры функциональных элементов, способных значимо повлиять на работу принципиальной схемы ускорителя (Рисунок 17). Определяемые значимые параметры элементов можно учесть, используя соответствующие схемы замещения. Конструкция

высоковольтной части ускорителя «АСТРА» разрабатывалась с учётом требований к минимизации габаритов оборудования, простоты монтажа и обслуживания при обеспечении достаточной электрической прочности изолирующих элементов.

В качестве основной изоляции высоковольтных элементов применялось трансформаторное масло марки ГК. Единый маслonaполненный объем (Рисунок 21) включает в себя высоковольтный ёмкостный накопитель энергии 3, высоковольтный коммутатор 2, импульсный трансформатор 4 и ограничивается высоковольтным изолятором 6 вакуумного электронного диода. Стенки корпуса высоковольтной части являются частью витка первичной обмотки высоковольтного импульсного трансформатора.

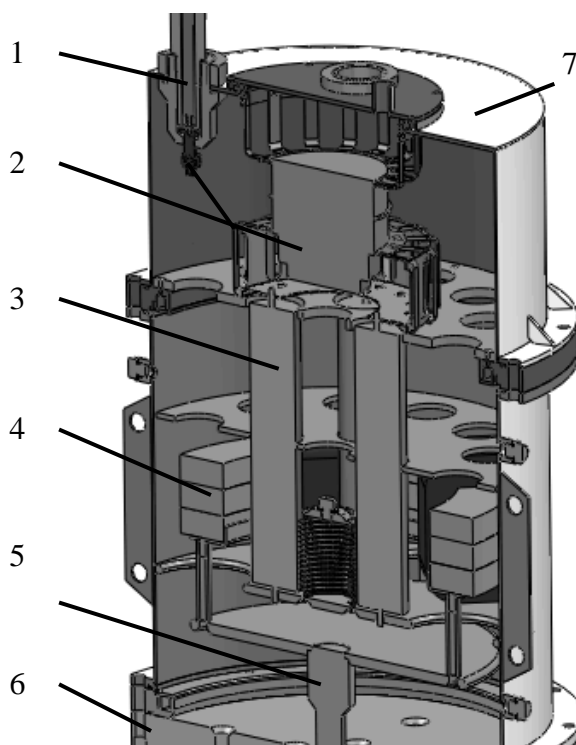


Рисунок 21. Устройство высоковольтной части генератора.

1 - зарядный кабельный ввод; 2 - высоковольтный коммутатор; 3 – батарея конденсаторов; 4 - сердечник импульсного трансформатора; 5 - высоковольтный вывод генератора; 6 - высоковольтный изолятор; 7 - герметичный корпус.

Корпус высоковольтной части генератора заземлён и выполняет помехозащитную функцию при срабатывании высоковольтного коммутатора. Максимальный диаметр фланцев корпуса 460 мм, а высота 900 мм от верхней крышки до опорного диска изолятора.

2.3.1. Ёмкостный накопитель энергии

Промежуточный накопитель энергии представляет собой батарею конденсаторов К75-74 номинальной ёмкостью 47 нФ и максимальным напряжением 40 кВ. Последовательно-параллельно собранная из 8 конденсаторов батарея имеет эквивалентную ёмкость 88 нФ и может быть заряжена до 80 кВ. С целью увеличения ресурса конденсаторов в условиях

частотного режима работы напряжение заряда батареи ограничивалось 34-35 кВ, что предполагает запасание порядка 50 Дж энергии.

Схема импульсной зарядки батареи (Рисунок 17) позволяет осуществлять заряд высоковольтного ёмкостного накопителя за 25 мкс (Рисунок 22) до амплитудного значения с разбросом $\pm 1\%$ [24*].

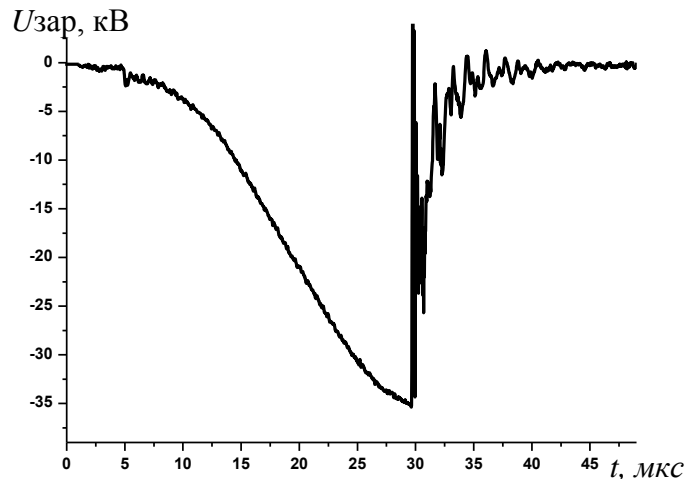


Рисунок 22. Характерная кривая напряжения при заряде высоковольтного ёмкостного накопителя энергии.

За время эксплуатации ускорителя случаи выхода из строя ёмкостной батареи не были зафиксированы, что составляет более 5×10^7 циклов заряд-разряд.

2.3.2. Высоковольтный коммутатор

В первоначальном варианте исполнения схемы генерации импульсов ускоряющего напряжения (Рисунок 17), роль коммутатора VT2 выполнял многоканальный разрядник тригatronного типа, устройство и принцип действия которого описаны в [108]. При последующей модернизации схемы ускорителя многоканальный тригatronный разрядник был заменён псевдоискровым разрядником, обладающим более высокими эксплуатационными характеристиками. В качестве высоковольтного коммутатора VT2 (Рисунок 17) применён разрядник типа ТДИ-1/45к (Рисунок 23), включенный в режиме с заземлённым катодом [32].

По сравнению с тригatronным разрядником, псевдоискровой коммутатор имеет ряд эксплуатационных преимуществ: более высокую долговечность, более широкий диапазон напряжений срабатывания, высокую стабильность коммутируемого напряжения в широком диапазоне рабочих температур. Псевдоискровой разрядник так же более прост в использовании, так как не требует отдельного источника повышенного давления рабочего газа.

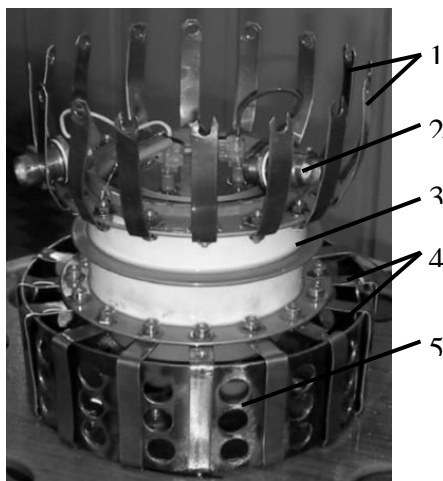


Рисунок 23 .Высоковольтный коммутатор с контактной системой. 1 - контакты заземлённого электрода; 2 - СРГ-75; 3 - тиратрон с холодным катодом типа ТДИ-1/45к; 4 - контакты потенциального электрода; опора коммутатора.

Управление тиратроном осуществляется импульсами отрицательной полярности: $2\div 6$ кВ, $80\div 100$ А при крутизне не менее 5 кВ/мкс [32]. Разработанная электрическая схема СЗК (Рисунок 17) обеспечивала формирование управляющих импульсов запуска тиратрона с указанными параметрами в автоматическом режиме [16*]. В соответствии с рекомендациями изготовителя [32] обеспечен симметричный токоподвод и токосъём с электродов прибора. Согласно [109], возможно достижение собственной индуктивности ёмкостно-коммутаторной сборки 8,6 нГн при активном сопротивлении 21 мОм, однако принимая во внимание максимальные значения индуктивности, полученные в [110], к дальнейшим расчётам принимали максимальное, определенное в [110] значение $L_k=18$ нГн.

2.3.3. Импульсный трансформатор

Применяемый импульсный трансформатор использует в качестве первичного витка часть корпуса генератора (Рисунок 21) и имеет коэффициент трансформации 11. Первичная и вторичная обмотки трансформатора имеют общую точку – корпус генератора [91]. Вторичная обмотка имеет 4 секции, витки обмотки изготовлены из медной фольги толщиной 0,5 мм. Межвитковая изоляция выполнена многослойной из ПСК-51 толщиной 0,19 мм с пропиткой трансформаторным маслом (Рисунок 24).

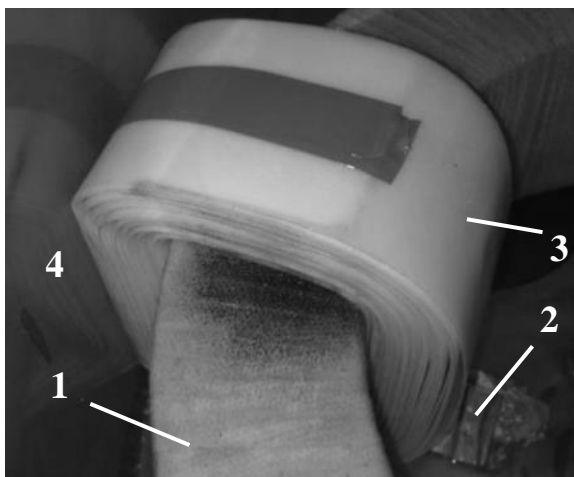


Рисунок 24. Фотография секции вторичной обмотки высоковольтного импульсного трансформатора. 1 – сердечник; 2 – виток вторичной обмотки; 3 – витковая изоляция; 4 – заземлённый корпус генератора.

Намотка вторичной обмотки спиральная, внешний виток имеет потенциал заземлённого корпуса, внутренний электрически соединён с сердечником и сообщает ему высокий потенциал. Сердечник выполнен из ленты магнитомягкого сплава 50НП тремя тороидами общей площадью сечения $3 \times 25 \times 50 \text{ мм}^2$. Параметры схемы замещения импульсного трансформатора могут быть определены по результатам экспериментальных исследований работы генератора высоковольтных импульсов.

2.3.4. Высоковольтный изолятор

Функциональным назначением высоковольтного импульсного изолятора является обеспечение электрической прочности промежутка между высоковольтным выводом генератора и заземлённым корпусом, в то же время изолятор отделяет маслonaполненный объем высоковольтной части генератора от вакуумного объёма электронного диода (Рисунок 25). Материал диэлектрика – оргстекло. Для обеспечения равномерного распределения потенциала вдоль поверхности изолятор выполнен секционированным, с ёмкостной связью между секциями. Расчёт электрических полей (Рисунок 25) в программе моделирования ELCUT 5.5 показал, что напряжённость электрического поля вдоль поверхности изолятора в вакууме не превышает 40 кВ/см.

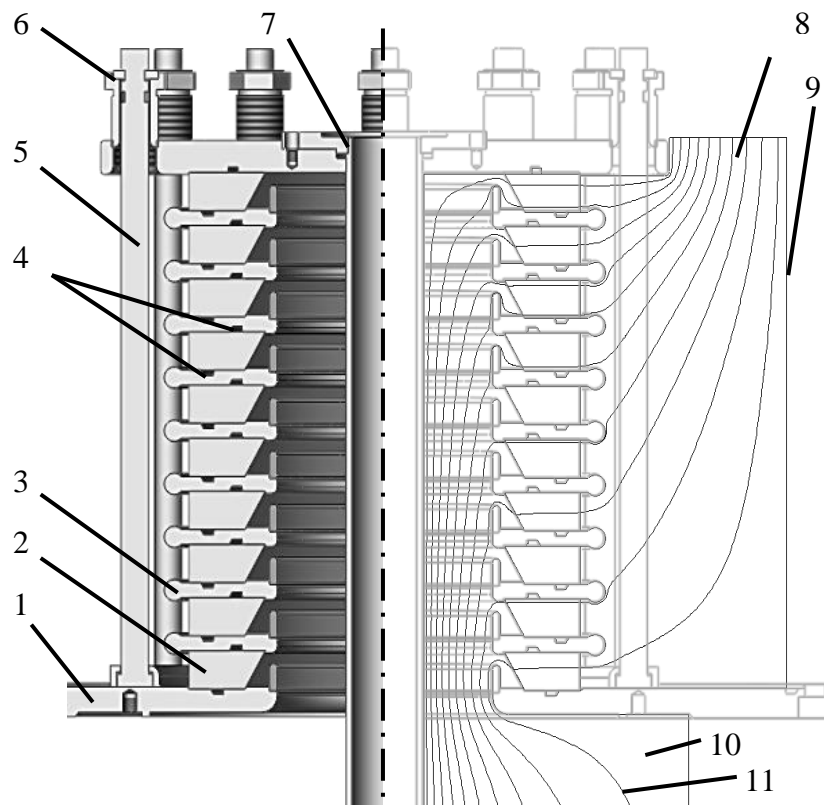


Рисунок 25. Устройство высоковольтного изолятора. Результаты расчёта электрических полей в программе Elcut (напряжение между изолиниями потенциала 50 кВ). 1 – опорный фланец; 2 - изолятор; 3 – градиентное кольцо; 4 - вакуумные уплотнения; 5 – стяжка; 6 – система стяжки; 7 – катододержатель, 8 – масляный объём; 9 – заземлённый корпус; 10 – вакуумный объём; 11 – изолиния потенциала.

Расчёт электрических полей позволил оценить конструктивную ёмкость высоковольтного электрода относительно заземлённого корпуса $C_{KT}=83$ пФ. Тройные точки металл-диэлектрик-вакуум экранированы выступающими элементами градиентных колец 3.

Зазоры между экранами соседних градиентных колец выполнены таким образом, что электрическая прочность данного промежутка меньше электрической прочности поверхности изолятора при атмосферном давлении, соответственно, при разгерметизации вакуумного объёма электрической пробой изолятора не приводит к выводу его из строя.

Система стяжки 6 прижимает изолятор к градиентному кольцу с пазом, в котором располагается уплотнительное кольцо из резины МБС, что обеспечивает вакуумное уплотнение вплоть до 1×10^{-6} торр. Катододержатель 7 выполнен полым, сообщаясь с масляным объёмом генератора, таким образом, циркуляция масла обеспечивает охлаждение катодного узла. Элементы системы натяжки 6 после установки закрываются экраном, который находится под высоким потенциалом.

2.4. Исследование параметров выходной цепи генератора высоковольтных импульсов

Параметры импульса ускоряющего напряжения зависят от согласования выходных параметров генератора импульсов и его нагрузки. Для определения значения импеданса нагрузки, при котором происходит максимальная передача запасённой энергии, требуется уточнение параметров выходной цепи генератора. Часть конструктивных параметров генератора может быть оценена расчётным путём, для оценки других требуется проведение экспериментальных исследований. С этой целью был поставлен ряд экспериментов, в которых нагрузка генератора была заменена эквивалентом с известными параметрами: опыт короткого замыкания и работа генератора на жидкостную резистивную нагрузку.

2.4.1. Исследование параметров выходной цепи генератора в режиме короткого замыкания

Опыт короткого замыкания – режим работы с минимальным значением импеданса нагрузки, характеризуется максимальными значениями токов, возможными для данной конкретной разрядной цепи. Данный режим применялся для калибровки датчиков тока.

В опыте короткого замыкания, схема которого приведена на рисунке 26, в роли нагрузки генератора выступал низкоиндуктивный шунт цилиндра Фарадея, по падению напряжения на котором определялся протекающий по шунту ток.

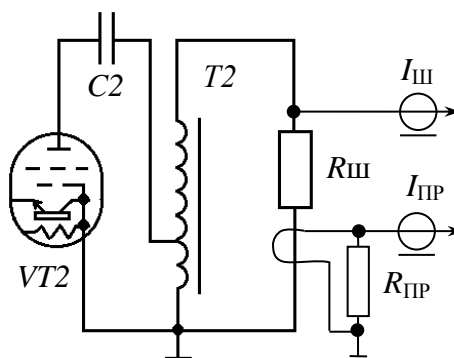


Рисунок 26. Упрощённая принципиальная схема опыта короткого замыкания. VT2 - коммутатор; C2 – высоковольтный ёмкостный накопитель; T2 – высоковольтный импульсный трансформатор; Rш – сопротивление низкоиндуктивного шунта; RПР – нагрузочное сопротивление пояса Роговского;

Сигнал, полученный с низкоиндуктивного шунта, приведён на рисунке 27. Он сравнивался с сигналом, полученным с ПР, что позволило провести калибровку последнего и определить его чувствительность, которая составила 240 А/В.

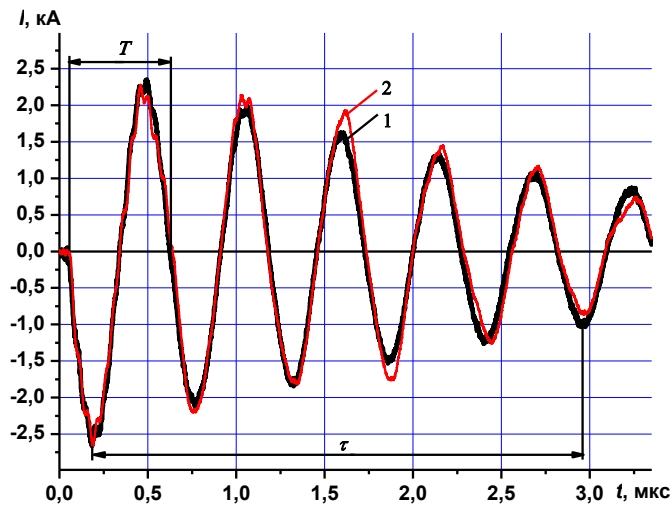


Рисунок 27. Характерные осциллограммы сигналов, полученных с низкоиндуктивного шунта (1) и пояса Роговского (2) при проведении опыта короткого замыкания.

Анализ формы кривой тока (Рисунок 27) показал, что колебания в разрядном контуре генератора носят затухающий характер с периодом колебаний $T_0=0,56$ мкс и постоянной времени затухания $\tau_0=2,8$ мкс. Полученные характеристики позволили произвести оценочный расчёт параметров разрядной цепи генератора.

В общем случае, на основании принципиальной схемы ускорителя (Рисунок 17), упрощенная эквивалентная схема разрядной цепи генератора будет иметь вид, представленный на рисунке 28.

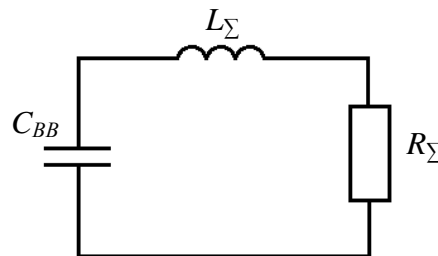


Рисунок 28. Эквивалентная схема разрядной цепи генератора. C_{BB} – ёмкость высоковольтного накопителя; L_{Σ} - суммарная индуктивность цепи разряда; R_{Σ} - суммарное сопротивление цепи разряда.

В режиме короткого замыкания накопление энергии в конструктивных ёмкостях генератора минимально, следовательно, определяющую роль будет играть ёмкость батареи конденсаторов, номинальное значение которой составляет $C_{BBном}=88$ нФ, а после приведения схемы к высокому напряжению:

$$C_{BB} = \frac{C_{BBном}}{K_{TP}^2}, \quad (4)$$

где $K_{TP} = 11$, коэффициент трансформации высоковольтного импульсного трансформатора.

Выражения, описывающие затухающие колебания в схеме (Рисунок 28) будут иметь следующий вид [111, 112]:

$$\omega_0^2 + \alpha^2 = \frac{1}{L_\Sigma C_{BB}}; \quad (5)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0};$$

$$\alpha = \frac{1}{\tau_0} = \frac{2L_\Sigma}{R_\Sigma}; \quad (6)$$

здесь ω_0 – собственная круговая частота колебаний;

T_0 – период собственных колебаний (Рисунок 27);

α – коэффициент затухания;

τ_0 – постоянная времени цепи разряда (Рисунок 27);

Используя приведённые выше соотношения, получаем выражения для оценки недостающих параметров разрядной цепи:

$$L_\Sigma = \left\{ C_{BB} \cdot \left(\left(\frac{2\pi}{T_0} \right)^2 + \frac{1}{\tau_0^2} \right) \right\}^{-1} \quad (7)$$

Оценённое по (7) значение $L_\Sigma=10,9$ мкГн. Известная величина τ_0 (Рисунок 27) позволяет оценить также и R_Σ :

$$R_\Sigma = \frac{2L_\Sigma}{\tau_0} \quad (8)$$

Оценка по (8) показала, что $R_\Sigma=7,8$ Ом. Исходя из найденных параметров эквивалентной схемы, возможно также определить величину критического сопротивления R_{KP} , выше значения которого разряд перейдёт в апериодическую форму без изменения направления тока в разрядном контуре:

$$R_{KP} = 2\rho = 2\sqrt{\frac{L_\Sigma}{C_{BB}}} \quad (9)$$

Таким образом, найденное по (9) значение $R_{KP}=198$ Ом.

Проверку и уточнение найденных значений элементов эквивалентной схемы разрядной цепи (Рисунок 28) проводили при значении нагрузки сравнимом с выходным импедансом генератора.

2.4.2. Испытание генератора с резистивной нагрузкой

При увеличении сопротивления нагрузки генератора до порядка выходного сопротивления генератора, величина падения напряжения на нагрузке становится достаточной для проведения калибровки датчика напряжения, расположение которого указано на рисунке 18. Падение напряжения на высокоомной нагрузке, определяемое протекающим током, в предельном случае (Рисунок 27) может составлять сотни кВ, следовательно, конструкция высоковольтной нагрузки должна исключать электрический пробой при таких значениях напряжения.

Калибровка датчика напряжения

В качестве нагрузки генератора применялись два параллельно соединённых резистора с объёмным сопротивлением ТВО-60 эквивалентным сопротивлением 17,2 Ом (Рисунок 29).

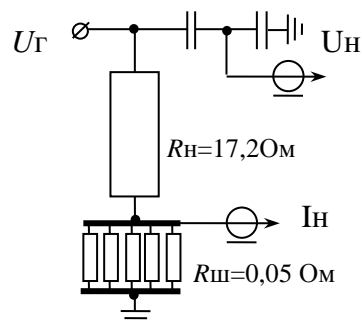


Рисунок 29. Схема испытаний генератора с резистивной нагрузкой.

Эксперимент проводился при атмосферном давлении в камере диода. Генератор запускался при пониженном значении зарядного напряжения на уровень 1/3 от номинального. Для калибровки датчика ускоряющего напряжения, полученный с него сигнал сравнивался со значением падения напряжения на резисторе, вычисленным по измеренному значению протекающего по нему тока (Рисунок 30). Найденный коэффициент ослабления датчика напряжения составляет 940.

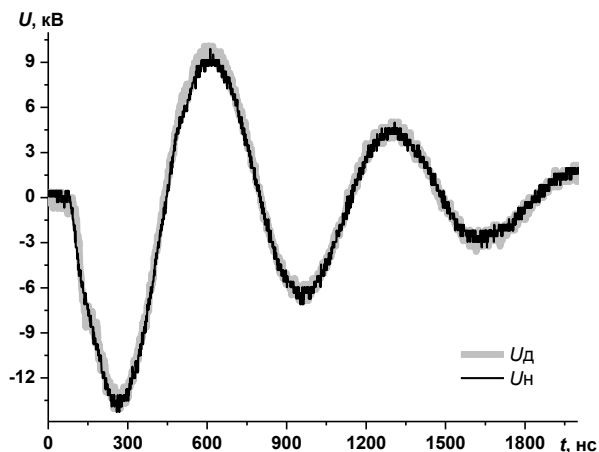


Рисунок 30. Осциллограммы сигнала датчика напряжения и падения напряжения на нагрузке генератора $R_H=17,2$ Ом.

Так как датчик импульсного напряжения конструктивно расположен на высоте основания катододержателя, необходимо оценить влияние индуктивности катододержателя на уменьшение значения напряжения на ускоряющем промежутке относительно выходного напряжения генератора. Найденная индуктивность катододержателя [113] составляет величину $L_k=143$ нГн. Падение напряжения на индуктивности катододержателя при генерации импульса ускоряющего напряжения при этом составит единицы киловольт, что сравнимо с погрешностью измерений и не учитывалось при дальнейшем анализе работы ускорителя.

Таким образом, приведённые осциллограммы калибровки (Рисунок 27 и Рисунок 30) показывают удовлетворительное совпадение опорного сигнала и сигнала с калибруемых датчиков в течение длительности не менее одного периода измеряемого сигнала, что позволяет утверждать о корректности применения используемых средств измерения импульсных токов и напряжений для проведения экспериментальных исследований.

Мощность, выделенная в нагрузке.

Полученные сигналы с датчиков использовались для оценки мощности, развиваемой на нагрузке и выделенной в ней энергии:

$$P(t) = U_n(t) \cdot I_n(t), \quad (10)$$

Полученные по (10) кривые мощности (Рисунок 31) позволяют графически оценить согласование импедансов генератора и нагрузки из соотношения площадей первого импульса мощности, и последующих. Найденные площади, ограниченные кривыми импульсов есть значения энергии, выделяемой в нагрузке за время длительности импульса:

$$E = \int_0^t P dt, \quad (11)$$

Определение энергии, выделенной за время первого полупериода действия напряжения, необходимо для оценки эффективности передачи энергии из колебательного контура разрядной цепи в нагрузку. Основанием для этого является принцип действия вакуумного электронного диода с взрывоэмиссионным катодом, который ограничивает длительность генерации электронного пучка временем закорачивания ускоряющего промежутка катодной и анодной плазмой. Кроме того, последующие полуволны необходимой полярности имеют амплитуду ниже первой, что приводит к генерации электронного пучка с меньшей кинетической энергией электронов и большим потерям в выводном устройстве. Приведённые выше доводы позволяют считать полезным, основным только первый, максимальный импульс мощности, а остальные относить к потерям.

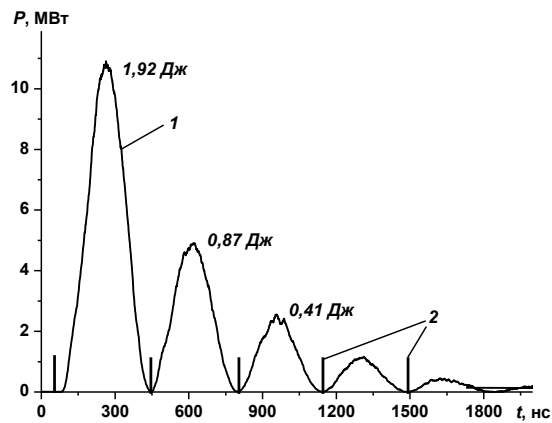


Рисунок 31. Кривая скорости ввода энергии в нагрузку (1) с указанием границ интегрирования (2) при расчёте энергии импульса мощности, выделенной в нагрузке при $R_H=17,2$ Ом.

Проведение экспериментальных исследований при полном зарядном напряжении генератора с нагрузкой, близкой к согласованной требуют применения высоковольтной нагрузки для установки в вакуумном объёме с целью обеспечения электрической прочности высоковольтного изолятора генератора. С этой целью был спроектирован и изготовлен высоковольтный нагрузочный жидкостный резистор для установки в вакуумный объем [114].

Конструкция высоковольтной жидкостной нагрузки

Нагрузка выполнена в виде диэлектрической трубы, герметично заглушенной с торцов металлическими фланцами, выполняющими функцию электродов (Рисунок 32). Особенностью конструкции является наличие сифонного компенсатора 6 для стабилизации давления электролита при проведении исследований с большим количеством повторений импульсов.

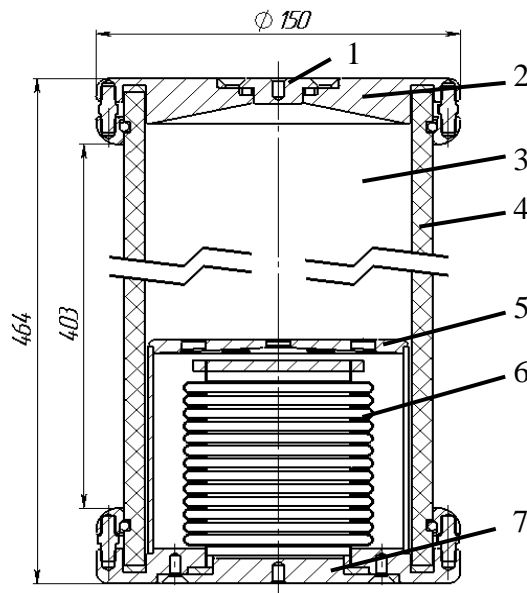


Рисунок 32. Конструкция жидкостной нагрузки с компенсатором расширения электролита.
1 - заливная горловина; 2 - потенциальный электрод; 3 - герметичный объем с электролитом;
4 - диэлектрическая труба (стеклотекстолит); 5 - заземлённый электрод; 6 - газовый сифонный компенсатор; 7 - крышка сифонного компенсатора.

В качестве электролита жидкостной нагрузки применён раствор соли KCl [114]. Оценочный расчёт изменения объёма электролита при нагреве показал, что в нагрузке может быть выделено порядка 1 МДж без нарушения герметичности корпуса. Длина корпуса рассчитана на применение нагрузки для импульсов напряжения субмикросекундной длительности амплитудой до 600 кВ. Приведённая конструкция жидкостной нагрузки (Рисунок 32) предназначена для вертикальной установки заливной горловиной вверх (Рисунок 33). Заземлённый электрод выполнен таким образом, что при изменении объёма компенсатора геометрия межэлектродного промежутка остаётся неизменной. Конструкция уплотнений позволила применять жидкостную нагрузку при давлении остаточной атмосферы 5×10^{-4} торр.

Работа генератора с высоковольтным жидкостным резистором.

Схема проведения эксперимента аналогична схеме калибровки датчика напряжения (Рисунок 29). Сопротивление нагрузки определялось по показаниям датчика напряжения и сигнала с низкоиндуктивного шунта. Принято допущение, что сопротивление нагрузки в течение длительности импульса остаётся неизменным.

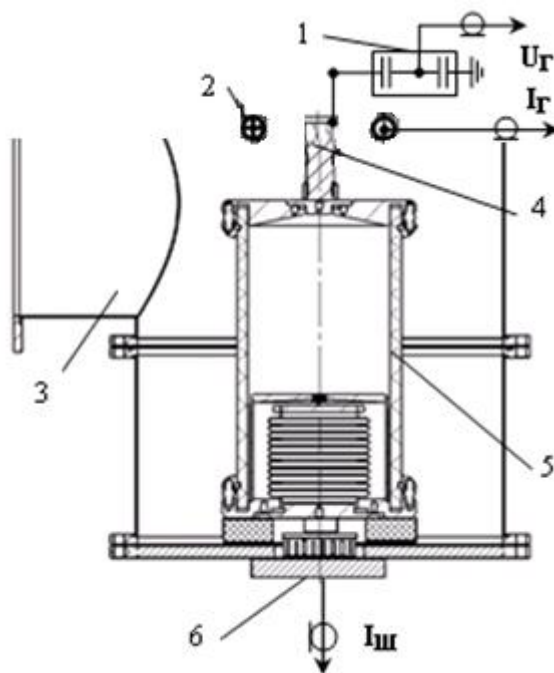


Рисунок 33. Схема проведения испытаний генератора с жидкостной нагрузкой. 1 – ёмкостный делитель напряжения; 2 – пояс Роговского; 3 – патрубок откачки вакуума; 4 – высоковольтный вывод генератора; 5 – жидкостная нагрузка; 6 – низкоиндуктивный шунт.

Для изменения сопротивления жидкостной нагрузки, электролит нагревался током генератора при работе с частотой 10 имп./с. Характерные осциллограммы сигналов с датчика напряжения приведены на рисунке 34.

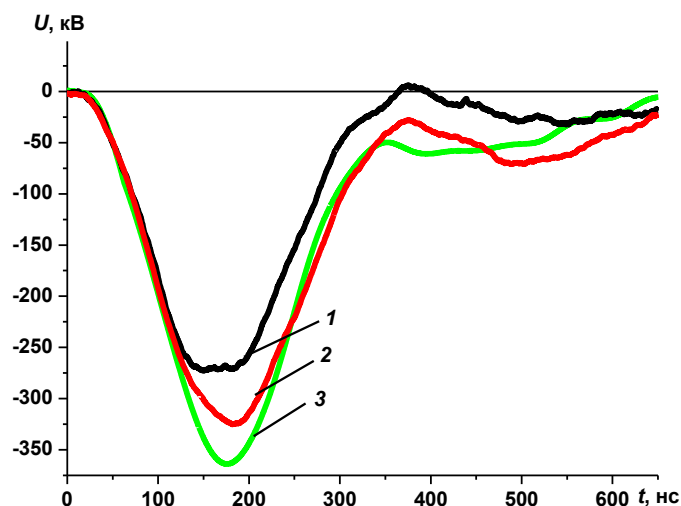


Рисунок 34. Характерные осциллограммы напряжения на жидкостной нагрузке.
1 – $R_H=190$ Ом; 2 – $R_H=280$ Ом; 3 – $R_H=480$ Ом.

Для каждого значения сопротивления нагрузки определялась амплитуда импульса падения напряжения на нагрузке (Рисунок 34) и значение энергии, выделяющейся в ней за длительность первого импульса мощности. Результаты сведены в таблицу 3.

Следует отметить, что наиболее предпочтительным для генерации электронного пучка является электронный диод, сопротивление которого равно или больше $R_{кр}$, что позволяет избежать изменения направления разрядного тока в диоде и выделить накопленную энергию в течение одного импульса.

Таблица 3. Зависимость параметров импульса напряжения от сопротивления нагрузки.

Сопротивление нагрузки, Ом	190	280	480
Амплитудное значение падения напряжения, кВ	270	320	360
Энергия в первом импульсе, Дж	47,9	44,4	36,3

Проведённые экспериментальные исследования работы генератора на высоковольтный жидкостный резистор позволили произвести калибровку датчика напряжения, оценить зависимость амплитуды импульса напряжения и энергии, выделяемой в нагрузке, от её сопротивления.

2.4.3. Параметры схемы замещения выходной цепи генератора

На основании принципиальной схемы ускорителя (Рисунок 17) к расчёту была принята упрощенная схема замещения основных узлов высоковольтной части ускорителя с учётом значимых конструктивных особенностей (Рисунок 35).

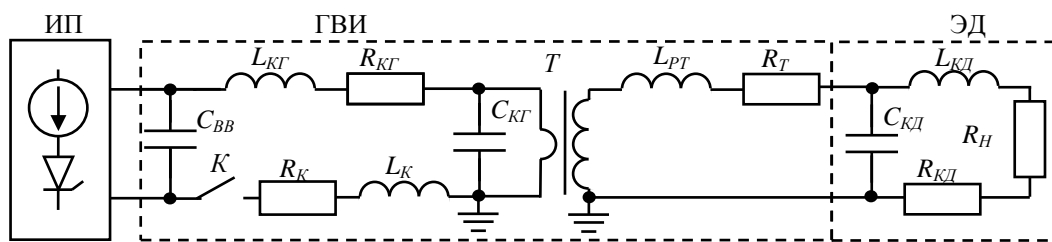


Рисунок 35. Схема замещения высоковольтного генератора ускорителя «АСТРА». ИП – источник питания; ГВИ – высоковольтный генератор; ЭД – электронный диод; C_{BB} – высоковольтный ёмкостный накопитель; $L_{КГ}$ – индуктивность контура разряда высоковольтного ёмкостного накопителя; $R_{КГ}$ – сопротивление контура разряда ёмкостного накопителя; K – высоковольтный коммутатор; R_K – сопротивление токопроводящего канала коммутатора; T – высоковольтный импульсный трансформатор; $L_{РТ}$ – 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;

Источник питания, осуществляет заряд ёмкостного накопителя C_{BB} за время $t_{зар} = 25$ мкс до заданного амплитудного значения (Рисунок 22). Ёмкостный накопитель C_{BB} соединён с ИП линией зарядки – токопроводом, выполненным в виде кабельной линии, влияние которой учитывалось при получении осциллограммы зарядного напряжения C_{BB} (Рисунок 22).

Для моделирования импульсного трансформатора принята Т-образная схема замещения [115, 116]. Эквивалентная схема 3-го порядка [117] учитывает индуктивность рассеяния импульсного трансформатора $L_{РТ}$ и ёмкости обмоток $C_{КГ}$ $C_{КД}$ для учёта колебаний, определяемых конструктивным исполнением витков. Таким образом, схема замещения высоковольтного генератора ВГ (Рисунок 35) представлена функциональными элементами C_{BB} , R_H , K и T , а так же конструктивными параметрами, влияющими на баланс энергии в генераторе $L_{КГ}$, $R_{КГ}$, R_K , $L_{РТ}$, R_{OT} , $C_{КГ}$, $L_{КД}$, $C_{КД}$. Значения параметров элементов схемы замещения, определяемых конструктивным исполнением, были оценочно рассчитаны исходя из геометрических размеров токопроводов с учётом проводимости материала и поверхностного эффекта [118, 119, 120]. Для оценки значений конструктивных ёмкостей $C_{КГ}$ и $C_{КД}$, ввиду малой их величины для корректного инструментального измерения, был использован расчёт в программе моделирования полей ELCUT 5.5 Профессиональная версия. При этом учитывалось, что основной составляющей конструктивной ёмкости генератора $C_{КГ}$ является ёмкость градиентных колец высоковольтного изолятора электронной пушки относительно заземлённого корпуса, а для конструктивной ёмкости диода $C_{КД}$ – ёмкость катододержателя относительно градиентных колец высоковольтного изолятора электронной пушки и относительно заземлённого корпуса генератора.

Результаты оценочных расчётов сведены в таблицу 4.

Следует отметить, что индуктивность контура разряда высоковольтного ёмкостного накопителя $L_{КГ}$ (Рисунок 35) является эквивалентным значением и складывается из

индуктивности элементов по пути следования разрядного тока (Рисунок 21): батареи конденсаторов, участка корпуса и контактной системы коммутатора. Оценочное омическое сопротивление перечисленных элементов учитывается значением $R_{КГ}$.

Проведение опыта короткого замыкания (Рисунок 26) позволило определить комплексные значения эквивалентных параметров схемы замещения трансформатора и диодного узла, влияние которых можно оценить по величине и форме тока короткого замыкания $L_{РТ}$, R_T , $L_{КД}$.

Таблица 4. Параметры элементов схемы замещения генератора ускорителя «АСТРА».

Обозначение элемента	$C_{ВВ}$	$L_{КГ}$	$R_{КГ}$	L_K	R_K	$C_{КГ}$	$L_{РТ}$	R_T	$L_{КД}$	$C_{КД}$	$R_{КД}$
Единицы измерения	нФ	нГн	Ом	нГн	мОм	пФ	мкГн	мОм	нГн	пФ	мОм
Оценочное значение параметра	88	13	1,45	18	21	120	6,9	28	160	83	10

Полученные параметры элементов схемы замещения генератора содержат данные, учитывающие параметры ключевых узлов генератора, влияющих на характеристики формируемого импульса ускоряющего напряжения.

2.5. Моделирование выходной цепи генератора высоковольтных импульсов

Создание электронной модели генератора позволяет исследовать работу генератора в различных режимах, не прибегая к проведению натурных испытаний в широком диапазоне контролируемых параметров генератора. Таким образом, применение электронной модели позволяет существенно уменьшить стоимость проведения исследований, исключить заведомо неподходящие режимы работы, сократить время проведения исследований и обеспечить должную наглядность для облегчения понимания исследуемых процессов. Корректность моделирования определяется полнотой и достоверностью исходных данных для составления модели. Проверка корректности моделирования должна проводиться серией экспериментальных исследований при изменении параметров моделируемой цепи.

2.5.1. Вычислительная модель выходной цепи генератора

Полученные параметры схемы замещения генератора позволили создать модель разрядной цепи генератора (Рисунок 36) с использованием программного пакета моделирования процессов в электрических цепях NI Multisim.

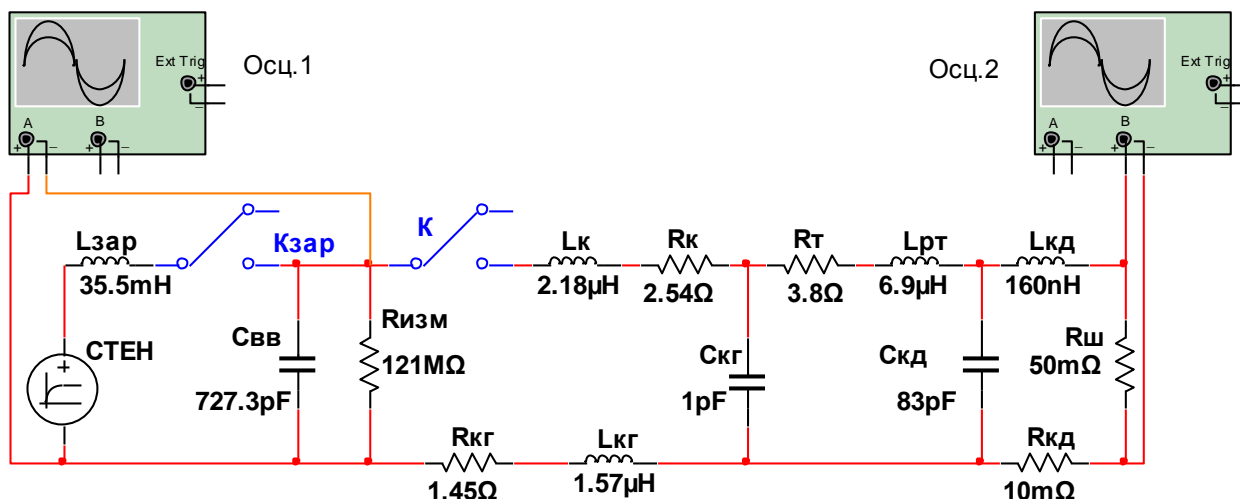


Рисунок 36. Изображение модели электрической цепи в программе NI Multisim.

Названия элементов соответствуют схеме замещения генератора (Рисунок 35). Схема приведена к единому уровню напряжения, значения параметров элементов приведены с учётом коэффициента трансформации импульсного трансформатора.

Следует отметить, что ключи, применяемые для построения модели, для упрощения расчётов, имеют идеальные характеристики.

Точки подключения средств диагностики совпадают с показанными на рисунке 18. Осц. 1 предназначен для регистрации напряжения на эквивалентной ёмкости C_{BB}' (Рисунок 37). Заряд C_{BB}' осуществляется от эквивалентного источника питания ИП', представляющего собой источник постоянного напряжения, отделённый индуктивностью зарядного дросселя $L_{зар} = 35$ мГн. В реальной схеме зарядный дроссель выполняет разделительную функцию для предотвращения влияния параметров ИП на процесс разряда высоковольтной ёмкости и защиты ИП от импульсных воздействий высоковольтного разрядного контура. Для упрощения модели и ограничения влияния моделируемого ИП, ключ $K_{зар}$ после окончания процесса зарядки размыкается.

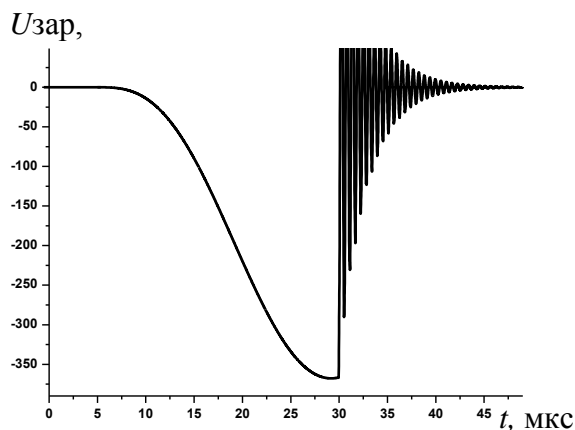


Рисунок 37. Моделирование процесса заряда батареи конденсаторов C_{BB}' от источника питания ИП'.

Таким образом, применяемая модель ИП¹ позволяет добиться аналогичных начальных условий в момент коммутации K и ограничить влияние параметров ИП на процесс разряда высоковольтной ёмкости C_{BB}^1 .

2.5.2. Моделирование работы генератора в режиме короткого замыкания

Приведённое изображение электрической схемы (Рисунок 36) модели соответствует режиму работы генератора близкому к короткому замыканию. Сравнительный анализ кривых тока (Рисунок 38), полученных экспериментальным путём и путём моделирования [20*] показал удовлетворительное совпадение амплитудно-частотных характеристик кривых, что говорит о корректности используемой модели применительно для режима короткого замыкания генератора.

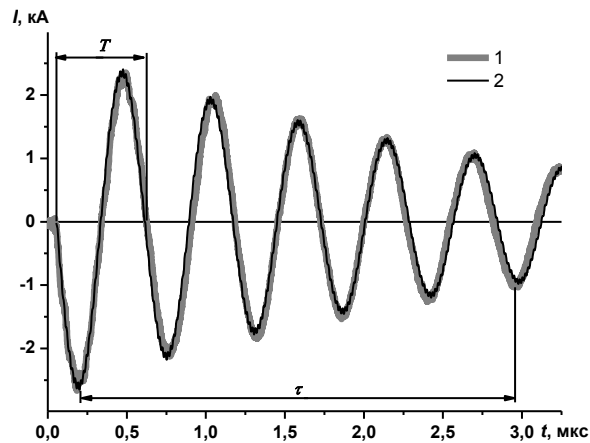


Рисунок 38. Характерные осциллограммы тока короткого замыкания при натурных испытаниях (1) и полученного с помощью модели (2).

Удовлетворительное совпадение кривых токов (Рисунок 38) означает соответствие найденных значений реальным для комплексных элементов схемы замещения цепи разряда генератора (Рисунок 28). Частные случаи, при усложнении указанной схемы без изменения значения эквивалентов, могут отличаться, что делает необходимым проведение дополнительной проверки корректности модели при нескольких различных значениях варьируемых параметров.

2.5.3. Моделирование работы генератора на высокоомную нагрузку

Для моделирования использовались значения сопротивления нагрузки аналогичные экспериментам с жидкостной нагрузкой. Полученные экспериментально и путём моделирования кривые падения напряжения на высокоомной нагрузке при $R_H=280$ Ом совпадают в пределах погрешности средств измерения (Рисунок 39), что позволяет утверждать о корректности применяемой модели для моделирования переходных процессов в выходной цепи генератора и удовлетворительной точности оценки значений параметров её элементов.

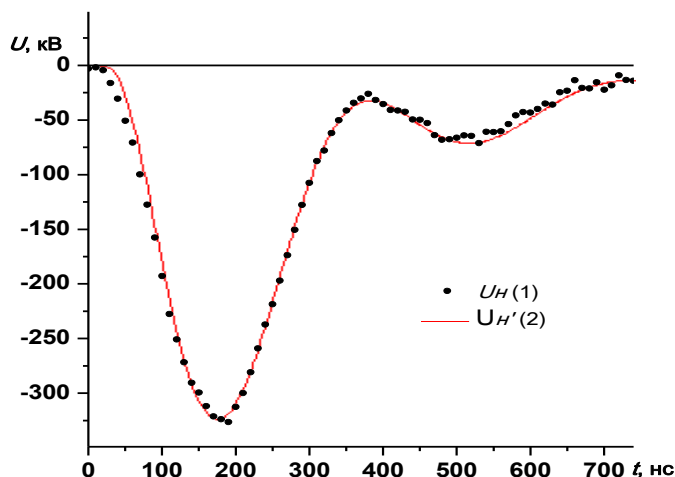


Рисунок 39. Смоделированный импульс напряжения $U_H'(2)$ на нагрузке $R_H=280$ Ом в сравнении с полученным экспериментальным путём $U_H(1)$.

Применение модели разрядной цепи генератора позволило получить зависимость уровня напряжения на нагрузке от её сопротивления (Рисунок 40) для области значений, превышающих экспериментальные [20*], без риска выхода из строя экспериментального оборудования превышении электрической прочности высоковольтного изолятора или изолятора жидкостной нагрузки.

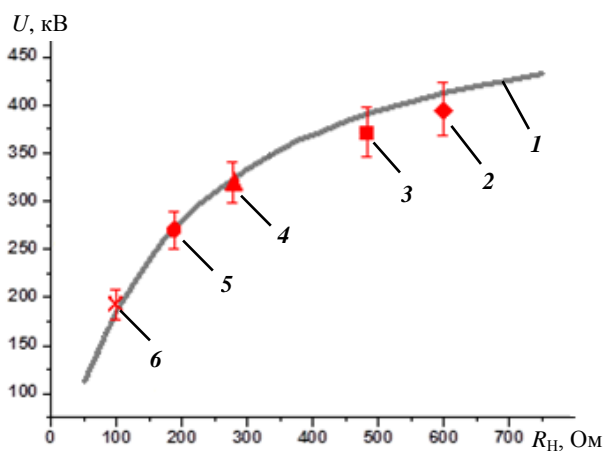


Рисунок 40. Зависимость амплитуды импульса напряжения от импеданса нагрузки. Измеренные значения напряжения для: $R_H=600$ Ом (2); $R_H=480$ Ом (3); $R_H=280$ Ом (4); $R_H=190$ Ом (5); $R_H=100$ Ом (6).

Исходя из данных, приведённых на рисунке 40, можно заключить, что описанная модель выходной цепи генератора позволяет корректно, с погрешностью в пределах средств измерения, оценивать амплитуду генерируемого импульса напряжения для широкого диапазона сопротивлений нагрузки.

Вместе с тем, следует учесть, что для генерации электронного пучка полезным может считаться только импульс отрицательной полярности, остальная энергия может быть отнесена к

потерям, таким образом, предпочтительным для работы генератора на вакуумный электронный диод будет режим, соответствующий аperiодической форме разряда ёмкостного накопителя генератора.

Выводы

На основании материалов, изложенных в данной главе, можно утверждать о создании расчётной модели выходной цепи генератора, которая позволяет с погрешностью в пределах средств измерения в экспериментах описывать режимы работы генератора для широкого диапазона сопротивлений нагрузки. Удовлетворительно совпадают временные, частотные характеристики генерируемых импульсов для экспериментальных и моделируемых данных. Данное обстоятельство создаёт основания для обоснованного практического использования результатов полученных при моделировании режимов работы генератора на нагрузку с импедансом от 100 до 600 Ом. Разработанная расчётная модель основана на схеме замещения генератора, отражающей его принципиальное действие, и учитывает характеристики конструктивных элементов, влияющих на параметры импульса напряжения на нагрузке. Параметры элементов схемы замещения, недоступные для инструментального измерения, оценены расчётным путём, с применением специализированного программного обеспечения (ELCUT 5.5) и последующей экспериментальной проверкой. Экспериментальные данные получены с помощью комплекта диагностического оборудования, состав, способ калибровки и применения которого обеспечивают необходимую достоверность результатов.

Глава 3. Вакуумный электронный диод ускорителя «АСТРА»

Для генерации импульсов электронного пучка описанный выше ГВИ был нагружен на вакуумный электронный диод. В качестве прототипа использовались наиболее простые по составу конструкции вакуумных электронных диодов из описанных в литературе (Глава 1). Концептуально, вакуумный электронный диод состоит из герметичного вакуумного объёма, соединённого с вакуумным постом (Рисунок 41). Технологическая необходимость вывода пучка электронов вертикально вниз определила положение патрубка откачки вакуума в горизонтальной плоскости. Размер и положение патрубка откачки обеспечивают сечение вакуумного тракта не менее выходного сечения высоковакуумного насоса (НВДМ-250) для обеспечения максимально возможной скорости откачки. Элементы конструкции электронного диода используют уплотнения, достаточные для достижения давления остаточной атмосферы порядка 1×10^{-3} Па.

При указанном давлении остаточной атмосферы выходной изолятор ГВИ обеспечивает электрическую прочность поверхности высоковольтного изолятора в течение длительности формируемого генератором импульса напряжения. Аналогичное требование предъявляется и к изолирующим вакуумным промежуткам диода. Катододержатель *1* в диоде (Рисунок 41) крепится к высоковольтному выводу ГВИ и передаёт потенциал вывода катоду *5*, закреплённому с торца катододержателя с помощью обоймы *3* из нержавеющей стали. Функциональным анодом в диоде является фланец вакуумной камеры, герметизирующий объём.

Резьбовое крепление обоймы катода к катододержателю позволяет изменять величину катод-анодного зазора *d* путём изменения толщины медной теплоотводящей шайбы *4* (Рисунок 41). Минимальная и максимальная величины катод-анодного промежутка определяется длиной обоймы катода и в данном случае составляет от 12 до 43 мм.

В центре анодного фланца, на одной оси с катододержателем расположено выпускное окно диода, цель которого состоит в инжекции электронного пучка из вакуумной области генерации в область применения с высоким давлением газовой среды, как правило, атмосферным. В роли разделителя сред выступает мембрана, представляющая собой титановую фольгу толщиной 50 мкм. Прогибаясь под давлением со стороны атмосферы, фольга опирается на поддерживающую решётку из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Решётка выпускного окна имеет шестигранную ячейку с шириной ребра 0,5 мм, что обеспечивает её оптическую прозрачность 92% при Ø100 мм области инжекции пучка. Со стороны атмосферы, на выпускное окно предусмотрено крепление и вакуумное уплотнение цилиндра Фарадея с дифференциальной откачкой для измерения тока инжектированного пучка, а так же калориметра полного поглощения для оценки энергии, перенесённой электронным пучком.

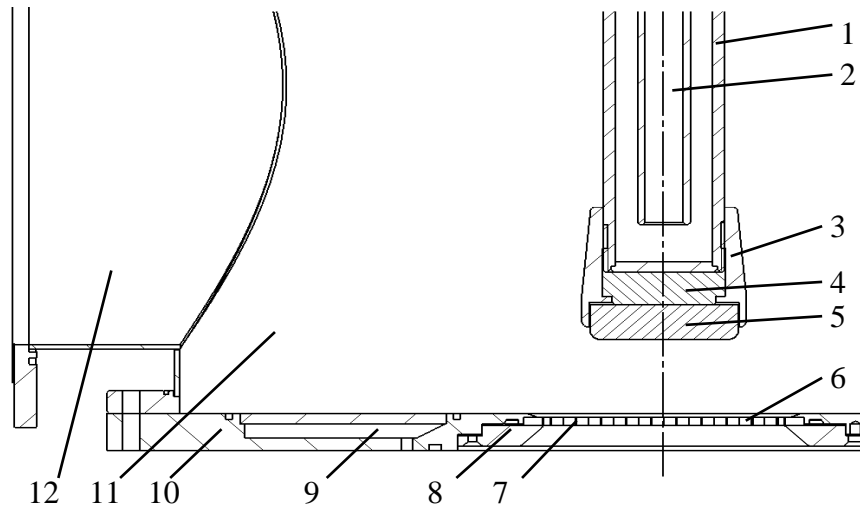


Рисунок 41. Конструкция вакуумного электронного диода. 1 – катододержатель; 2 – масляный канал; 3 – обойма катода; 4 – теплоотводящая шайба; 5 – катод; 6 – поддерживающая решётка – анод; 7 – разделительная фольга; 8 – прижимной фланец фольги; 9 – водяной канал; 10 – фланец выпускного окна; 11 – вакуумный объем; 12 – откачной патрубок.

Предполагаемое использование ускорителя для генерации импульсов тока пучка с высокой частотой повторения предусматривает использование охлаждающей системы для предполагаемых узлов нагрева, катодного и анодного узлов. Проток охлаждающей жидкости по каналу 9 позволяет охлаждать фланец выпускного окна. Выполняется также охлаждение прикатодной области с помощью протока масла в полый катододержателе. Катододержатель связан с масляным объёмом генератора с принудительной циркуляцией масла.

Описанная конструкция диода позволяет использовать для генерации электронного пучка катоды различных типов с одинаковой площадью эмитирующей поверхности. Таким образом, свойства диода при одинаковом значении d будут определяться свойствами катода и могут корректно сравниваться для катодов различных типов.

Исследование свойств вакуумного электронного диода с катодами различного типа рассмотрено в данной главе.

Для сравнения выбраны типы взрывоэмиссионных катодов, которые к моменту выполнения работы подробно освещены в литературе и традиционно используются для генерации электронных пучков субмикросекундной длительности в ускорителях прямого действия: медный многоострый катод [11, 121], плоский графитовый катод [122].

Многоострый катод выполнен в виде запрессованного в обойму пучка медной проволоки диаметром 0,3 мм. Графитовый катод выполнен в виде плоского цилиндра

Для проведения сравнительных испытаний был опробован плоский композиционный катод с ранее неисследованными эмиссионными характеристиками, изготовленный

коллективом Института физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск под руководством д.ф.-м.н., профессора А.П. Савицкого.

При изготовлении катода, руководствовались положениями, вытекающими из данных, приведённых в литературном обзоре. Была выбрана плоская конфигурация катода, когда начальная эмитирующая поверхность совпадает размерами с известной площадью плоской части катода. Согласно [72, 123], испытанные металлокерамические катоды использовали в качестве основного материала (матрицы) керамику с включением металлических частиц. В [72] установлено, что величина запаздывания тока электронной эмиссии от напряжения увеличивается с увеличением диэлектрической проницаемости применяемой керамики. Для улучшения механических свойств катода, содержание металлической фазы было существенно увеличено. В качестве материала матрицы была выбрана медь, доступный материал с хорошей теплопроводностью и согласно данным [11], имеющий достаточную эрозионную стойкость при использовании в качестве материала катода.

Таким образом, исследуемый новый композиционный катод представляет собой пористую (23,4%) медную матрицу с однородно распределёнными в объёме частицами керамики BaTiO_3 размерами 50-120 мкм. Титанат бария обладает свойствами сегнетоэлектрика, имеет диэлектрическую проницаемость $\epsilon \approx 1500$, что и обусловило его применение. Для изготовления катода порошок титаната бария смешивался с порошком меди марки ПМС-1 (90 % менее 70 мкм) при объёмном соотношении компонентов 50:50 %. Заготовки прессовались под давлением до 500 Мпа в цилиндрических пресс-формах, затем спекались в вакуумных печах марки СНВЭ. Подробно, процесс изготовления композиционного катода описан в [124]. Исходная структура рабочей поверхности катода наглядно показана (Рисунок 42) на оптической микрофотографии нетравленного металлографического шлифа.

Керамические включения серого цвета различной формы и размеров относительно равномерно распределены по более светлой медной матрице (Рисунок 42). Видны также выходящие на поверхность каналы пористой структуры. Благодаря преобладанию металлической фазы, композиционный катод, прочен, может быть легко подвержен механической обработке без предъявления специальных требований, медная матрица может использоваться для эффективного отвода тепла при высокой частоте повторения импульсов тока пучка.

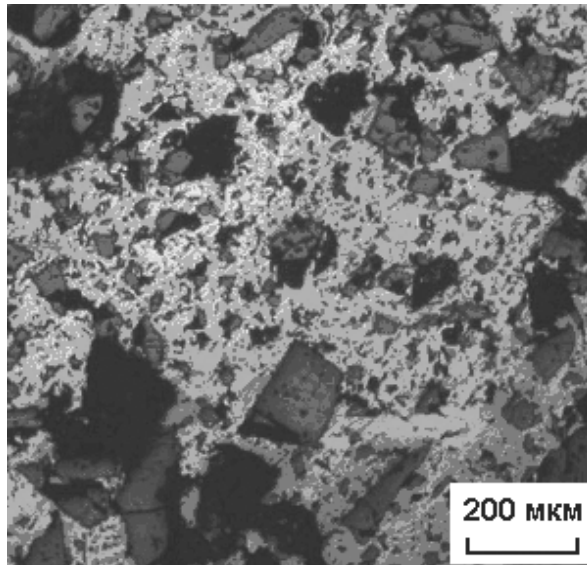


Рисунок 42. Микроструктура материала катода Cu+50 об% ВаTiO₃.

Диаметр таблетки композиционного катода выполнен одинаковым с катодами других типов и равен $D_k=40$ мм. Крепление катода аналогично осуществляется обоймой катода через медную теплоотводящую шайбу (Рисунок 41). Прочностные свойства материала катода оказались достаточны для изготовления в теле катода глухих отверстий М5 глубиной 7 мм для надёжного прижима к теплоотводящей шайбе.

3.1. Схема проведения экспериментальных исследований ВАХ вакуумного электронного диода с плоскими катодами

Схема проведения экспериментальных исследований характеристик с катодами разных типов представлена на рисунке 43. К особенностям схемы можно отнести возможность проведения испытаний без разделительной мембраны, когда функции анода выполняет поддерживающая решётка, а герметизация вакуумного объёма осуществляется корпусами ЦФ или калориметра.

Диаметры испытываемых катодов были выбраны одинаковыми, таким образом, геометрические параметры ускоряющего промежутка могут быть установлены одинаковыми для всех типов катодов.

Для проведения калориметрических исследований коллектор ЦФ заменялся коллектором калориметра.

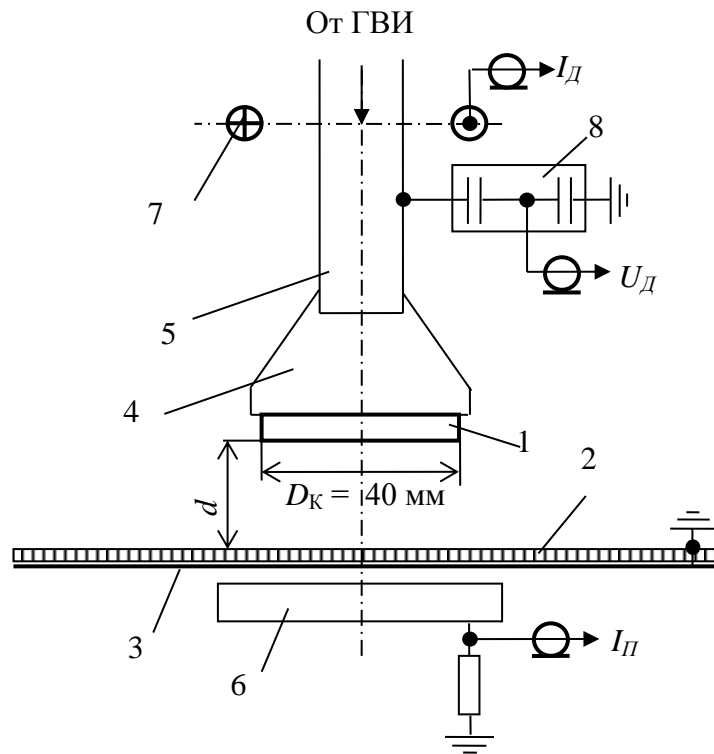


Рисунок 43. Схема проведения экспериментальных исследований характеристик диода.

1 - катод; 2 - поддерживающая решётка; 3 - фольга Ti 50 мкм; 4 - гильза катода; 5 - катододержатель; 6 - коллектор цилиндра Фарадея; 7 - пояс Роговского; 8 - ёмкостный делитель напряжения. d – размер катод-анодного зазора.

Представленная схема экспериментальных исследований (Рисунок 43) применялась для диодов с разными катодами при одинаковых параметрах схемы питания генератора. Применение при этом одного комплекта диагностического оборудования даёт основания сравнивать полученные в ходе экспериментальных исследований данные.

3.2. Исследование ВАХ вакуумного электронного диода с плоскими катодами

Катоды, использующие взрывную электронную эмиссию, в рамках данной задачи считали катодами с неограниченной эмиссионной способностью. Максимальный ток в таком катоде ограничивается объёмным зарядом и может быть описан законом Чайлда-Ленгмюра [11, 125]. Оценочный расчёт импеданса диода при ограничении тока объёмным зарядом показал возможность получения импеданса диода при конструктивных возможностях регулировки катод-анодного зазора до 500 Ом при начальном диаметре эмитирующей поверхности катода 40 мм. При этом следует учитывать, что закон степени "3/2" справедлив для зазоров с однородным распределением электрического поля и не учитывает влияние краевых эффектов. Критерием может служить отношение, содержащее апертурные параметры ускоряющего зазора [70]:

$$\frac{S}{d^2} \gg 1 \quad (12)$$

где S - площадь катода;
 d – катод-анодный зазор.

Для применяемого катода $D_k=40$ мм условие (12) можно считать выполненным при $d < 20$ мм. Учёт краевых эффектов при расчёте импеданса диода с взрывоэмиссионными катодами подробно рассмотрен в работах [113, 126, 127]. В рамках данной работы используются ВАХ и построенные по ним кривые импедансов диода с разными типами катодов, полученные по результатам экспериментальных исследований с применением описанного комплекта диагностического оборудования.

Для проведения сравнительного анализа эмиссионной способности катодов, при проведении экспериментальных исследований с одинаковым зазором $d=20$ мм (Рисунок 43) для каждого типа катода регистрировались сигналы с датчика напряжения и ЦФ (Рисунок 44), расположенного позади анодной сетки [18*]. Исследования проводились для случая с разделительной фольгой и без фольги (Рисунок 43, поз. 3).

Анализ приведённых кривых показывает, что при одинаковом зазоре $d=20$ мм и площади эмитирующей поверхности разные катоды показывают разное значение амплитуд кривых напряжения и тока электронного пучка (Рисунок 44 а, б, в). Сравнительный анализ кривых импульсов ускоряющего напряжения (Рисунок 44 г) показал, что скорость нарастания напряжения на ускоряющем промежутке для разных катодов одинаковая до момента, когда электронный ток через диод резко возрастает, причём амплитудное значение ускоряющего напряжения устанавливается для катодов через одинаковый промежуток времени с момента приложения.

Наращение электронного тока через диод происходит для катодов в разные моменты времени от момента приложения напряжения к ускоряющему промежутку. Наименьшее время запаздывания нарастания $t_{зАП}$ электронного тока в диоде при $d=20$ мм соответствует медному многоострийному катоду ($t_{зАП} \approx 25$ нс), наибольшее – композиционному катоду ($t_{зАП} \approx 70$ нс). Так как геометрические условия проведения эксперимента и выходные параметры генератора идентичные, то различие во времени запаздывания протекания тока могут быть связаны с разными условиями формирования эмитирующей плазменной поверхности катодов. Значимость учёта времени запаздывания тока в диоде также отмечалась в работе [72].

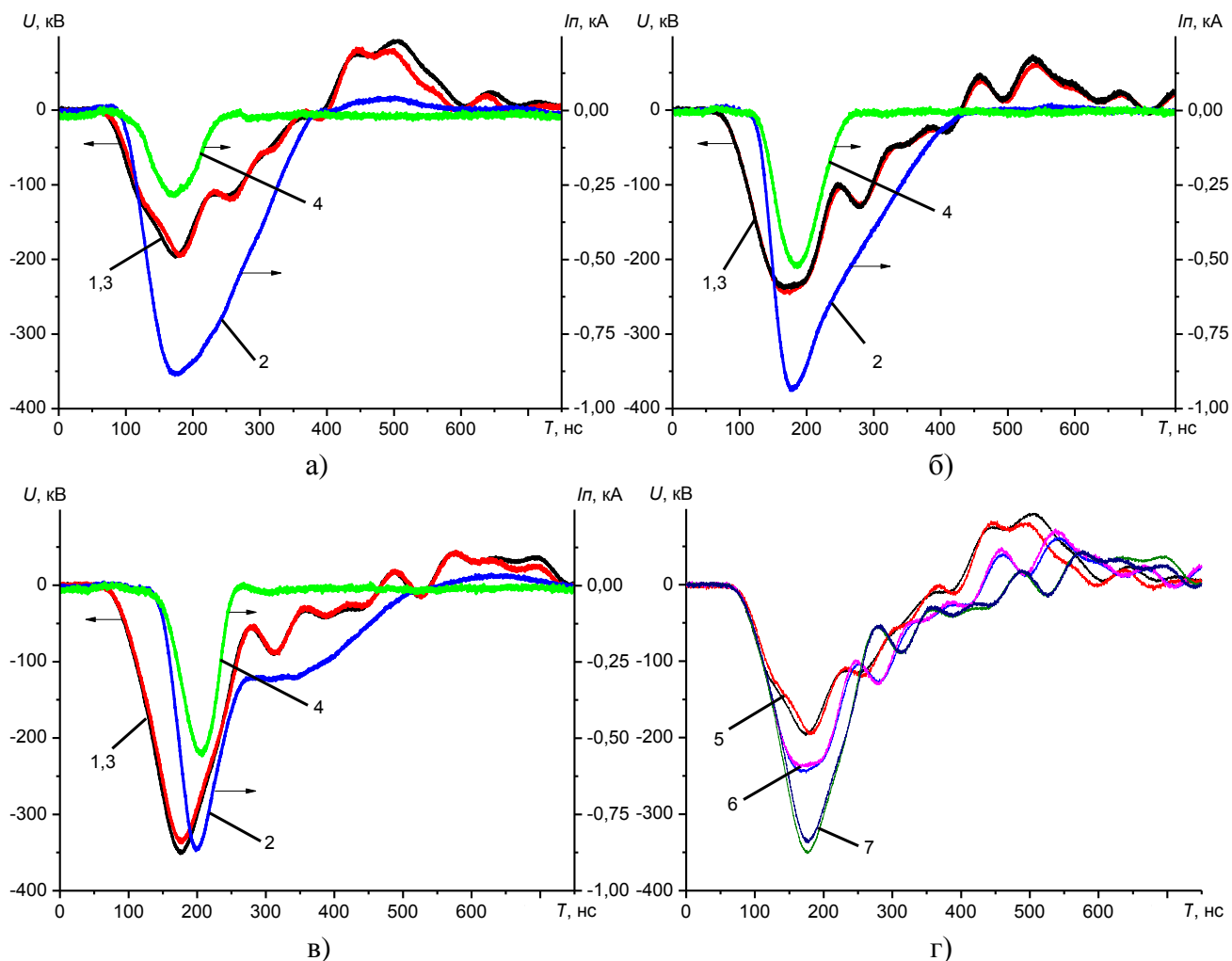


Рисунок 44. Характерные кривые ускоряющего напряжения (1,3) и электронного тока (2,4) за анодом и за анодом с разделительной фольгой (T_i 50 мкм) соответственно для многоострийного (а), плоского графитового (б), композиционного (в) катодов при $d=20$ мм. Характерные кривые ускоряющего напряжения (г) для многоострийного (5), плоского графитового (6), композиционного (7) катодов при $d=20$ мм.

Следует также отметить, что для композиционного катода существенно снизилась амплитуда импульса обратной полярности, следующего за основным, что свидетельствует об улучшении условий согласования импедансов генератора и диода. Данное обстоятельство может привести к увеличению энергии, передаваемой из генератора электронному пучку, что подтверждается оценкой баланса энергии в диоде, произведённой на основании расчётных данных по результатам исследования ВАХ и по результатам calorimetric measurements.

3.3. Определение энергии, выделяемой в вакуумном электронном диоде с плоскими катодами

Для кривых (Рисунок 44), используя выражение (10), получили кривые скорости передачи энергии, накопленной генератором, в энергию электронного пучка (Рисунок 45). Для приведённых кривых мощности по (11) оценили энергию, выделяемую в диоде. Результаты

оценки приведены в таблице 5. Полученные расчётные значения были подтверждены калориметрическими измерениями энергии, переносимой пучком электронов за анод.

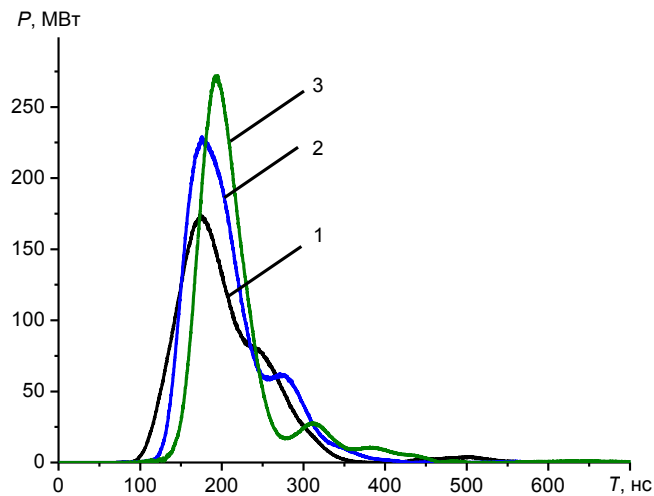


Рисунок 45. Характерные кривые мощности для диода с медным многоострийным (1), плоским графитовым (2) и плоским композиционным (3) катодами.

Таблица 5. Характеристики вакуумного электронного диода при $d=20$ мм

Тип катода/ характеристика	медный многоострийный	плоский графитовый	плоский композиционный
Амплитуда импульса ускоряющего напряжения, кВ	195	245	350
Амплитуда импульса электронного тока пучка за анодом, кА	0,88	0,88	0,86
Амплитуда импульса электронного тока пучка за анодом и фольгой, кА	0,28	0,52	0,55
Амплитуда импульса мощности, МВт	170	225	270
Энергия, переданная за 1 импульс электронным пучком за анод, Дж	18,8	21,5	19,7
Энергия, переданная за 1 импульс электронным пучком за анод и фольгу, Дж	4,0	8,4	9,5

Согласно таблице 5, применение композиционного катода в конструкции вакуумного электронного диода позволило увеличить амплитуду ускоряющего напряжения и мощности, развиваемой в диоде, по сравнению с медным многоострийным и плоским графитовым катодами. Увеличение энергии, переданной электронным пучком за анод и разделительную фольгу, связано со снижением потерь энергии в разделительной фольге при смещении энергетического спектра электронов в более высокоэнергетическую область (увеличение амплитуды ускоряющего напряжения).

Для оценки однородности распределения энергии электронного пучка по сечению получили отпечатки пучка на дозиметрической плёнке ПОР и на поверхности мишени из пенополистирола марки ПСБ-С-25 с каждым катодом за 5 импульсов тока пучка (Рисунок 46).

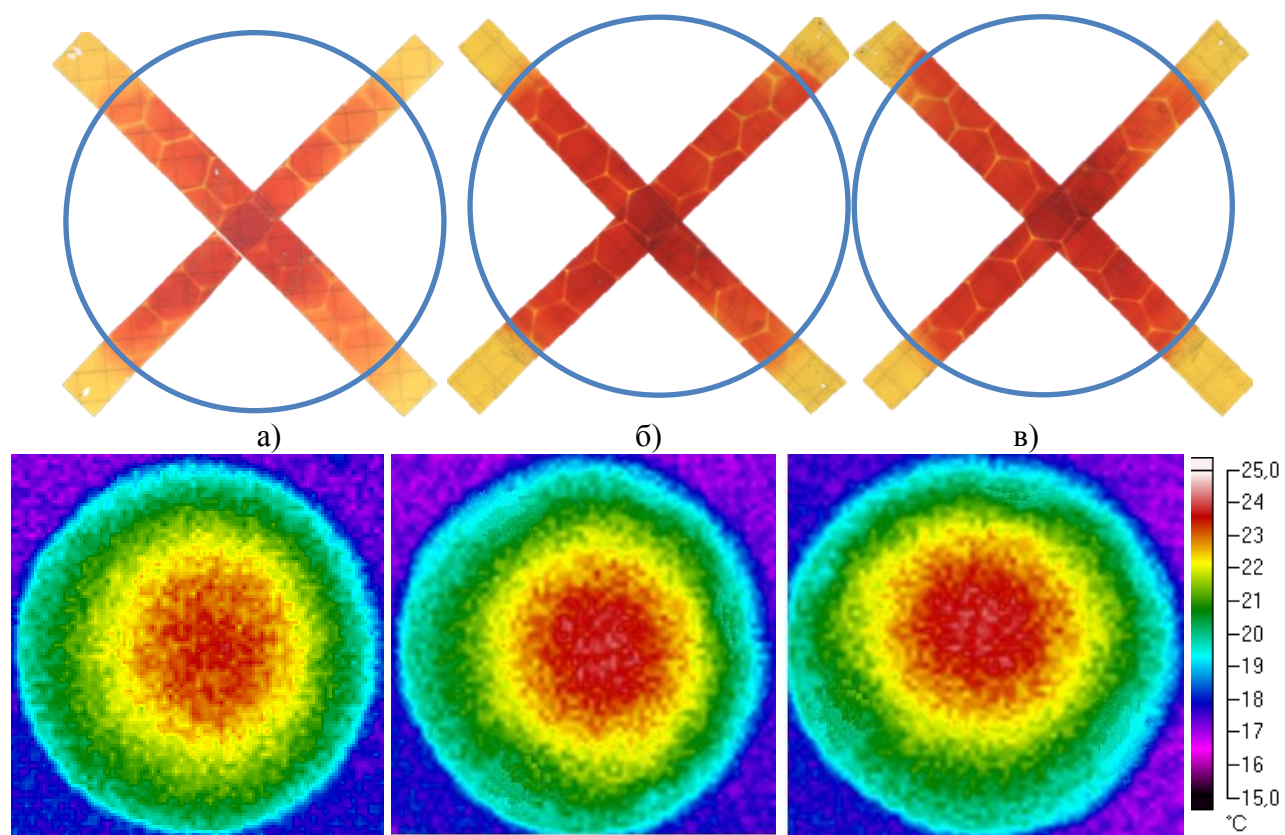


Рисунок 46. Автографы электронного пучка на дозиметрической плёнке ПОР (сверху) и на поверхности мишени из пенополистирола марки ПСБ-С-25 (снизу) для диода с медным многоострийным (а), плоским графитовым (б) и плоским композиционным (в) катодами. Окружностью выделена область выпускного окна $\varnothing 10$ см.

Анализ отпечатков позволяет предположить, что генерация электронного пучка для всех катодов происходит относительно равномерно по всей поверхности катода, что геометрически обеспечивает увеличение плотности энергии на диаметре пучка (Рисунок 46).

Для медного многоострийного и плоского композиционного катодов провели дополнительные исследования ВАХ в диапазоне регулировки величины d ускоряющего зазора. Характерные осциллограммы напряжения и полного тока диода приведены на рисунке 47.

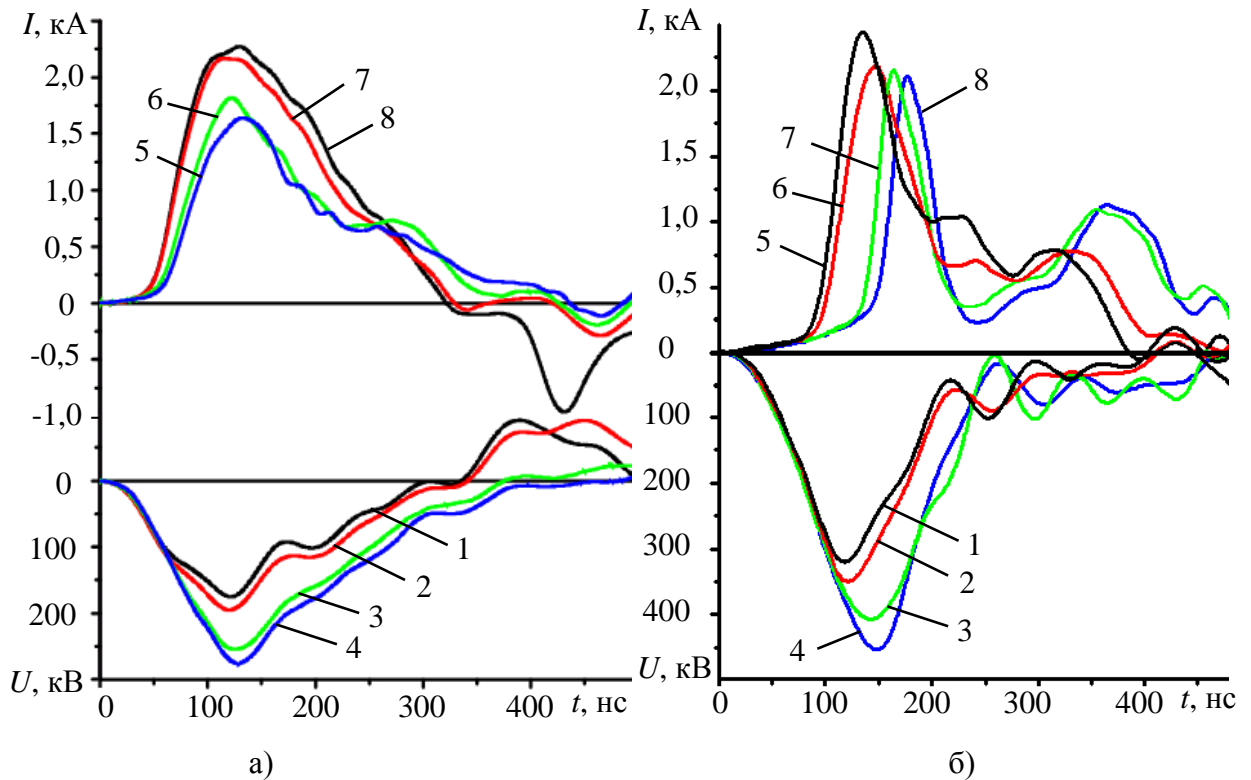


Рисунок 47. Характерные кривые напряжения (1, 2, 3, 4) и полного тока диода (5, 6, 7, 8) с медным многоострийным (а) и композиционным $\text{Cu}+50\text{BaTiO}_3$ (б) катодами при $d=16$ мм (1, 5), $d=20$ мм (2, 6), $d=34$ мм (3, 7), $d=43$ мм (4, 8).

Анализ характерных кривых напряжения и полного тока диода показывает, что для композиционного катода для приведённых значений d практически отсутствуют режимы, когда направление тока в диоде изменяется.

Исходя из данных экспериментальных исследований характеристик диода, можно заключить, что при одинаковых условиях (параметры ГВИ, геометрия ускоряющего промежутка, одинаковый комплект диагностического оборудования) применение композиционного катода привело к увеличению амплитуд импульсов ускоряющего напряжения и мощности электронного пучка по сравнению с медным многоострийным и плоским графитовым катодами. При этом следует отметить, что амплитуда импульса тока электронного пучка и энергия, переданная из генератора в диод (Таблица 5) для всех случаев практически одинакова.

3.4. Вычислительная модель вакуумного электронного диода ускорителя «АСТРА»

Принимая во внимание результаты экспериментальных исследований ВАХ и энергетических характеристик диода, было получено, что при схожих эмиссионных характеристиках исследуемых взрывоэмиссионных катодов (Таблица 5, Рисунок 46), композиционный катод обладает характеристиками, более других подходящими для инжекции электронного пучка в атмосферу. Исходя из анализа экспериментальных ВАХ диода (Рисунок

44), одной из ключевых характеристик, влияющих на генерацию электронного пучка, является эволюция импеданса диода, как нагрузки ГВИ, на протяжении импульса ускоряющего напряжения. Для исследования влияния закономерностей изменения импеданса на параметры формирования импульса ускоряющего напряжения с помощью разработанной вычислительной модели выходной цепи ГВИ [20*], необходимо представить вакуумный электронный диод ускорителя схемой замещения, с набором параметров, аналогично влияющих на режим работы модели ГВИ, как при проведении натурных исследований. При этом принимали во внимание, что индуктивность катододержателя и его ёмкость относительно вакуумной камеры были учтены при составлении схемы замещения выходной цепи генератора (Рисунок 35). Оценка значений конструктивной ёмкости и индуктивности ускоряющего промежутка для размеров, приведённых на рисунке 43, показала, что их влияние на режим работы генератора менее значений погрешности средств измерения. Таким образом, основной характеристикой диода, при составлении схемы замещения в рамках данного исследования принимаем импеданс ускоряющего промежутка диода.

3.4.1. Закономерности изменения импеданса вакуумного электронного диода

Для определения диапазона изменения импеданса вакуумного электронного диода дополнительно провели исследование ВАХ диода с катодами, показавшими наибольшее и наименьшее значение амплитуды импульса ускоряющего напряжения при одинаковом амплитудном значении электронного тока (Рисунок 2, Таблица 5). Для медного многоострийного и композиционного катодов, в соответствии со схемой эксперимента (Рисунок 43) регистрировались напряжение U_d и полный ток I_d диода [24*] при значениях d во всём диапазоне регулировки от 16 до 43 мм. На основе полученных экспериментальных данных (Рисунок 47) с применением закона Ома были построены кривые импеданса диодов [128*] с разными катодами (Рисунок 48). При этом значимым считался импеданс Z_d диода на момент действия импульса напряжения необходимой полярности.

Для приведённых на рисунке 48 кривых для медного многоострийного и композиционного катодов были определены параметры диода, приведённые в сводной таблице 5.

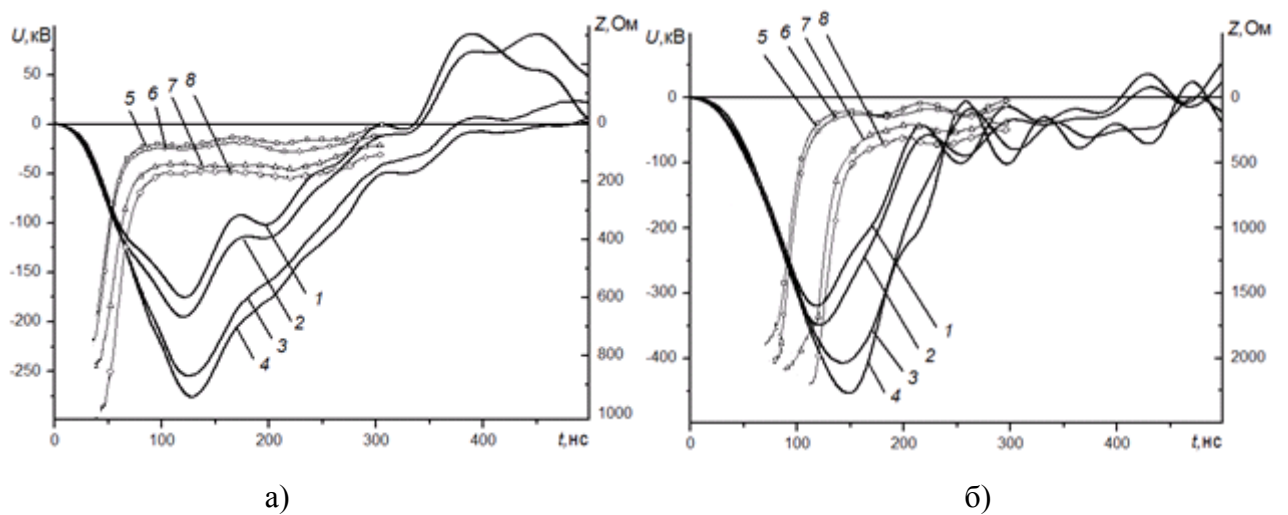


Рисунок 48. Напряжение на ускоряющем промежутке (1, 2, 3, 4) и импеданс диодов (5, 6, 7, 8) с медным многоострийным (а) и композиционным $\text{Cu}+50\text{BaTiO}_3$ (б) катодами при $d=16$ мм (1, 5), $d=20$ мм (2, 6), $d=34$ мм (3, 7), $d=43$ мм (4, 8).

Таблица 6. Характеристики электронного диода при d в диапазоне 16-43 мм.

Катод	Характеристика	Зазор d , мм			
		16	20	34	43
медный многоострийный	Амплитуда импульса ускоряющего напряжения, кВ	175	195	255	275
	Скорость нарастания напряжения на выходе генератора, 10^{12} В/с	1,8	2,1	2,7	2,9
	Напряженность поля в зазоре, 10^6 В/м	10,9	9,8	7,5	6,4
	Амплитуда импульса полного тока диода, кА	2,25	2,15	1,82	1,63
	Максимальное значение импеданса диода, Ом	655	740	825	980
	Импеданс диода при амплитудном значении полного тока диода, Ом	70	90	140	170
	Запаздывание протекания тока электронной эмиссии, нс	25-35			
плоский композиционный	Амплитуда импульса ускоряющего напряжения, кВ	320	350	410	445
	Скорость нарастания напряжения на выходе генератора, 10^{12} В/с	3,70	3,95	4,05	4,20
	Напряженность поля в зазоре, 10^6 В/м	20,0	17,5	12	10,3
	Амплитуда импульса полного тока диода, кА	2,45	2,20	2,16	2,10
	Максимальное значение импеданса диода, Ом	1880	2020	2060	2240
	Импеданс диода при амплитудном значении полного тока диода, Ом	190	240	450	500
	Запаздывание протекания тока электронной эмиссии, нс	65	70	125	135

Анализ кривых импедансов диодов (Рисунок 48 а, б) показал схожий характер изменения импеданса диода для всех представленных экспериментов, что позволило выявить ряд ключевых параметров диода, позволяющих описать изменение его импеданса во времени. Для упрощения моделирования импеданса диода, кривая изменения импеданса во времени была разделена на четыре характерных участка (Рисунок 49).

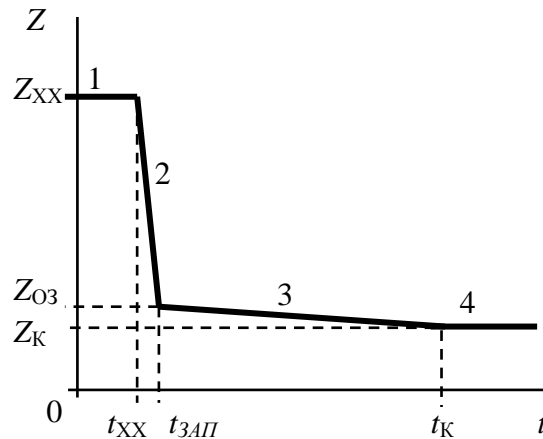


Рисунок 49. Омическая характеристика электронного диода.

Экспериментальное значение импеданса на участке 1 зависит от способа измерения и точности применяемой диагностики, ввиду близких к нулю значений измеряемого тока и выполнения операции деления для построения кривых импеданса. Для упрощения моделирования узла, импеданс вакуумного электронного диода был принят постоянным при наибольшем экспериментальном значении импеданса (Рисунок 49). Максимальное значение $Z_{XX} = 2200$ Ом было определено для композиционного катода и зазора $d = 43$ мм. Данное упрощение характеризует импеданс диода при отсутствии значимого электронного тока Z_{XX} , фактически иллюстрируя режим "холостого хода" генератора ускорителя. Минимальное значение тока диода на данном этапе позволяет минимизировать погрешность, вносимую в модель принятым упрощением.

Изменение импеданса на участке 2 (Рисунок 49) иллюстрирует существенное увеличение эмиссионного тока через электронный диод и определяется скоростью формирования сплошной плазменной поверхности с учётом максимального тока, ограниченного индуктивностью разрядного контура генератора импульсов ускоряющего напряжения. Точка $(t_{ЗАП}; Z_{O3})$ кривой на рисунке 49 соответствует моделируемому периоду формирования сплошной плазменной поверхности с площадью равной площади катода. Дальнейшее изменение импеданса вакуумного электронного диода (участок 3) может быть описано законом Чайлда-Ленгмюра [125], учитывающего скорость распространения плазмы. Длительность участка 3 ограничена временем действия импульса ускоряющего напряжения t_K . Длительность импульса

ускоряющего напряжения меньше времени, необходимого для замыкания ускоряющего промежутка распространяющейся катодной и анодной плазмой, таким образом, конечный импеданс диода представлен постоянной величиной Z_K .

На основании данных, представленных на рисунке 48, установлено, что параметры диодов с многоострийным и композиционным $\text{Cu}+50\text{BaTiO}_3$ катодами при изменении величины d от 16 мм до 43 мм принимают значения: Z_{XX} – от 650 до 2200 Ом; t_{XX} – от 30 до 80 нс; $Z_{O3} \leq 500$ Ом; $t_{3АП} \leq 135$ нс. Таким образом, вычислительная модель вакуумного электронного диода должна допускать регулировку перечисленных параметров в указанных диапазонах для воспроизведения характеристики вида, представленного на рисунке 49.

3.4.2. Вычислительная модель диода с учётом запаздывания электронной эмиссии

Вычислительная модель диода должна обеспечивать совместимость с разработанной вычислительной моделью выходной цепи ГВИ [20*], быть выполнена стандартными средствами NI Multisim, допуская при этом оперативную корректировку переменных, используемых для описания кривой изменения импеданса диода за время длительности генерируемого импульса напряжения.

Для удовлетворения описанных выше требований из стандартных элементов библиотеки программы NI Multisim была составлена электрическая схема, внешний вид которой представлен на рисунке 50 а. Элементы ГЗИ1 и ГЗИ2 являются генераторами задержанных импульсов трапецеидальной формы на основе управляемого одновибратора, основные настраиваемые параметры которых приведены в изображении контекстного меню (Рисунок 50,б). Генераторы запускаются параллельно сигналом от модели ГВИ [20*] и, в соответствии с настроенными параметрами, с заданной задержкой формируют наклонные участки (2 и 3, Рисунок 49) моделируемой кривой импеданса (Рисунок 50 в). Постоянные уровни импеданса (1 и 4, Рисунок 49) задаются суммарным значением напряжений ГЗИ для каждого участка кривой импеданса. Полученное на выходе схемы напряжение прикладывается к нелинейному резистору $U1$, сопротивление которого зависит от напряжения, приложенного к управляющей цепи с коэффициентом передачи 1 Ом/В.

Параметр "затягивание импульса" (Рисунок 50 б) устанавливается заведомо больше длительности импульса ускоряющего напряжения, нивелируя значимость параметра "время спада".

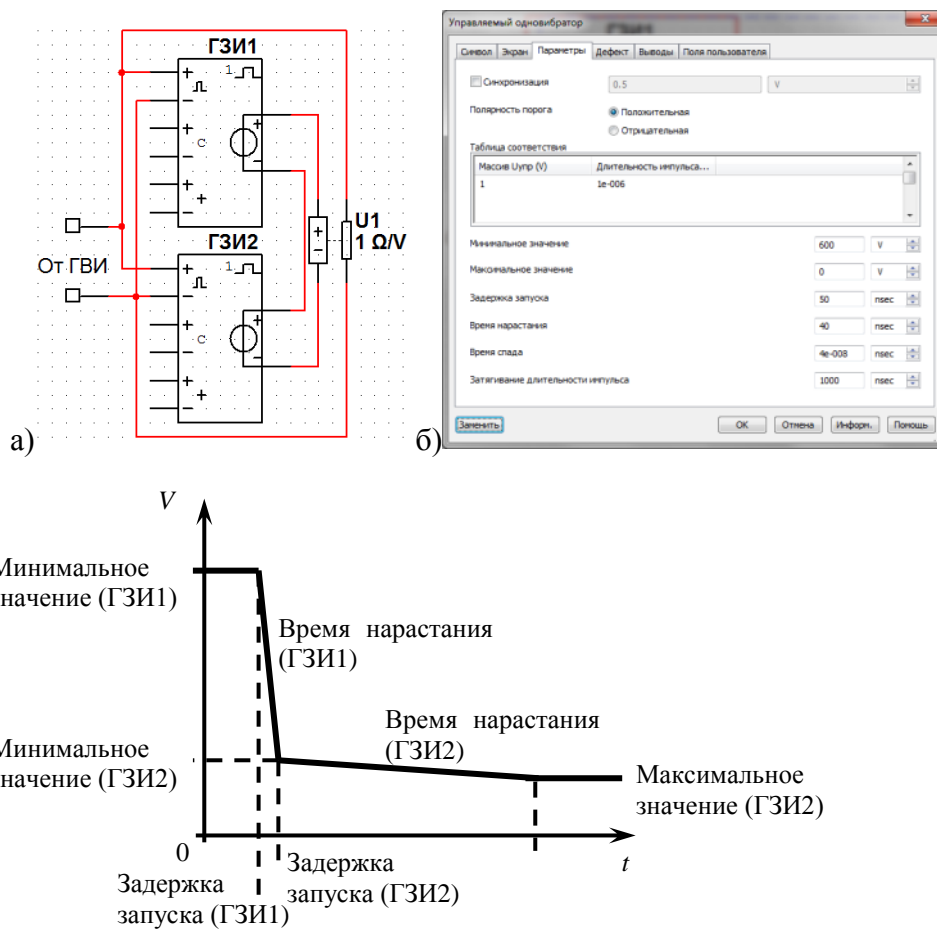


Рисунок 50. Изображение электрической цепи модели электронного диода (а) в программе NI Multisim и контекстное меню (б) настройки параметров элемента ГЗИ1, диаграмма моделирования (в) омической характеристики электронного диода.

Приведённая модель диода позволяет независимо изменять параметры вычислительной модели диода, играющей роль нагрузки ГВИ. Корректность используемой модели проверялась сравнением результатов моделирования с параметрами, полученными эмпирическим путём.

3.4.3. Оценка погрешностей, вносимых вычислительной моделью диода

Представленная на рисунке 49 аппроксимация линейными участками реальных кривых импеданса (Рисунок 48) вакуумного электронного диода содержит ряд допущений, которые упрощают построение модели вакуумного электронного диода. Применение допущений требует проведения сравнительного анализа величины погрешностей, вносимых предложенными упрощениями. Для выполнения сопоставительного исследования было произведено моделирование работы генератора импульсов ускоряющего напряжения, описанного в [20*] на описанную модель вакуумного электронного диода в программной среде моделирования электрических процессов NI Multisim.

Для сравнения были использованы результаты экспериментальных исследований характеристик вакуумного электронного диода при $d = 20$ мм с многоострийным медным и

плоским композиционным катодами (Рисунок 48). Кривые импеданса диода, полученные на основе экспериментальных данных (Рисунок 51, кривые 3 и 4) моделировались кривыми 5 и 6 при работе с вычислительной моделью ГВИ [19*].

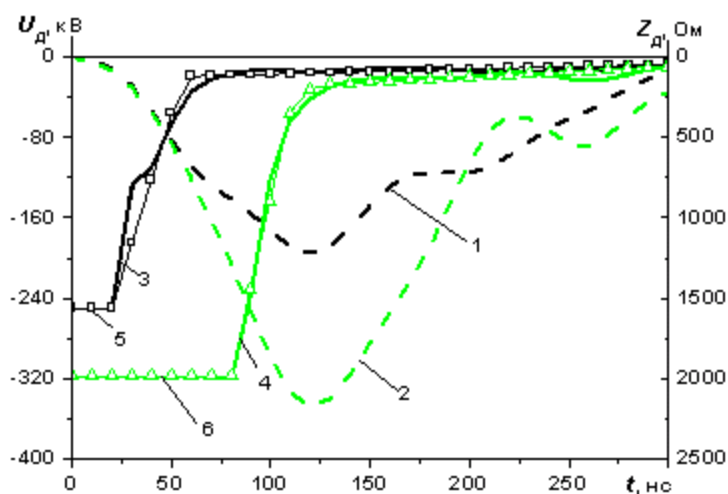


Рисунок 51. Характерные кривые импульсов ускоряющего напряжения (1, 2), а так же экспериментальные (3, 4) и моделируемые (6, 7) кривые импеданса вакуумного электронного диода с медным многоострийным катодом (1, 3, 5) и композиционного катода $\text{Cu}+50\text{BaTiO}_3$ (2, 4, 6). Диаметры катодов 40 мм, величина ускоряющего промежутка 20 мм.

Величина импеданса вакуумного электронного диода определяет баланс энергии в системе генератор-нагрузка, таким образом, в качестве критериев сравнения для определения погрешности предлагаемой модели вакуумного электронного диода были выбраны мощностные характеристики, показывающие скорость передачи энергии в нагрузку P [МВт] и её переданный объём E [Дж]. Кривые мощности (Рисунок 52) так же сравнивались для экспериментальной и моделируемой кривой импеданса диода.

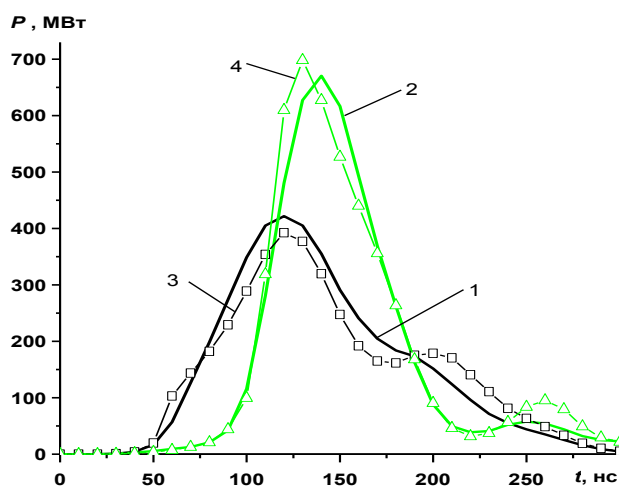


Рисунок 52. Характерные кривые мощности, полученные экспериментально (1, 2) и при моделировании (3, 4), для вакуумного электронного диода с медным многоострийным катодом (1, 3) и композиционным катодом $\text{Cu}+50\text{BaTiO}_3$ (2, 4).

Разница полученных экспериментальных и моделируемых кривых потока энергии объясняется принятыми при разработке модели упрощениями. Следует отметить, что принятие значений импеданса постоянным на участке 1 (Рисунок 49), практически не приводит к внесению погрешности ввиду малых значений регистрируемых сигналов ускоряющего напряжения и полного тока диода. Таблица 7 содержит оценку погрешности моделирования мощности ΔP , развиваемой в нагрузке ГВИ (вакуумном электронном диоде) по сравнению с экспериментальными результатами. Полученные результаты моделирования отличаются от экспериментальных на величину менее 7 %. Исходя из представленной на рисунках 51 и 52 информации, основной вклад в погрешность моделирования вносит аппроксимация процесса перехода от дискретной к сплошной эмиссионной поверхности катода линейными участками кривой импеданса (2 и 3, Рисунок 49).

Так же, для оценки погрешности, вносимой упрощениями, по соотношению (11) было вычислено интегральное значение энергии, переданной генератором в вакуумный диод (нагрузку). Результаты вычислений и оценка отклонения ΔE указаны в таблице 7.

Таблица 7. Оценка погрешности моделирования энергетических характеристик диода

Тип катода	P , МВт	P^* , МВт	ΔP , %	E , Дж	E^* , Дж	ΔE , %
медный многоострый	419	392	-6,9	43,38	42,14	-2,9
плоский композиционный Cu+50BaTiO ₃	670	698	4,0	46,68	48,10	2,9

*- величина, полученная с применением результатов моделирования.

На основании приведённых выше данных можно сделать вывод, что описанную вычислительную модель вакуумного электронного диода можно применять для определения влияния импеданса на параметры формирования импульсов ускоряющего напряжения. При этом следует учитывать, что погрешность в значении переданной в нагрузку энергии при моделировании не превышает 5 %, что сравнимо с точностью применяемого диагностического оборудования.

3.5. Моделирование работы ускорителя «АСТРА» с учётом запаздывания электронной эмиссии в вакуумном электронном диоде

Для проведения моделирования работы ускорителя, вычислительная модель выходной цепи ГВИ использовалась для моделирования импульса напряжения на вычислительной модели вакуумного электронного диода с настраиваемыми параметрами. В процессе моделирования получены более 500 кривых напряжения и тока электронного диода, на основании обработки которых производился анализ режима работы ускорителя, выбранные опорные точки

подтверждались экспериментальными результатами. Параметры моделирования ГВИ оставались неизменными для всех моделируемых экспериментов. Параметры моделирования электронного диода (Z_{XX} , t_{XX} , Z_{O3} , $t_{3АП}$) изменялись в диапазонах, определённых ранее и соответствующих характеристикам применяемых катодов. Максимальное время запаздывания протекания тока 205 нс ограничивалось длительностью полупериода свободных колебаний разрядного контура генератора.

3.5.1. Эффективность передачи энергии, накопленной генератором, в вакуумный электронный диод

Первичный анализ всего массива полученных результатов проводился с целью оценки эффективности передачи энергии из ГВИ в вакуумный электронный диод (нагрузку) $\eta_{пв}$, определяемой как (13):

$$\eta_{пв} = \frac{E_{пв}}{E_{пн}}, \quad (13)$$

где $E_{пв}$ – энергия, переносимая пучком электронов за время действия импульса ускоряющего напряжения, определяемая по (10) и (11);

$E_{пн}$ – энергия, запасённая в первичном накопителе энергии, в данном случае в ёмкости $C_{ВВ}$ (Рисунок 36).

Для определения $E_{пв}$ в выражении (13) в расчёт принимались только импульсы мощности, соответствующие отрицательной полярности напряжения на конструктивном катоде. Зависимости найденных значений $\eta_{пв}$ во всём диапазоне параметров моделирования приведены на рисунке 53.

Анализ формы кривых на рисунке 53а позволяет выделить два характерных участка приведённых зависимостей. Так, на участке 2 изменение эффективности происходит в пределах 5%, в то время как на участке 1 разброс значений составляет 21%. Данное обстоятельство может быть объяснено глубиной рассогласования импедансов генератора и диода до достижения диодом импеданса $R_{КР}$ (9), когда выполняется условие генерации униполярного импульса ускоряющего напряжения. Кроме того, при этих значениях достигаются большие значения $\eta_{пв}$.

Поведение кривых на рисунке 53б также носит сложный характер. Следует отметить, что $\eta_{пв}$ возрастает до момента достижения $t_{3АП} = 125$ нс, что фактически соответствует моменту максимума напряжения, развиваемого на диоде (Рисунок 48). Следует отметить, что наибольшее значение мощности, развиваемой в диоде, достигается при значениях параметра $t_{3АП}$ близком к значению 125 нс (53в), что является следствием передачи накопленного в $C_{ВВ}$

заряда за более короткое время и при более высоких значениях напряжения, приложенного к диоду.

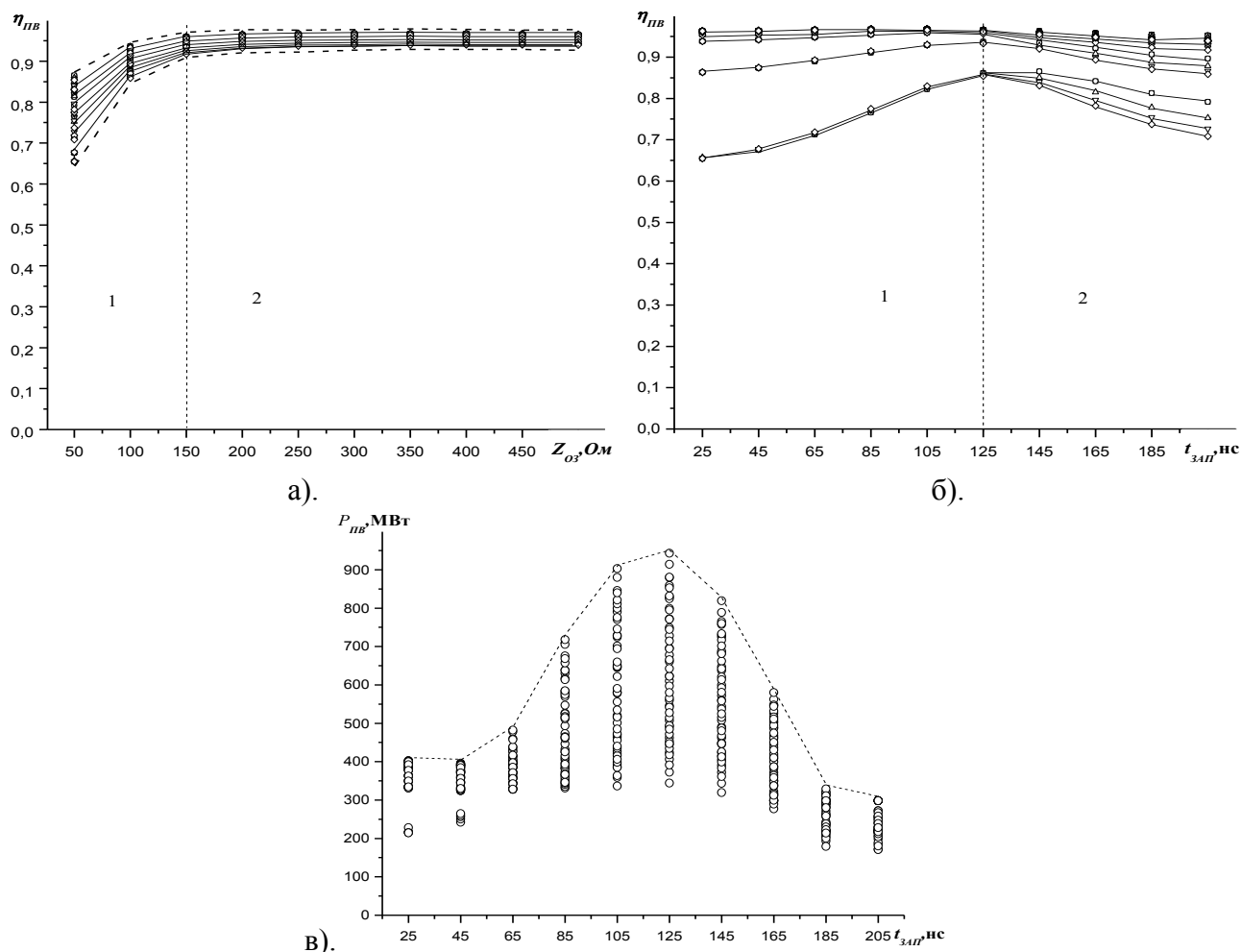


Рисунок 53. Зависимость эффективности генерации электронного пучка в вакууме от импеданса электронного диода (а), запаздывания тока эмиссии (б), развиваемой в диоде мощности (в) для диапазона моделируемых параметров.

Исходя из описанного выше, можно заключить, что эффективность передачи накопленной в генераторе энергии в диод определяется, прежде всего, соотношением величин Z_{O3} и $t_{зап}$ и максимальных значений достигают при $t_{зап} \approx 125$ нс и $Z_{O3} \geq R_{кр}$. Таким образом, для дальнейшего анализа результатов, целесообразно принять минимальным значение импеданса диода в момент формирования сплошной плазменной эмиссионной поверхности $Z_{O3} \geq 200$ Ом. Это обеспечит формирование импульса ускоряющего напряжения в режиме близком к аperiодической форме разряда ёмкостного накопителя и, как следствие, высокую эффективность передачи энергии из ёмкостного накопителя ГВИ в нагрузку (вакуумный электронный диод).

Для наглядного представления результатов моделирования в графическом виде выделялись семейства кривых, объединённых по одному параметру. Для упрощения

представления информации всё семейство кривых представлялось несколькими характерными кривыми, две из которых соответствуют границам анализируемого диапазона параметра группировки.

3.5.2. Зависимость амплитуды импульса напряжения от времени запаздывания тока в нагрузке генератора

Построение кривых зависимости амплитуды импульса напряжения от времени запаздывания тока в диоде (Рисунок 54а) выявило характерное уменьшение зависимости амплитуды импульсов напряжения от импеданса нагрузки. Более подробный анализ кривых зависимостей (Рисунок 54б) показал, что для величин запаздывания $t_{3АП} > 125$ нс, изменение амплитуды импульса напряжения составляет менее 5%, а при $t_{3ап} > 145$ нс сохраняется максимальным во всём диапазоне моделируемых параметров. Учёт данного обстоятельства позволит повысить стабильность параметров генерируемого электронного пучка при изменениях импеданса вакуумного электронного диода на протяжении всего цикла жизни применяемого катода.

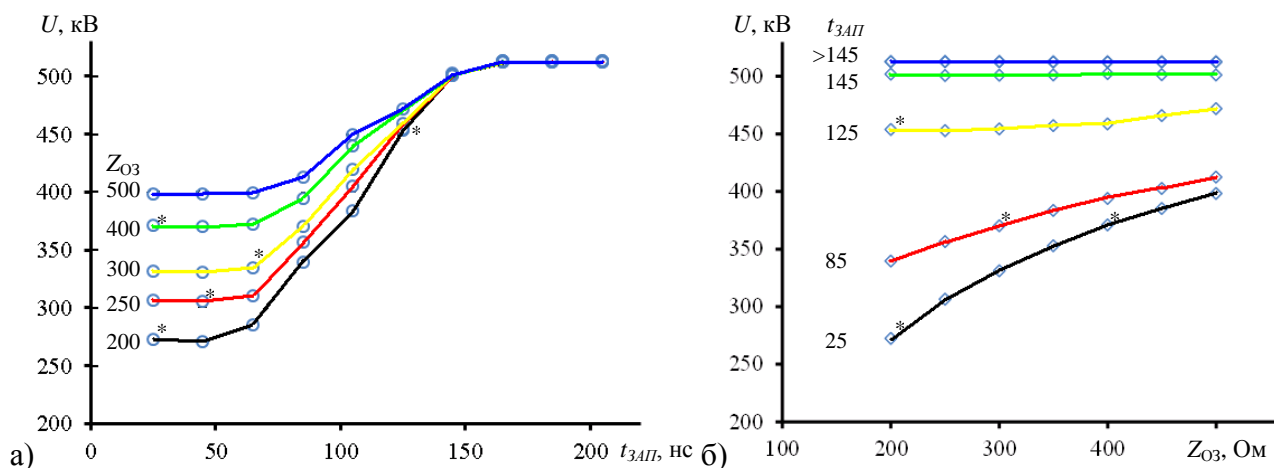


Рисунок 54. Кривые зависимостей амплитуды импульса напряжения от времени запаздывания тока в диоде (а) и импеданса диода при ограничении тока объёмным зарядом (б). Символом "*" обозначены опорные точки, подтверждённые экспериментально. Слева от кривых цифрами указано значение Z_{O3} [Ом] для (а) и $t_{3АП}$ [нс] для (б).

Анализ характера кривых, представленных на Рисунке 2, позволяет также заключить, что в диапазоне моделируемых параметров, максимальные значения амплитуды импульсов напряжения превышают значения, достижимые только увеличением импеданса диода и могут быть достигнуты только при увеличении времени запаздывания $t_{3АП}$ тока в диоде. Указанная особенность, при наличии способов изменения запаздывания протекания тока в диоде, позволит регулировать амплитуду импульса ускоряющего напряжения в диапазоне, превышающем возможности регулирования с помощью изменения импеданса диода (нагрузки).

3.5.3. Зависимость мощности, развиваемой в диоде, от времени запаздывания тока

Работа модели генератора без запаздывания тока в нагрузке подробно рассмотрена в [20*]. Длительность импульса мощности при этом совпадает с длительностью импульса напряжения, генерируемого на нагрузке. При возникновении запаздывания тока в нагрузке генератора, длительность импульса мощности становится меньше длительности импульса ускоряющего напряжения (Рисунки 51, 52). Максимальное значение амплитуды импульса мощности в данном исследовании соответствует времени запаздывания тока в диоде $t_{\text{зап}}=125$ нс (Рисунки 53 в, 55 а). Смещение от $t_{\text{зап}}=125$ нс в сторону уменьшения или увеличения времени приводит к несимметричному уменьшению амплитуды развиваемой мощности. Данное явление может быть объяснено увеличением потерь энергии в активных элементах электрической схемы генератора при увеличении времени запаздывания протекания тока в диоде. В то же время, амплитуда импульса мощности имеет обратно пропорциональную зависимость от импеданса диода при ограничении тока объёмным зарядом (Рисунок 55б), что объясняется увеличением постоянной времени разряда выходной цепи генератора.

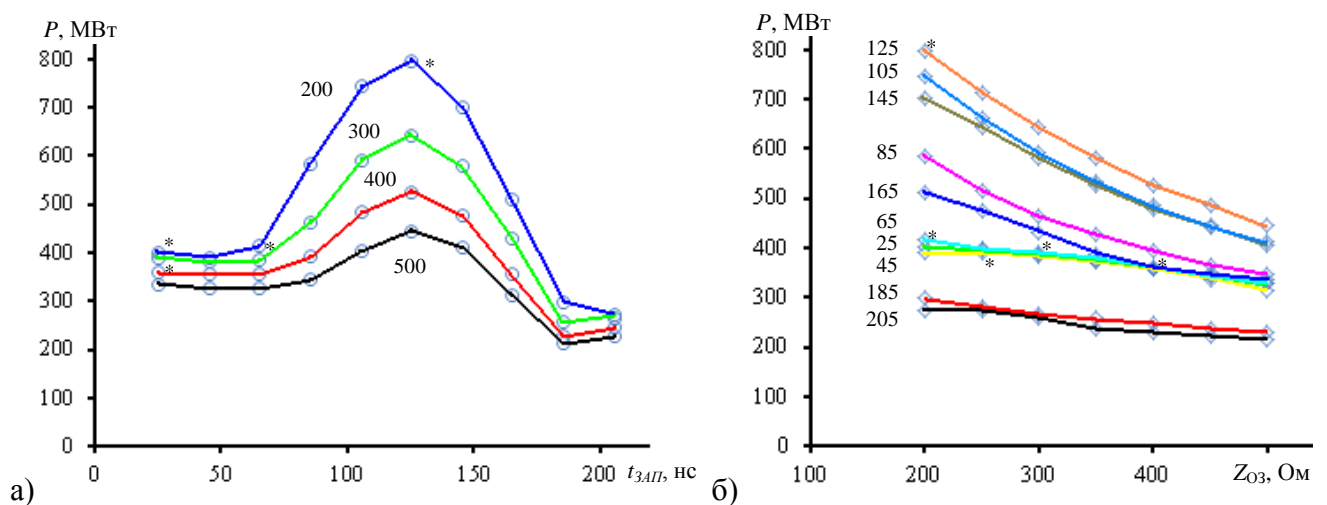


Рисунок 55. Кривые зависимостей амплитуды импульса мощности, развиваемой в диоде, от времени запаздывания тока в диоде (а) и импеданса диода при ограничении тока объёмным зарядом (б). Символом "*" обозначены опорные точки, подтверждённые экспериментально.

Слева от кривых цифрами указано значение Z_{O3} [Ом] для (а) и $t_{\text{зап}}$ [нс] для (б).

Анализ кривых, приведённых на рисунках 54 и 55, показал, что изменением времени запаздывания тока в диоде $t_{\text{зап}}$ и импеданса диода при ограничении тока объёмным зарядом Z_{O3} можно в широких пределах регулировать значение амплитуды импульса ускоряющего напряжения и развиваемой в диоде мощности. Следует отметить, что максимальная кратность регулирования (по напряжению 1,9; по мощности 2,9) достигается изменением $t_{\text{зап}}$ при $Z_{O3}=200$ Ом.

Из полученных зависимостей также следует, что при настройке вакуумного электронного диода ускорителя для выпуска импульсного электронного пучка в атмосферу требуется обеспечить запаздывание тока в диоде в пределах 125-150 нс. При этом достигаются амплитудные значения ускоряющего напряжения и мощности близкие к максимальным. Немаловажно, что в указанном диапазоне $t_{\text{зап}}$ разброс значений U не превышает 5% для всего диапазона исследуемых значений $Z_{\text{ОЗ}}$. Следует отметить, что выбранный диапазон $Z_{\text{ОЗ}}$ соответствует аperiodического режиму разряда генератора высоковольтных импульсов ускорителя, что обеспечивает высокую эффективность передачи накопленной энергии в диод.

Выводы

Применяемая конструкция вакуумного электронного диода и комплект диагностического оборудования позволяют создать близкие условия для сравнительного исследования ВАХ диода с плоскими катодами равного диаметра, но разного типа. Было установлено, что при одинаковых геометрических условиях испытаний (катод-анодный зазор 20 мм), применение плоского композиционного катода обеспечивает большее амплитудное значение импульса ускоряющего напряжения (350 кВ) и импульса мощности (270 МВт), чем медный многоострый (195 кВ, 170 МВт) и плоский графитовый (245 кВ, 225 МВт) катоды соответственно. Данное условие приводит к существенному увеличению энергии (более чем в 2 раза), которую электронный пучок способен перенести за анод и разделительную фольгу (Ti 50 мкм) выпускного окна. Сравнительный анализ ВАХ диода для указанных катодов показал, что при $d = 20$ мм диод обеспечивает наибольшее запаздывание тока электронной эмиссии около 70 нс от момента приложения импульса ускоряющего напряжения, при наименьшем времени запаздывания тока 25 нс, например для медного многоострийного катода. Принадлежность минимальных и максимальных значений указанным катодам была также установлена и для ряда значений d во всём диапазоне возможностей регулировки катод-анодного зазора от 16 до 43 мм. Были получены и проанализированы ВАХ медного многоострийного и плоского композиционного катодов для определения диапазонов параметров (напряжение, ток, запаздывание эмиссионного тока) вакуумного электронного диода, которые могут быть достигнуты экспериментально. При этом было получено, что для композиционного катода скорость нарастания напряжения в зависимости от зазора изменяется в диапазоне $3,7-4,2 \times 10^{12}$ В/с, а напряжённость поля в зазоре 10-20 МВ/м.

Анализ кривых импеданса вакуумного диода позволил установить характерную зависимость изменения импеданса вакуумного электронного диода за время импульса напряжения, приложенного к диоду. С целью исследования влияния характеристик вакуумного электронного диода на параметры импульса ускоряющего напряжения было проведено

моделирование работы предложенной ранее вычислительной модели ГВИ на вычислительную модель вакуумного электронного диода. Модель диода позволяет регулировать амплитудно-временные характеристики импеданса в диапазоне значений, найденных для диода по результатам экспериментальных исследований. Оценка достоверности результатов моделирования показала, что разница между экспериментальными значениями энергии переданной из ГВИ в вакуумный электронный диод и значениями, полученными по результатам моделирования, не превышает 5%.

Предложенная вычислительная модель ускорителя позволила построить ВАХ диода для всего экспериментально установленного диапазона параметров, описывающих характерную кривую изменения импеданса вакуумного электронного диода за длительность импульса напряжения. Анализ результатов моделирования позволил установить, что наибольшая эффективность передачи накопленной в генераторе энергии в нагрузку (вакуумный электронный диод) происходит при величине запаздывания тока в нагрузке порядка 125 нс и импедансе диода более 200 Ом, обеспечивающего аperiodическую форму разряда высоковольтного ёмкостного накопителя.

Последующий анализ смоделированных ВАХ позволил установить основные зависимости амплитуды генерируемого импульса напряжения и мощности в диоде от времени запаздывания тока относительно начала приложения напряжения. Увеличение времени запаздывания тока приводит к снижению влияния импеданса диода на амплитуду генерируемого импульса напряжения, при запаздывании свыше 125 нс, изменение амплитуды напряжения не превышает 5% для всего диапазона импедансов диода (200–500 Ом). При этом максимальные значения амплитуды импульса напряжения достигаются только при запаздывании тока в нагрузке свыше 145 нс при любом значении импеданса диода в диапазоне от 200 Ом до 500 Ом. Так же установлено, что амплитуда импульса мощности снижается при увеличении импеданса диода, при этом максимальное значение амплитуды импульса мощности получено для запаздывания тока 125 нс в нагрузке с импедансом 200 Ом.

Исходя из приведённой выше информации, можно заключить, что в рамках данного исследования, для достижения оптимальных параметров формирования импульсов ускоряющего напряжения, необходимо, чтобы запаздывание тока электронной эмиссии составляло 125 нс в вакуумном электронном диоде с минимальным импедансом, обеспечивающем аperiodическую форму разряда высоковольтного ёмкостного накопителя при заданной величине энергозапаса в первичном ёмкостном накопителе 50 Дж.

Глава 4. Частотный импульсный ускоритель электронов на основе диода с учётом запаздывания электронной эмиссии

Применение ускорителей электронов для реализации радиационных технологий [1, 2, 3, 4] зачастую требует от источника электронных пучков увеличения частоты повторения генерируемых импульсов для обеспечения требуемой производительности. Закономерности, полученные при исследовании влияния характеристик диода на формирование импульса ускоряющего напряжения (глава 3), использовались при настройке вакуумного электронного диода описанной конструкции (Рисунок 41) и подготовке его к испытаниям с увеличением частоты повторения импульсов пучка. Для испытаний использовался композиционный катод, который при $d=34$ мм обеспечивал импеданс диода более 200 Ом и запаздывание тока электронной эмиссии 125 нс (Рисунок 48). Данная глава посвящена изучению особенностей генерации импульсного электронного пучка с высокой частотой повторения импульсов и его инжекции в атмосферу. Рассмотрены конструктивные и принципиальные особенности конструкции ускорителя, ограничивающие максимальную частоту повторения импульсов тока пучка. Приведены результаты практического использования частотного режима генерации электронного для обеззараживания водного раствора в водовоздушном потоке.

4.1. Генерация электронного пучка в частотном режиме

Максимальная частота повторения импульсов электронного пучка определяется частотными возможностями каждого функционального узла или системы ускорителя. Для определения максимальной частоты требуется рассмотреть характеристики каждой из них в отдельности и при совместной работе. Максимальная частота повторения импульсов, которую может обеспечить первичный источник электропитания ГВИ, составляет 100 имп./с. Основным элементом ГВИ, определяющим частотные возможности генератора, является высоковольтный коммутатор, который согласно литературным данным был испытан при частоте следования до 100 имп./с [129]. Таким образом, для определения максимальной частоты генерации импульсов электронного пучка требуется проведение испытаний вакуумного электронного диода (Рисунок 41).

Исходя из конструктивных особенностей высоковольтного изолятора, критическое значение имеет давление остаточной атмосферы для обеспечения электрической прочности изоляционных промежутков, которое принималось равным 10^{-3} торр. Требуемое разрежение в вакуумном объёме создавалось с помощью откачного поста, основанного на паромасляном диффузионном насосе НВД-250 со скоростью откачки по азоту 2350 л/с.

При проведении частотных испытаний генерации электронного пучка разделительная фольга выпускного окна заменялась глухим фланцем из нержавеющей стали, установленным на

место поддерживающей решётки (Рисунок 41). Конструкция фланца предусматривала каналы для протока охлаждающей жидкости. Расход воды на охлаждение узла выпускного окна составлял 5 л/мин. Катод охлаждался при циркуляции масла (2 л/мин) в полом катододержателе (Рисунок 41 поз. 2). Частота следования импульсов повышалась ступенчато, с шагом 10 имп/с, время работы на каждой ступени не менее 10^4 импульсов тока пучка при непрерывном контроле остаточного давления в вакуумной камере диода по показаниям вакуумметра ВИТ-2.

По результатам испытаний установлено, что стабильная генерация пучка электронов в вакууме наблюдается при частоте повторения 50 имп./с при установившемся давлении остаточной атмосферы 5×10^{-4} торр. При частоте следования 60 имп/с остаточное давление в камере вакуумного диода за $1,3 \times 10^3$ импульсов тока пучка превысило значение 1×10^{-3} торр. При частоте повторения 50 имп./с был проведён статистический анализ стабильности амплитуды ускоряющего напряжения (Рисунок 56). Данные анализа показали, что среднее напряжение, развиваемое на диоде составляет $U_{VCK} = 371 \pm 2,7\%$ кВ. Кроме того, для 98% импульсов $U_{VCK} > 360$ кВ.

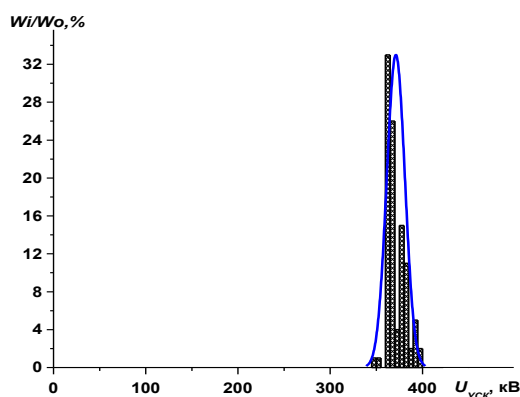


Рисунок 56. Гистограмма ускоряющего напряжения на диоде с композиционным катодом. W – количество импульсов. Аппроксимация гистограммы законом Гаусса

Таким образом, экспериментально установили, что при скорости откачки 2350 л/с максимальная частота следования импульсов электронного пучка при генерации пучка в вакууме составляет 50 имп./с при возможности кратковременного увеличения частоты до 60 имп./с.

4.2. Инжекция электронного пучка в атмосферу в частотном режиме

Для проведения экспериментальных исследований генерации и выпуска пучка электронов в атмосферу разделительная фольга выпускного окна охлаждалась потоком (5 л/мин) водопроводной воды (Рисунок 57). Порядок проведения эксперимента был аналогичен эксперименту при частотной генерации электронного пучка в вакууме.

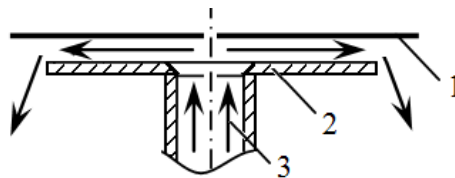


Рисунок 57. Схема охлаждения разделительной фольги выпускного окна с поддерживающей решеткой: 1 - разделительная фольга Ti 50 мкм; 2 - патрубок подачи; 3 - водопроводная вода. Стрелками показаны направления движения охлаждающей жидкости.

Инжекция электронного пучка в атмосферу уже с частотой 30 имп./с привела к разрушению поддерживающей решётки выходного окна и разделительной фольги. Механизм разрушения поддерживающей решётки предположительно основан на её перегреве в условиях недостаточного охлаждения (Рисунок 58). Регистрация теплового изображения выпускного окна после 10^3 импульсов тока пучка показала, что температура центральной области выпускного окна и охлаждаемого опорного фланца выравнивается спустя 3 мин. после прекращения действия пучка. Деформация решётки под действием силы давления атмосферы на фольгу приводила к локальному сокращению величины ускоряющего промежутка (до 5 мм от плоскости решётки при катод-анодном зазоре 34 мм) и искажению электрического поля в нем, возрастанию плотности тока на данном участке (Рисунок 59). При равномерном распределении энергии по сечению максимальная плотность тока электронного пучка достигает значений 11-15 А/см².

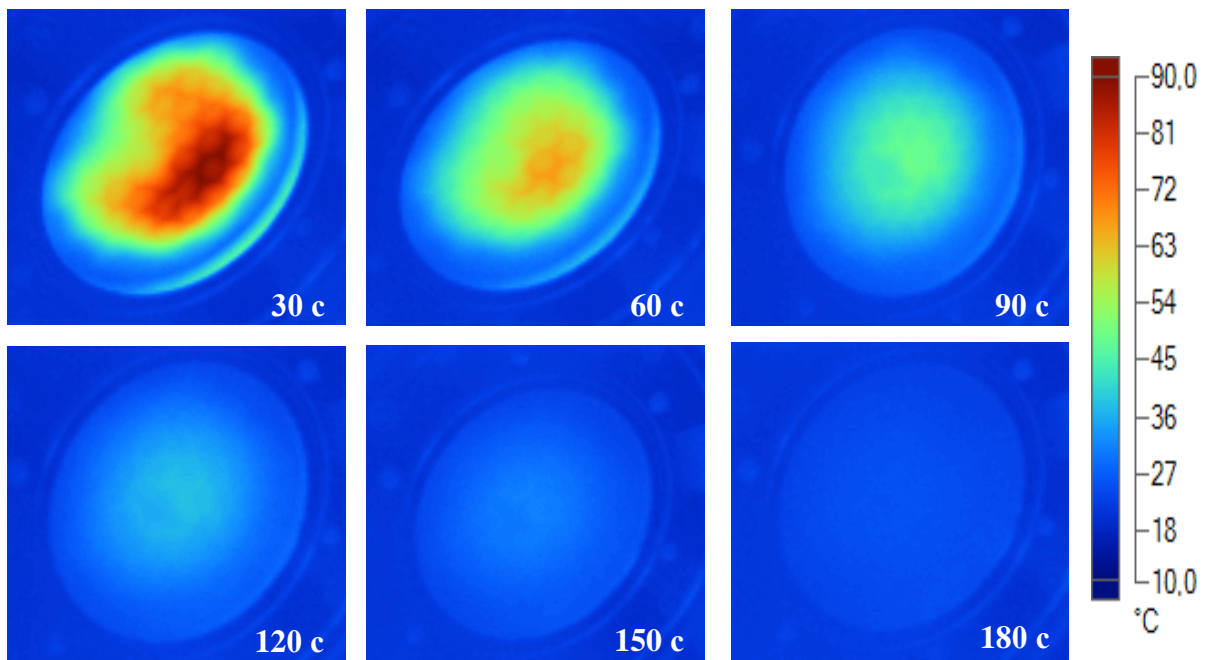


Рисунок 58. Тепловое изображение выпускного окна ускорителя после 10^3 импульсов пучка при 10 имп./с и охлаждении фольги протоком воды.

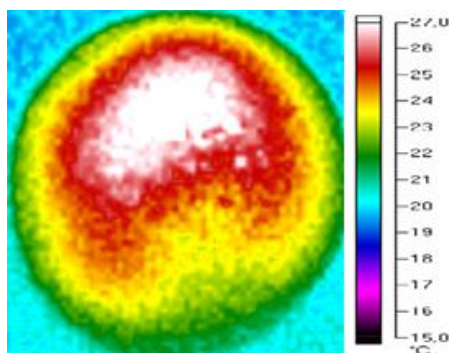


Рисунок 59. Тепловой отпечаток электронного пучка на поверхности пенополистироловой мишени при локальной деформации поддерживающей решётки выпускного окна.

Далее, рассматривались два варианта развития процесса разрушения выпускного окна.

Согласно первому варианту, в области локального перенапряжения электрического поля развивался дуговой разряд, что приводило к оплавлению поддерживающей решётки и прогоранию фольги. Согласно второму, локально перегревалась и оплавлялась разделительная фольга, герметичность выходного окна нарушалась. Снижение электрической прочности ускоряющего промежутка при прорыве атмосферы приводило к возникновению дугового разряда.

4.2.1. Выпускное окно без поддерживающей решётки

Исходя из невозможности улучшения условий охлаждения поддерживающей решётки без уменьшения оптической прозрачности окна и опираясь на известные конструкции выпускных окон [67, 130], была разработана конструкция выпускного окна с самоподдерживающейся разделительной фольгой [21*, 22*]. Устройство выпускного окна схематично приведено на рисунке 60. Титановая фольга 3 толщиной 50 мкм фиксировалась по периметру и натягивалась при вакуумировании объёма диода, при этом провес фольги по оси окна составил 2,2 мм. Диаметр области инжекции электронного пучка составил 70 мм.

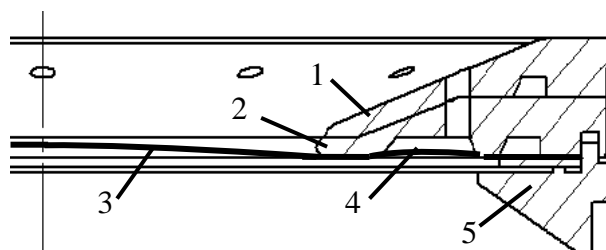


Рисунок 60. Конструкция выпускного окна без поддерживающей решётки. 1 – опорный фланец, 2 – теплоотвод, 3 – Фольга Ti 50 мкм, 4 – натяжной паз, 5 – прижимной фланец

Медный теплоотвод 2 (Рисунок 60) содержит каналы для циркуляции охлаждающей жидкости и позволяет отводить тепло от периферийных областей разделительной фольги и

опорного фланца выпускного окна, расположенных в непосредственной близости от области генерации и инжекции электронного пучка.

Исследование теплового отпечатка электронного пучка на поверхности пенопластовой мишени при инжекции с помощью выпускного окна без поддерживающей решётки, показало увеличение однородности распределения энергии пучка по сечению (Рисунок 61), по сравнению с выпускным окном с поддерживающей решёткой [23*]. Кроме того, отпечаток пучка на дозиметрической плёнке подтвердил отсутствие областей, затенённых рёбрами поддерживающей решётки (Рисунок 61), что является безусловным преимуществом при практическом использовании ускорителя.

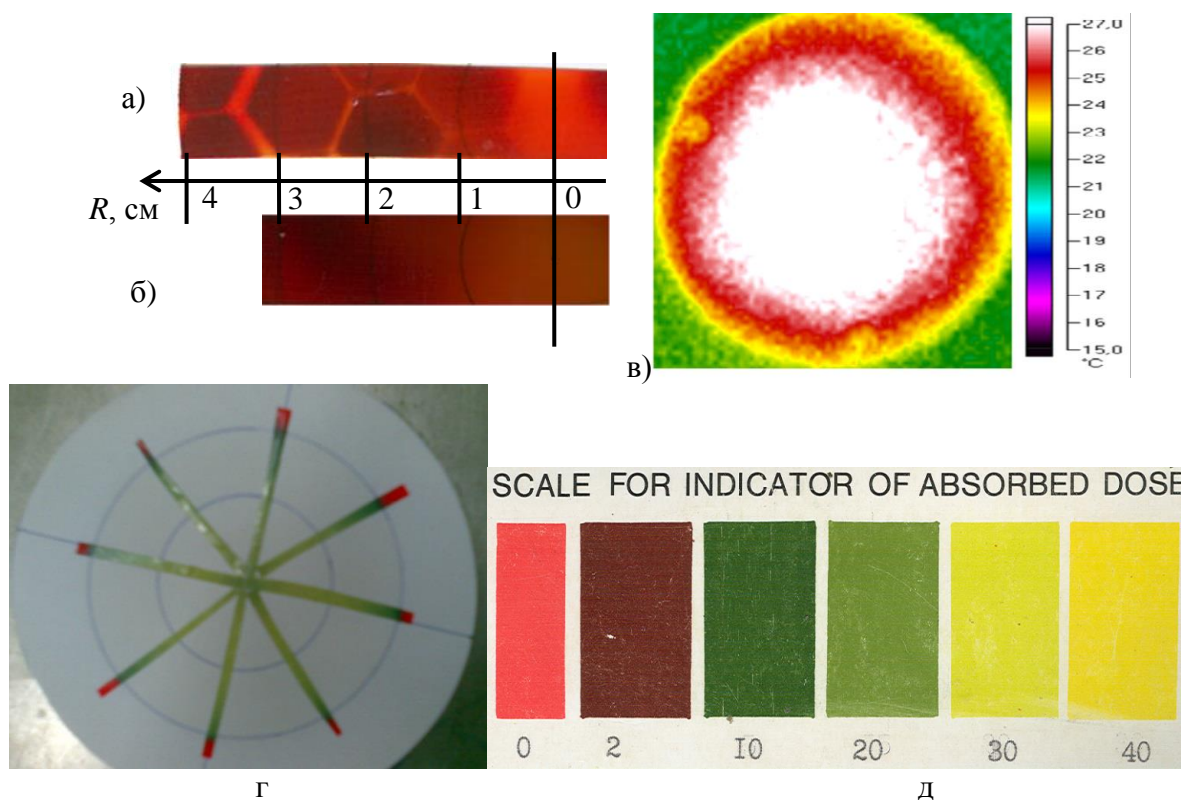


Рисунок 61. Отпечаток электронного пучка после 5 импульсов на дозиметрической плёнке ПОР с выпускным окном с поддерживающей решёткой (а) и окном без поддерживающей решётки (б). Отпечаток электронного пучка, инжестированного через выпускное окно с самоподдерживающейся фольгой на мишени (в) из пенополистирола (тепловой), на ЦВИД (г). Шкала доз ЦВИД в кГр (д).

Таким образом, приведённая конструкция выпускного окна лишена недостатков, связанных с наличием поддерживающей решётки, что позволяет предполагать более высокую стойкость окна при частотной инжекции электронного пучка. Оценка распределения поглощённой дозы по сечению при инжекции электронного пучка в атмосферу при этом показала достаточно высокую однородность на диаметре выпускного окна ускорителя при значении поглощённой дозы порядка 4 кГр за один импульс.

4.2.2. Выпуск электронного пучка в частотном режиме при охлаждении выпускного окна водовоздушным потоком

Наличие прогиба разделительной фольги по оси выпускного окна потребовало изменения способа охлаждения фольги. Была реализована концепция, в которой фольга выпускного окна охлаждалась потоком водовоздушной смеси (Рисунок 57), формируемой форсункой с коэффициентом эжекции 10. Данный подход позволил обеспечить расход охлаждающей среды ($\sim 4,5 \text{ м}^3$ в час), достаточный для исключения застойных газовых областей в верхней точке стрелы прогиба фольги (Рисунок 60).

Испытания проводились при охлаждении фольги выпускного окна в условиях, аналогичных экспериментам с выпускным окном и поддерживающей решёткой (шаг 10 имп./с., расход воды 5 л/мин., коэффициент эжекции 10).

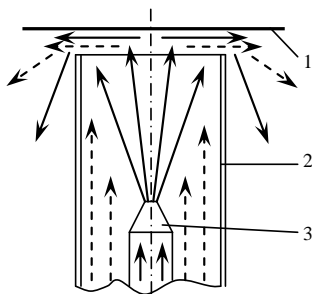


Рисунок 62. Схема охлаждения разделительной фольги выходного окна электронного ускорителя «АСТРА»: 1) разделительная фольга Ti 50 мкм; 2) камера смешения; 3) форсунка. Стрелками и линиями показаны направления движения воды (сплошными), воздуха (пунктирными).

Было установлено, что стабильная генерация и выпуск электронного пучка наблюдаются вплоть до частоты следования 50 имп./с. Длительность проведения эксперимента составляла 10^5 импульсов тока пучка. Оценка свойств разделительной фольги после проведения эксперимента показала отсутствие следов её перегрева и деградации. На поверхности разделительной фольги со стороны катода обнаружена плёнка серого цвета (Рисунок 63 поз. 1). Результаты анализа плёнки показали (Рисунок 64), что средняя толщина плёнки составляет порядка 0,5 мкм, в её составе преобладает углерод [24*]. Предполагаемый источник углерода – пары масла откачной вакуумной системы.



Рисунок 63. Внешний вид разделительной фольги выходного окна без поддерживающей решетки со стороны катода после 10^5 импульсов тока пучка с охлаждением водовоздушной смесью: 1 – область фольги, не подверженной влиянию электронного пучка; 2,3 – области покрытой плёнкой фольги.

После приработки катода, калориметрические измерения показали уменьшение энергии, перенесённой электронным пучком в атмосферу с 9 Дж до 6 Дж за импульс. Абразивная обработка эмитирующей поверхности катода привела к восстановлению его эмитирующих свойств.

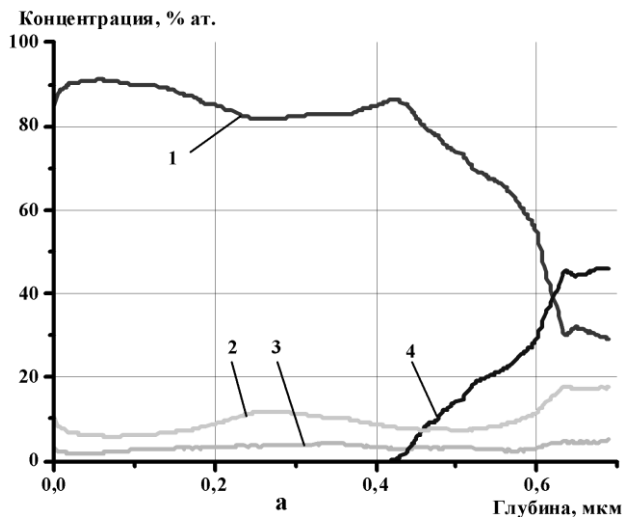


Рисунок 64. Результаты элементного анализа пленки на поверхности разделительной фольги выпускного окна электронного ускорителя «АСТРА» после 10^5 импульсов тока пучка: 1 – С; 2 – О; 3 – N; 4 – Ti.

Исходя из описанного выше, можно заключить, что охлаждение водовоздушным потоком разделительной фольги выпускного окна без поддерживающей решётки позволяет разрешить инжекцию электронного пучка в течение 1×10^5 импульсов с частотой повторения до 50 имп./с, Максимальная частота повторения импульсов ограничивается производительностью откачной вакуумной системы. Исходя из результатов испытаний, описанный режим работы ускорителя может использоваться для обработки жидкостей или газов в аэрозольном потоке.

4.2.3. Выпуск электронного пучка в частотном режиме при охлаждении выпускного окна потоком газа

Для обработки электронным пучком твёрдых сухих объектов и потоков газа разработан способ охлаждения разделительной фольги выпускного окна потоком газа. Схема организации охлаждения приведена на рисунке 65. Высокнапорный вентилятор 0,8ЭВ-2 обеспечивал скорость потока атмосферного воздуха более 2 м/с вдоль поверхности фольги.

Частота следования импульсов ступенчато увеличивалась с шагом 5 имп./с. Разрушение разделительной фольги выпускного окна произошло при 25 имп./с. Повторный эксперимент проводился при частоте следования 20 имп./с. Продолжительность эксперимента составила 4×10^4 импульсов тока пучка без разрушения выходного окна. Результаты элементного анализа

поверхности разделительной фольги со стороны катода так же показали наличие плёнки с преобладанием углерода. Средняя толщина плёнки составила 0,35 мкм.

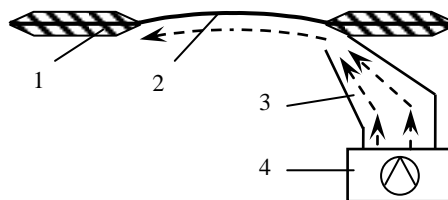


Рисунок 65. Схема охлаждения разделительной фольги выходного окна без поддерживающей решётки потоком газа: 1 – опорный фланец; 2 – разделительная фольга Ti 50 мкм; 3 – воздуховод с раструбом; 4 – нагнетатель 0,8ЭВ-2. Стрелками и пунктирными линиями показаны направления движения потоков газа.

Обобщая результаты описанных экспериментальных исследований, что экспериментально подтверждена возможность частотной генерации и инжекции в атмосферу электронного пучка (максимальная плотность тока 11-15 А/см²) в течение 10⁵ импульсов с частотой 40 имп./с при водовоздушном охлаждении и 4х10⁴ импульсов с частотой 20 имп./с при охлаждении потоком газа разделительной фольги выпускного окна.

4.3. Частотный ускоритель электронов для радиационных технологий

Используя результаты экспериментальных исследований и анализа результатов моделирования, конструкция экспериментального стенда (ускоритель «АСТРА») была доработана в направлении улучшения энергетических и эксплуатационных показателей. Внешний вид модернизированного ускорителя «АСТРА-М» приведён на рисунке 66 [17*]. Концепция формирования импульсов ускоряющего напряжения и энергозапас сохранились. Значительное внимание уделено вопросам удобства и безопасности использования ускорителя.

4.3.1. Компоновочная схема ускорителя

Все системы ускорителя размещены на единой мобильной станине габаритными размерами 1,7х1х1,8м (ДхШхВ) (рис.2). Кроме указанного на рисунке 66 оборудования, на станине размещены: система охлаждения и регенерации трансформаторного масла, спиральный форвакуумный насос для безмасляной предварительной откачки вакуумной камеры, подъёмники, для установки и снятия радиационной защиты. Расчёт защиты выполнялся для эффективного ослабления мощности дозы тормозного рентгеновского излучения для пучка с энергией электронов до 500 кэВ [104]. Защита выполнена в виде свинцового кожуха толщиной 5 см, в который погружаются камера обработки и вакуумный диод ускорителя (Рисунок 67).

Исследование эффективности радиационной защиты частотного импульсного электронного ускорителя [131] показало возможность использования локальной радиационной

защиты для снижения уровня мощности тормозного рентгеновского излучения на рабочем месте оператора до уровня, при котором возможна непрерывная эксплуатация ускорителя специализированным персоналом [105] при частоте следования до 50 имп./с в течение года.

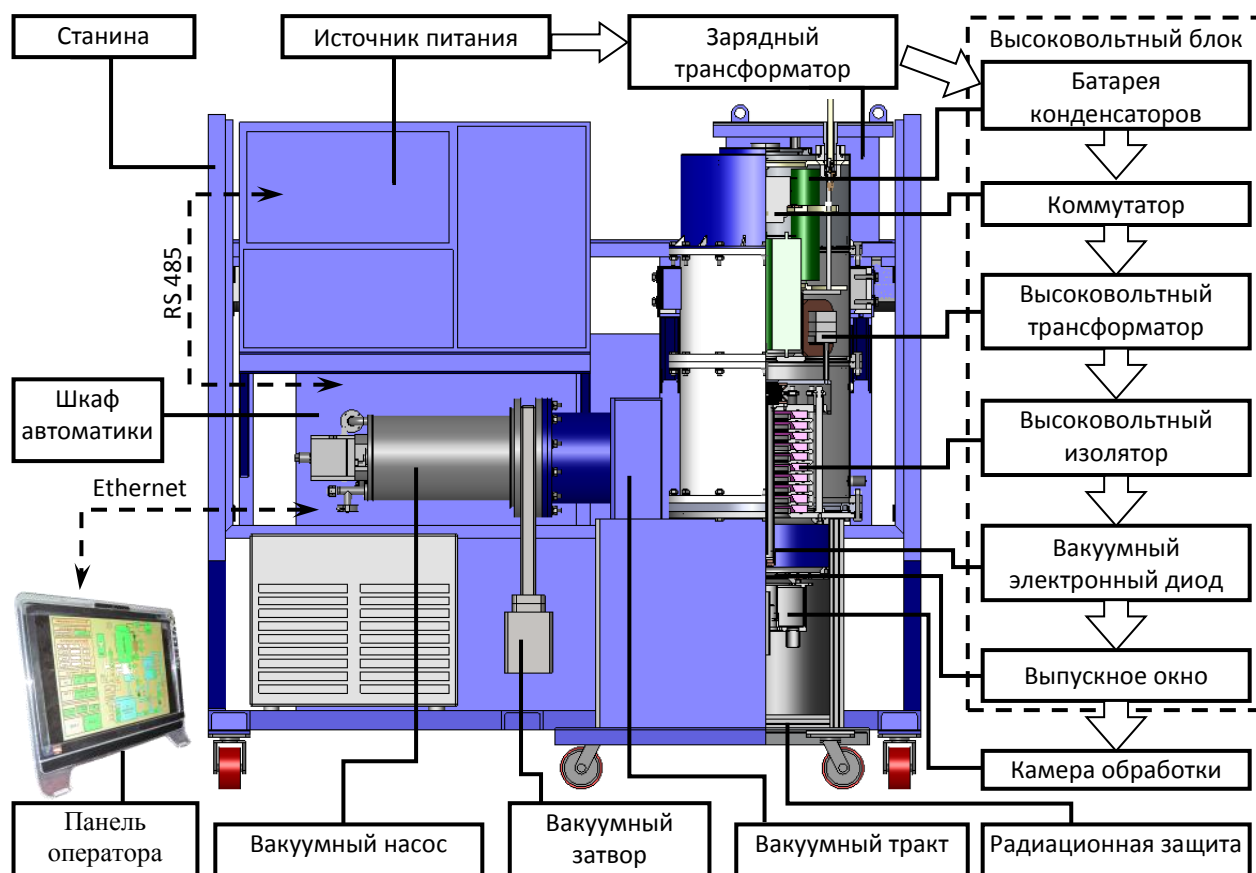


Рисунок 66. Компоновочная схема ускорителя для радиационных технологий «АСТРА-М». Стрелками показаны направления передачи энергии между функциональными элементами ускорителя.

Необходимость размещения части вакуумной камеры внутри радиационной защиты объясняет коленчатую форму тракта откачки вакуума. Кроме того, ступень тракта выполняет защитную функцию высоковакуумного насоса при ударной разгерметизации вакуумного объема в случае разрушения разделительной фольги выпускного окна. Вакуумный тракт при этом отсекается шиберным вакуумным затвором с пневматическим приводом. Высоковакуумный насос марки Стуо-Торг 8 после прорыва атмосферы нуждается в проведении цикла регенерации, который может выполняться в автоматическом режиме. Давление остаточной атмосферы при отсутствии импульсов пучка составляет порядка 1×10^{-6} торр.

Основной изолирующей средой высоковольтного блока (Рисунок 66) является трансформаторное масло, которое выступает также теплоносителем в организации охлаждения конструктивных элементов высоковольтного блока. Принудительная циркуляция масла обеспечивается внешним масляным насосом, который осуществляет забор масла из верхней

точки высоковольтного блока. Масло прокачивается последовательно через адсорбционный масляный фильтр для удаления влаги и продуктов разложения масла, газовую ловушку и теплообменник (Рисунок 67-6) перед подачей в нижнюю часть высоковольтного блока.



Рисунок 67. Внешний вид импульсного электронного ускорителя «АСТРА-М» 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 крионасос; 9 – станина.

Мониторинг изменения параметров работы ускорителя выполняет микроконтроллерная система автоматического управления, которая позволяет применять ускоритель «АСТРА-М» как для проведения работ под контролем оператора, так и для выполнения заданной программы в полностью автоматическом режиме. Система автоматического управления содержит алгоритмы управления оборудованием ускорителя, как для штатного, так и для аварийного режимов работы. При возникновении ситуации, отличной от нормальной работы, реакция системы направлена на предотвращение последствий и скорейшее возвращение к работе с номинальными параметрами. Панель оператора это персональный компьютер со специализированным программным обеспечением (Рисунок 68) и сетевой картой для Ethernet соединения с контроллером. Панель оператора подразумевает наличие нескольких уровней полномочий оператора с парольной защитой, определяемых при регистрации пользователя.

Для работ в непосредственной близости предусмотрен режим ручного управления работой ускорителя, доступный только при работах, не связанных с генерацией электронного пучка: калибровка диагностического оборудования при работе на резистивную нагрузку, настройка и тестирование вспомогательных систем ускорителя, системы автоматики.

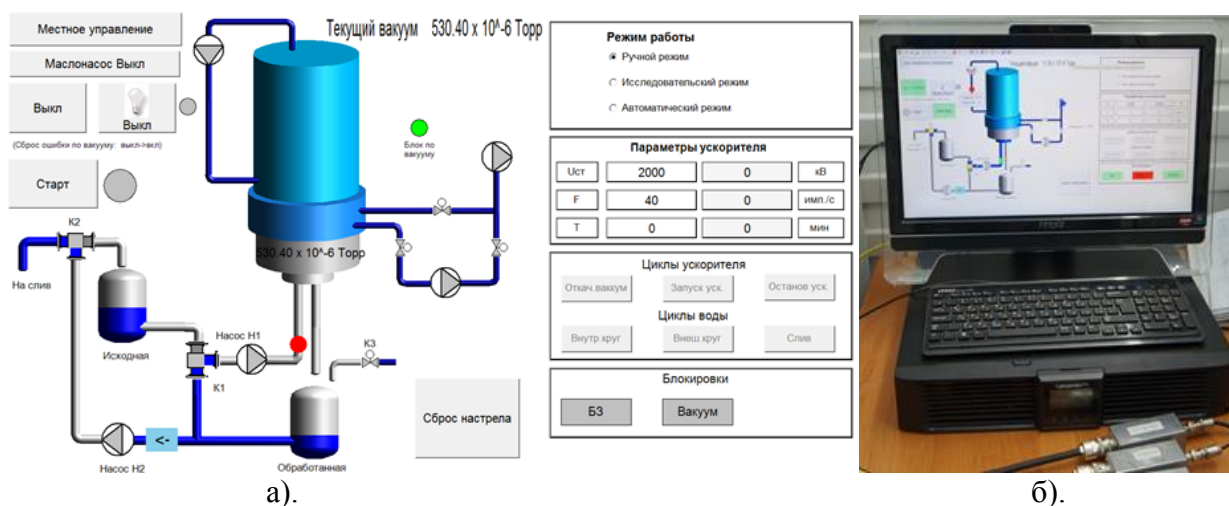


Рисунок 68. Мнемосхема системы управления ускорителем (а) на панели оператора (б).

При работе в автоматическом режиме, работа систем ускорителя обеспечивается микроконтроллерной системой автоматики – панель оператора может быть отключена. При этом контролируются как параметры работы систем ускорителя, так и доступ в помещение ускорителя, наличие установленной радиационной защиты для обеспечения безопасности персонала. Работа ускорителя в таком режиме может быть остановлена также с помощью аппаратной блокировки подачи высокого напряжения в виде невозвратной кнопки, расположенной на месте работы оператора. Генерация пучка электронов прекращается при открытии дверей помещения, в котором расположен ускоритель.

4.3.2. Стабильность функционирования вспомогательных систем при частотной работе ускорителя

Экспериментальное определение возможностей ускорителя позволило исследовать эксплуатационные свойства ускорителя при работе в составе технологической линии обработки сточных вод [27-29]. Особое внимание уделялось тепловому режиму работы оборудования ускорителя [25*]. Оценка теплового режима производилась исходя из данных, полученных с помощью регистрации изображения поверхности высоковольтного блока ускорителя в инфракрасном диапазоне (тепловизор Fluke Ti10).

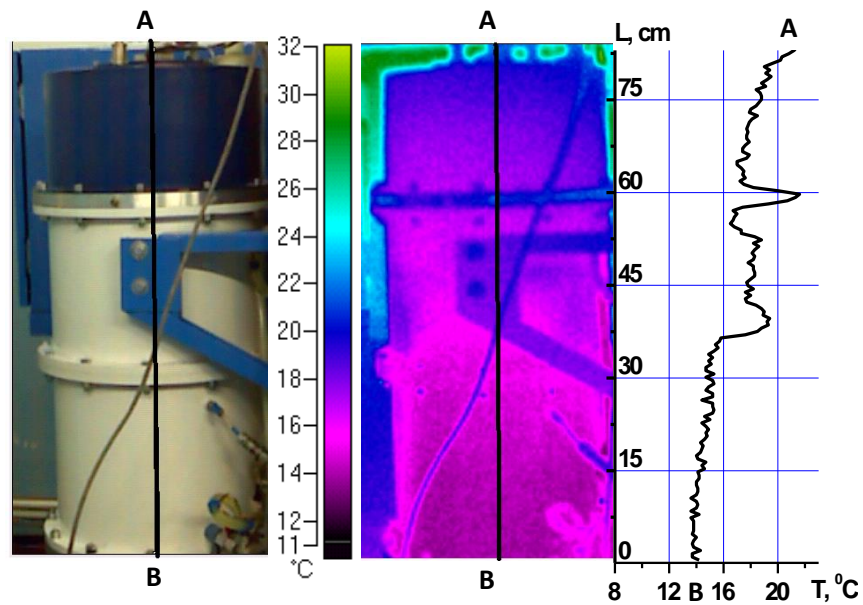


Рисунок 69. Тепловое изображение и распределение температуры на поверхности высоковольтного блока ускорителя после непрерывной работы в течение $3,3 \times 10^4$ импульсов тока пучка при частоте следования 40 имп./с (тепловизор Fluke Ti10).

Анализ кривой распределения температуры по поверхности высоковольтного блока [25*] ускорителя показал, что верхняя часть высоковольтного блока нагревается сильнее (Рисунок 69). В данной части расположен импульсный трансформатор и высоковольтный коммутатор (Рисунок 66). Контроль температуры трансформаторного масла перед подачей высоковольтный блок ускорителя показал, что применяемая система охлаждения и регенерации трансформаторного масла имеет достаточную мощность для долговременной эксплуатации при 40 имп./с (Рисунок 70).

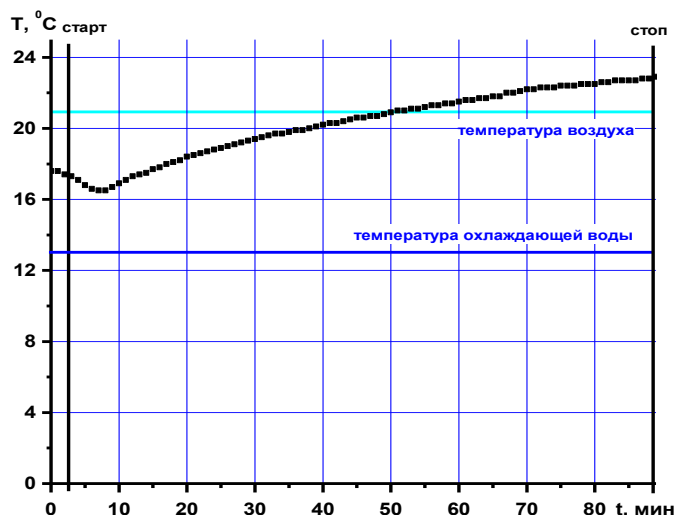


Рисунок 70. Изменение температуры трансформаторного масла за время непрерывной работы ускорителя при частоте следования 40 имп./с.

В процессе эксплуатации ускорителя так же контролировалось давление остаточной атмосферы в вакуумной камере (Рисунок 71) [25*].

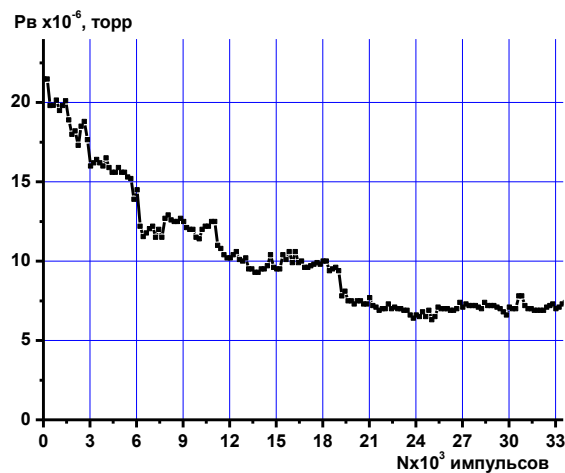


Рисунок 71. Изменение давления остаточной атмосферы при 40 имп./с.

Следует отметить, что кривая изменения давления остаточной атмосферы в вакуумной камере диода носит спадающий характер, причём скорость снижения давления так же уменьшается, а после $3,3 \times 10^4$ импульсов тока пучка стабилизируется. Предположительно, при частотной работе ускорителя в результате процессов, происходящих при генерации пучка в вакуумном объёме диода, происходят активные процессы десорбции газа с поверхности элементов конструкции диода.

4.4. Практическое применение ускорителя с выводом пучка электронов в атмосферу в частотном режиме

Полученные характеристики частотной работы импульсного электронного ускорителя с инжекцией импульсного электронного пучка в атмосферу позволили использовать ускоритель в технологических процессах, связанных с непрерывной обработкой жидкостей, газов, поверхностей твёрдых объектов в поточном режиме. Одним из способов подобного практического применения частотного электронного ускорителя является использование генерируемого электронного пучка для обработки водных растворов с целью обеззараживания. Основанием проведения испытаний действия разработанного ускорителя для применения в качестве частотного источника ионизирующего излучения является анализ литературных источников о возможностях способа [79-90].

Применение импульсного электронного ускорителя для обработки водных растворов с целью обеззараживания, накладывает ряд ограничений на режимы генерации пучка электронов. Так, ограничение верхнего предела кинетической энергии электронов и конечное значение площади сечения пучка ограничивают единичный объём обрабатываемой воды. Кроме того, для достижения эффекта обеззараживания необходимо гарантированно исключить попадание необработанных вод в объём обработанных. Критическим условием применения ускорителя

является необходимость обеспечения охлаждения разделительной фольги выпускного окна сразу после начала генерации электронного пучка в частотном режиме.

Исходя из перечисленных требований, была разработана камера для обработки водных растворов (Рисунок 72), решающая также задачу охлаждения выпускной фольги ускорителя [26*].

Разработанная реакционная камера обеспечивает подготовку и подачу водовоздушной смеси в направлении выпускного окна ускорителя (область обработки) в соответствии с применяемой схемой охлаждения разделительной фольги выпускного окна, показанной на рисунке 57.

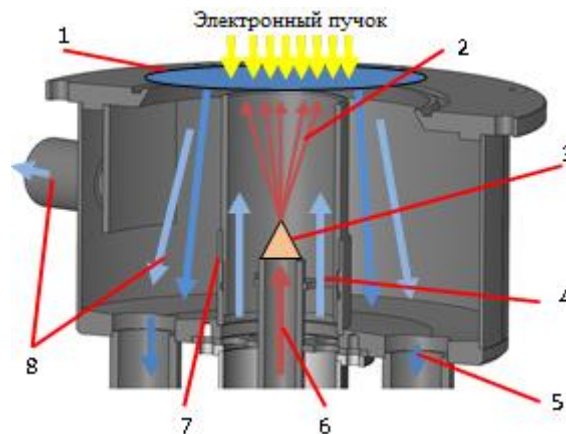


Рисунок 72. Камера обработки воды импульсным электронным пучком. 1 – выпускное окно ускорителя; 2 - капли воды 50-100 мкм; 3 – Форсунка; 4 - поток атмосферного воздуха; 5 – поток обработанной воды; 6 – поток исходной воды; 7 – барьер; 8 отвод воздуха.

Обработанная вода самотёком удаляется из реакционной камеры в приёмную ёмкость. Излишки газа, содержащие продукты реакций удаляются из реакционной камеры через патрубок 8 (Рисунок 72). Долговременная безотказная работа распылительной системы обуславливает необходимость применения системы предварительной механической очистки сточных вод.

Для обеспечения обработки всего объёма обрабатываемых вод, пуска ускорителя и выхода на крейсерскую частоту повторения импульсов (40 имп./с) использовалась дополнительная цепь гидропитания форсунки от водопровода, которая так же позволяла обеспечить циклическую обработку объёма водного раствора. Таким образом, разработанная система водораспределения обеспечивала охлаждение разделительной фольги выпускного окна при запуске, останове и работе ускорителя в частотном режиме, обеспечивая подачу, отведение водных растворов для их однократной или многократной обработки импульсным электронным пучком.

Обеззараживание водного раствора импульсным электронным пучком в водовоздушном потоке

Для проведения экспериментальных исследований по обеззараживанию водных растворов, в качестве объекта обработки была использована сточная вода промплощадки Володино ОАО "Газпром трансгаз Томск". Забор пробы воды был произведён из КНС, проба доставлена к месту расположения ускорителя.

Для предотвращения абразивного износа выпускного окна ускорителя и повреждения разделительной фольги, перед подачей в камеру обработки, вода подвергалась предварительной очистке от механических примесей системой фильтров (20 мкм).

Исходя из результатов литературного обзора, расход обрабатываемой воды был установлен 3 л/мин при частоте повторения импульсов тока пучка 40 имп./с (6-8 Дж/имп.) для обеспечения средней поглощённой дозы в воде более 4 кГр [88]. Обработка 100 л воды продолжалась в течение 40 мин, включая время выхода на крейсерскую частоту (40 имп./с) и время останова ускорителя. Забор пробы воды для бактериологического анализа производился непосредственно после обработки и через 20 часов [27*]. Бактериологический анализ проб производился сертифицированной лабораторией с выдачей протокола анализа стандартного образца. На основании протоколов составлена сравнительная таблица результатов биологического анализа проб воды (Таблица 8) до и после обработки [27*].

Таблица 8. Результаты бактериологического анализа проб.

Определяемые показатели	Проба исходной воды	После обраб. эл. пучком	20 ч после обраб. эл. пучком	Гигиенич. норматив	Нормативный документ
Общие колиформные бактерии	2.1×10^6	менее 100	менее 100	не более 500	МУК 4.2.1884-04
Колифаги, БОЕ/100 мл	42	не обн.	не обн.	не более 10	МУК 4.2.1884-04
Термотолерантные колиформн. бактерии, КОЕ/100 мл	2.1×10^6	менее 100	менее 100	не более 100	МУК 4.2.1884-04
Возбудители заболеваний семейства кишечных	не обн.	не обн.	не обн.	отсутствие	МУ 2285-81
Жизнеспособные яйца гельминтов, онкосферы тениид	не обн.	не обн.	не обн.	отсутствие	МУК 4.2.2314-08
Жизнеспособные цисты кишечных патогенных простейших	не обн.	не обн.	не обн.	отсутствие	МУК 4.2.1884-04

На основании результатов таблицы 8 можно сделать выводы, что обработка водного раствора импульсным электронным пучком с поглощённой дозой 4 кГр обеспечивает снижение бактериального заражения сточной воды до необходимых гигиенических нормативов. Наблюдается пролонгированное действие эффекта обеззараживания в течение порядка 20 часов

(промежуток времени между отборами проб). Данный эффект даёт возможность применения отстаивания и других технологических процессов после обработки электронным пучком с целью очистки сточных вод [28*-30*].

При изменении конструкции реакционной камеры (Рисунок 72) возможно применение ускорителя для обработки импульсным электронным пучком вязких жидкостей, например нефтей с целью изменения их вязкости [132*, 133*]. Применение схемы охлаждения разделительной фольги выпускного окна ускорителя потоком газа (Рисунок 65) позволяет на основе ускорителя «АСТРА-М» создать установку для обработки импульсным электронным пучком твёрдых объектов с целью обеззараживания или модифицирования поверхностей.

Указанные выше характеристики импульсного электронного ускорителя «АСТРА-М», а так же возможности его практического применения успешно прошли апробацию на конференциях международного уровня [22*, 24*, 25*, 28*, 134, ¹³⁵], что показывает востребованность дальнейшего продолжения работ автором в данном научном направлении.

Выводы

Приведённые результаты экспериментальных исследований частотной работы ускорителя с инъекцией импульсного электронного пучка в атмосферу показали техническую возможность применять ускоритель электронов «АСТРА-М» с частотой следования до 60 имп./с в цуговом режиме и до 50 имп./с в непрерывном режиме с выпуском пучка электронов в атмосферу и охлаждением фольги выпускного окна водовоздушным потоком. При охлаждении фольги выпускного окна только потоком газа продемонстрирован стабильный режим работы ускорителя при 20 имп./с. Указанные результаты были получены для разработанной конструкции выпускного окна без опорной решётки, в котором функцию анода и разделительной мембраны совмещает в себе титановая фольга толщиной 50 мкм. Полученные результаты были использованы при настройке ускорителя для его практического применения в качестве частотного источника импульсных электронных пучков.

Ускоритель с частотой повторения 40 имп./с применялся для обеззараживания водного раствора в водовоздушном потоке с производительностью 200-250 л/ч. Поглощённая доза в воде за один импульс при этом составляла не менее 4 кГр. В результате обработки было зафиксировано снижение показателей бактериологического анализа проб до значений гигиенического норматива.

Массогабаритные показатели, наличие встроенной радиационной защиты и микроконтроллерной системы управления позволяют использовать ускоритель в производственных помещениях площадью 12 м², не допуская при этом превышения дозовой нагрузки оператора при непрерывной работе в течение года.

Заключение

Настоящая диссертация посвящена исследованию основных закономерностей влияния запаздывания тока электронной эмиссии в вакуумном диоде на выходные параметры ускорителя по схеме ёмкостный накопитель, импульсный трансформатор, электронный диод, а так же экспериментальному исследованию режимов частотной генерации и инжекции электронного пучка в атмосферу.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. С помощью разработанной расчётной схемы генератора ускорителя установлены и экспериментально подтверждены закономерности формирования импульсов мощности 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 аперидический разряд ёмкости основного накопителя энергии;

4. С помощью расчётной модели определены основные закономерности влияния запаздывания тока электронной эмиссии в вакуумном диоде на выходные параметры ускорителя по схеме ёмкостный 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 импульсного ускорителя по схеме ёмкостный накопитель, импульсный трансформатор, вакуумный электронный диод с запаздыванием тока электронной эмиссии для обработки водных растворов в водовоздушном потоке с целью обеззараживания. При поглощённой дозе в воде порядка 4 кГр обеспечивается снижение бактериологических показателей водного раствора до гигиенических нормативов.

Список сокращений и условных обозначений

ИП – источник питания;

ГВИ – генератор высоковольтных импульсов;

ЭД – электронный диод;

ППТ – полупроводниковый прерыватель тока;

МК – металлокерамический (материал);

ПР – пояс Роговского;

ЦФ – цилиндр Фарадея;

ВАХ – кривые изменения напряжения и тока диода за время импульса.

Список литературы

1. Пикаев А.К. Экологические применения радиационной технологии (Обзор) // Химия высоких энергий. 1994. Т. 28, № 1. С. 5–16.
2. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии: сборник научных статей / Академия наук СССР (АН СССР), Сибирское отделение (СО), Институт сильноточной электроники (ИСЭ) ; под ред. Г. А. Месяца. Новосибирск: Наука: Сибирское отделение, 1983. 168 с.
3. Диденко А.Н, Григорьев В.Н., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1977. 280 с.
4. Соковнин С.Ю. Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 225 с.
5. Пикаев А.К. Современное состояние радиационной технологии // Успехи химии. 1995. Т. 64, № 6. С. 609–639.
6. Немытов П.И. Системы питания и управления серии высоковольтных промышленных ускорителей электронов с мощностью выведенного пучка сотни киловатт: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2010.
7. Абрамян Е.А. Промышленные ускорители электронов. М.: Энергоатомиздат, 1986, С 165–172.
8. Pikaev A.K. New data on electron-beam purification of wastewater // Radiation Physics and Chemistry. 2002. Vol. 65, Iss. 4–5. P 515–526.
9. Kim Y., Kim J., Han B. et al. Application of an electron accelerator for the treatment of wastewater from textile dyeing industries // Journal of the Korean Physical Society. 2011. Vol. 59, №. 61. P 3489–3493.
10. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Физика импульсного пробоя газов, М., 1991. 224 с.
11. Месяц Г. А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
12. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Советское радио, 1974. 256 с.
13. Блум Х. Схемотехника и применение мощных импульсных устройств / Хансиоахим Блум ; пер. с англ. Рабодзея А. М. М.: Додэка-XXI, 2008. 352 с.
14. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
15. Егоров И. С., Кайканов М. И., Луконин Е. И. и др. Частотно-импульсный электронный ускоритель «АСТРА» // ПТЭ. 2013. № 5. С. 81–84.

16. Егоров И.С., Есипов В.С., Луконин Е.И. и др. Автозапуск тиратрона с холодным катодом в генераторе импульсного напряжения // ПТЭ. 2015. № 1. С. 63–66.
17. Egorov I., Esipov V., Remnev G. et al. A high-repetition rate pulsed electron accelerator //IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. V. 20, № 4. P. 1334–1339.
18. Вагнер М. И., Егоров И. С., Кайканов М. И. Исследование характеристик планарного диода с композиционным катодом // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54, № 11-3. С. 80–85.
19. 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. URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10004438 (09.01.2015).
20. 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, Iss. 6. P 066112. doi:10.1063/1.4884895.
21. Егоров И. С., Кайканов М. И., Ремнёв Г. Е. Выходное окно сильноточного ускорителя электронов «АСТРА» // Известия ТПУ. 2013. Т. 322, № 2. С. 91–94.
22. Egorov I., Kaikanov M. Exit window for the Astra repetitive high-current pulsed electron accelerator // 19th International Conference on High-Power Particle Beams, Karlsruhe, Germany, September 30 - October 4, 2012. 2012. P. 181.
23. Ремнёв Г. Е., Егоров И. С., Кайканов М. И. и др. Исследование генерации импульсного электронного пучка в частотном режиме работы ускорителя // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54, № 11-3. С. 74–79.
24. Егоров И. С., Ремнев Г. Е., Кайканов М. И. и др. Частотный импульсный электронный ускоритель для радиационных технологий // Ядерная и радиационная физика: Тезисы 8-й Международной конф., Алматы, 20-23 Сентября 2011. Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2011. С. 351.
25. Egorov I. S., Esipov V. S., Remnyov G. E. et al. 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.
26. Egorov I. S., Remnyov G. E., Kaykanov M. I. et al. Repetitive source of pulsed electron beams // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 10-3. С. 58–60.
27. Egorov I. S., Kaykanov M. I., Kolokolov D. Y. et al. Treatment of industrial and household waste water with the pulse electron accelerator-based setup // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 10-3. С. 61–64.
28. Ремнёв Г. Е., Степанов А. В., Войно Д. А. и др. Очистка и стерилизация промышленно-бытовых стоков импульсным электронным пучком наносекундной длительности / И. С. Егоров,

- М.И. Кайканов, А. С. Маслов, Л. Р. Меринова, А. В. Попов, Б. А. Сярг, Л. Н. Шиян // Ядерная и радиационная физика: Доклады 8-й Международной конференции, Алматы, 20-23 Сентября 2011. Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2011. С. 506–509.
29. Ремнёв Г. Е., Степанов А. В., Кайканов М. И. и др. Импульсно-пучковая обработка промышленно-бытовых сточных вод / Р. В. Сазонов, Д. Ю. Колоколов, Л. Р. Меринова, И. С. Егоров // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 7-2. С. 42–47.
30. 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., Егоров И.С. Способ очистки сточных вод // Патент РФ № 2473436. 05.08.2011. Бюл. № 22.
31. Немытов П.И. Системы питания и управления серии высоковольтных промышленных ускорителей электронов с мощностью выведенного пучка сотни киловатт: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2010.
32. 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.
33. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Поталицын Ю.Ф. Сильноточные наносекундные коммутаторы. Новосибирск: Наука, 1991. 176 с.
34. Котов Ю.А., Месяц Г.А., Рукин С.Н. и др. Твердотельный прерыватель тока для генерирования мощных наносекундных импульсов // ДАН. 1993. Т. 330, № 3. С. 315–317.
35. Дарзбек С.А., Любутин С.К., Рукин С.Н. и др. SOS-диоды: наносекундные прерыватели сверхплотных токов // Электротехника. 1999. № 4. С. 20–28.
36. Мешков А.Н. Магнитные генераторы мощных наносекундных импульсов // ПТЭ. 1990. № 1. С. 23–37.
37. Энгелько В.И. Разработка методов формирования интенсивных электронных и ионных пучков микросекундной длительности, создание на их основе ускорителей и их применение: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2002.
38. Engelko V., Yatsenko V., Mueller G. et al. Pulsed electron beam facility (GESA) for surface treatment of materials // Vacuum. 2001. Vol. 62, № 2–3. P. 211–216.
39. Абдуллин Э.Н. Взрывоэмиссионные источники широкоапертурных электронных пучков микросекундной длительности: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2007.
40. Гончаров Д.В., Ремнев Г.Е., Пушкарев А.И., Фурман Э.Г. Импульсный электронный ускоритель // Патент России № 41951. 2004. Бюл. № 31.
41. Remnev G.E., Furman E.G., Pushkarev A.I. et al. High-current pulsed accelerator with matched transformer: construction and exploitation characteristics // IEEE Transactions on fundamentals and materials. 2004. Vol. 124, № 6. P. 491–495.

42. Пушкарев А.И., Сазонов Р.В. Исследование потерь импульсного электронного пучка при формировании и выводе из диодной камеры ускорителя // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 5. С. 117–124.
43. Mayes, J. and Carey W. Compact Pulsed Power Sources SAE // Technical Paper 2002-01-3180. 2002. doi:10.4271/2002-01-3180.
44. Sethian J.D., Myers M., Giuliani J.L. et al. Electra: A repetitively pulsed, electron beam pumped KrF laser to develop the technologies for fusion energy // Proceedings of the Pulsed Power Conference, 13-17 June 2005. P. 8–15. doi:10.1109/PPC.2005.300463.
45. Neau E.L. High average power, high current pulsed accelerator technology // Proceedings of the Particle Accelerator Conference, 1-5 May 1995. Vol. 2, P. 1188–1192. doi:10.1109/PAC.1995.505170.
46. Tokuchi A., Ninomiya N., Weihua Jiang et al. Repetitive pulsed-power generator "ETIGO-IV" // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol. 30, № 5. P. 1637–1641. doi:10.1109/TPS.2002.806644.
47. Ускорители сильноточных электронных пучков с высокой частотой следования импульсов / А. С. Ельчанинов [и др.] // Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии. Новосибирск: Наука Сибирское отделение, 1983. С. 5–21.
48. Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Коровин С.Д. и др. Исследование стабильности высоковольтного разрядника с потоком газа между электродами // ПТЭ. 1979. № 4. С. 162–164.
49. Mesyats G. A., Korovin S. D., Gunin A. V. et al. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines // Laser and Part. Beams. 2003. Vol. 21, № 2. P. 197–209.
50. Коровин С.Д., Ростов В.В. Сильноточные наносекундные импульсно-периодические ускорители электронов на основе трансформаторов Тесла // Известия вузов. Физика. 1996. № 12. С. 21–30.
51. Быков Н.Б., Губанов В.П., Гунин А.В. и др. Сильноточный импульсно-периодический ускоритель электронов с высокой стабильностью параметров электронного пучка // ПТЭ. 1989. № 1. С. 37–39.
52. Афанасьев В.Н., Бычков В.Б., Ларцев В.Д. и др. Параметры электронных пучков, генерируемых ускорителями РАДАН-220 И РАДАН-ЭКСПЕРТ // ПТЭ. 2005. № 1. С. 88–92.
53. Gubanov V.P., Gunin A.V., Korovin S.D. и др. A nanosecond high-voltage periodically pulsed generator based on a helix forming line // ПТЭ. 2002. Т. 45, № 1. С. 73–75.
54. Mesyats G. A. The RADAN series of compact pulsed power Generators and their applications / G. A. Mesyats [et al.] // Proceedings of the IEEE. 2004. Vol. 92, Iss. 7. P. 1166–1179.

55. Яландин М.И., Шпак В.Г. Мощные малогабаритные импульсно-периодические генераторы субнаносекундного диапазона (обзор) // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
56. Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. Малогабаритный сильноточный импульсный источник РАДАН СЭФ-303А // ПТЭ. 1993. № 1. С. 149–145.
57. Jian-Chang Peng, Guo-Zhi Liu, Xiao-Xin Song et al. A high repetitive rate intense electron beam accelerator based on high coupling Tesla transformer // Laser and Particle Beams. 2011. Vol. 29. P 55–60. doi:10.1017/S0263034610000753.
58. Соковнин С.Ю. Наносекундные ускорители электронов и технологии на их основе: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. Екатеринбург, 2006.
59. Соковнин С.Ю., Балезин М.Е., Щербинин С.В. Ускоритель УРТ-1М для радиационных технологий // ПТЭ. 2013. № 4. С. 47–50.
60. (Цит. по: Ускорители сильноточных электронных пучков с высокой частотой следования импульсов / А. С. Ельчанинов [и др.] // Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии. Новосибирск: Наука Сибирское отделение, 1983. С. 5–21.) Ельчанинов А.С., Ковальчук Б.М., Рыбалов А.М. Авторское свидетельство № 547845. // Бюл. Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки, 1977. № 7. С. 161.
61. Котов Ю.А., Филатов А.Л., Соковнин С.Ю. и др. Вакуумный изолятор с экранировкой поверхности диэлектрика // ПТЭ. 1986. № 2. С. 138–141.
62. Волков С.Н., Жерлицын А.А., Ковальчук Б.М. и др. Вакуумный проходной изолятор на напряжение 1 МВ // ПТЭ. 2003. № 5. С. 85–88.
63. Янкелевич Е.Б. Исследование катодных процессов при взрывной электронной эмиссии применительно к созданию долговечных сильноточных катодов: автореф. дис. ... канд. Томск, 1978.
64. Gunin A.V., Landl V.F., Korovin S.D. et al. Experimental studies of long-lifetime cold cathodes for high power microwave oscillators // IEEE Trans. Plasma. Sci. 2000. Vol. 28, P. 537–541.
65. Bykov N.M., Gubanov V.P., Gunin A.V. et al Development of long-lifetime cold cathodes // Proc. 10th IEEE Pulsed Power Conf. Albuquerque, NM, 1995. P. 71–74.
66. Котов Ю.А., Соковнин С.Ю. Выходное окно ускорителя заряженных частиц // Патент РФ № 2137247. 21.01.1998.
67. Roeder O., Seyfert U., Panzer S. Electron beam exit window // Патент США № 5,561,342. 01.10.1996.
68. Пушкарев А.И., Новоселов Ю.Н., Сазонов Р.В. Эффективность работы планарного диода с взрывоэмиссионным катодом при задержке плазмообразования // ЖТФ. 2008. Т. 78, №3. С. 72–77.

69. Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И. и др. // ПТЭ. 2004. № 3. С. 130–134.
70. Беломытцев С.Я., Коровин С.Д., Пегель И.В. Ток в сильноточном планарном диоде с дискретной эмиссионной поверхностью. // ЖТФ. 1999. Т. 69, Вып. 6. С. 97–101.
71. Пушкарев А.И., Сазонов Р.В. Исследование планарного диода в режиме ограничения эмиссии ПЖТФ. 2008. Т. 34, № 7. С. 44–50.
72. Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Бalezин М.Е. Исследование характеристик металлокерамического катода // ЖТФ. 2003. Т. 73, Вып. 4. С. 124–128.
73. Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Бalezин М.Е. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,5 // ПТЭ. 2000. № 1. С. 112–115.
74. Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Бalezин М.Е. Металлокерамический катод // Патент РФ № 2158982. 11.11.1999.
75. Krasik Ya. E., Dunaevsky A., Gleizer J. Z. et al. High-current electron beam generation by a metal–ceramic cathode // Journal of Applied Physics. 2002. Vol. 91. P. 9385. doi: 10.1063/1.1476964
76. Batrakov A.V., Karlik K.V., Kitsanov S.A. et al. Increasing of pulse duration of the relativistic microwave BWO with output power 3 GW // Tech. Phys. Lett. 2001. Vol. 27. P. 150–152.
77. Andreev, Yu.A., Gubanov, V.P., Efremov et al. High-power ultrawideband radiation source // Laser Part. Beams. 2003. Vol. 21, P. 211–217.
78. Woods R.J., Pikaev A.K. Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing. New York: Wiley, 1994. 535 p.
79. Подзорова Е.А. Комбинированные радиационные методы очистки воды и сточных вод: дис. ... д-ра. хим. наук. М., 2001.
80. Пикаев А. К. Импульсный радиолиз и его применение. М.: Атомиздат, 1980. 280 с.
81. Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Радиолиз газов и жидкостей. М.: Наука, 1986. 440 с.
82. Getoff N. Purification of drinking water by irradiation: A review // Proc. Indian Acad. Sci. (Chem. Sci.). 1993. Vol. 105 (6). P 373–391.
83. Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Твердое тело и полимеры. Прикладные аспекты. М.: Наука, 1987. 448 с.
84. Пикаев А.К., Блуденко А.В., Макаров И.Е и др. // Тез. докл. VIII Совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине (Санкт-Петербург, 26-28 сентября 1995). М.: ЦНИИАтоминформ. 1995.
85. Строкин Н.А. Электронно-лучевая подготовка питьевой воды в промышленной системе // Химия Высоких Энергий. 2007. Т 41, № 1. С 3–6.

86. Bunsoo Han, Jin Kyu Kim, Yuri Kim et al. Operation of industrial-scale electron beam wastewater treatment plant // *Radiation Physics and Chemistry*. 2012. Vol. 81, P 1475–1478.
87. Гаген-Торн В.К., Попова Т.А. О возможности применения ускорителей электронов для очистки городских сточных вод. // Докл. 3-го Всесоюзного Совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве (Ленинград, 26-28 июня 1979г.). Л.: НИИЭФА им. Д.В.Ефремова, 1979. Т 2. С. 172.
88. Долин П.И. Применение ускоренных электронов для обеззараживания сточных вод животноводческих комплексов. // Докл. 3-го Всесоюзного Совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве (Ленинград. 26-28 июня 1979г.). Л.: НИИЭФА им. Д.В.Ефремова, 1979. Т.2. С. 271.
89. Подзорова Е.А., Бахтин О.М. Способ очистки жидкостей // Патент РФ №2116256.28.06.1996.
90. Подзорова Е.А. Очистка коммунальных сточных вод облучением ускоренными электронами в потоке аэрозоля. // *Химия высоких энергий*. 1995. Т. 29, № 4. С. 280.
91. Канаев Г. Г., Кухта В. Р., Лопатин В. В. и др. Высоковольтный импульсный генератор для электроразрядных технологий / Канаев Г. Г., Кухта В. Р., Лопатин В. В., Нашилевский А. В., Ремнев Г.Е, Уемура К., Фурман Э. Г. // *ПТЭ*. 2010. № 1. С. 105–109.
92. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. 2-е изд., перераб. и доп. Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1983. 264 с.
93. 411218.011 РЭ. Измеритель иммитанса Е7-21: Руководство по эксплуатации. 2002.
94. МП.МН 1153-2002. Измеритель иммитанса Е7-21: Методика поверки. 2002.
95. Москалев В.А., Сергеев Г.И., Шестаков В.Г. Измерение параметров пучков заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1980. 156 с.
96. Шкуратник В.Л. Измерения в физическом эксперименте: учебное пособие / В. Л. Шкуратник. М.: Изд-во Московского гос. горного ун-та, 1996. 270 с.
97. Окунь Н.Б. Измерение разрядных токов поясами Роговского // *ПТЭ*. 1968. № 6. С. 120–126.
98. Степовик А. П., Хмельницкий Д. В. Диагностика мощных пучков электронов с помощью калориметров полного поглощения // *Прикладная механика и техническая физика*. 2003. Т. 44, № 262. С. 4–11.
99. Рогельберг И. Л., Бейлин В. М. Сплавы для термопар: Справ. М.: Металлургия, 1983. 360 с.
100. Генералова В.В., Гурский М.Н. Дозиметрия в радиационной технологии. М.: Издательство стандартов, 1981. 184 с.
101. Гончаров Д.В., Ежов В.В., и др. Исследование распределения плотности энергии сильнооточного импульсного электронного пучка // *Известия ТПУ*. 2005. Т. 308, № 6. С. 76–80.

102. Pushkarev A., Kholodnaya G., Sazonov R. et al. Thermal imaging diagnostics of high-current electron beams // *Review of Scientific Instruments*. 2012. Т. 83, № 10. Р. 103301.
103. Оцуки Е.Х. Взаимодействие заряженных частиц с твердыми телами. М.: Мир, 1985. 248 с.
104. СанПиН 2.6.1.2573–2010 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ».
105. СанПиН 2.6.1.2523–09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». СанПиН 2.1.5.980–00.
106. ГОСТ 27632–88. Ускорители заряженных частиц промышленного применения. М.: Изд-во стандартов, 1998. 7 с.
107. ДКС -1123: Руководство по эксплуатации.
108. Канаев Г.Г., Фурман Э.Г. // *ПТЭ*. 1987. № 5. С. 95–97.
109. Жарова Н. В., Ратахин Н. А., Саушкин А. В. Быстрый вывод энергии из сильноточного импульсного конденсатора НСЕІсар50-0,1 с помощью псевдоискрового разрядника TDI1-50K/50 // *ПТЭ*. 2006. № 3. С. 141–148.
110. Bochkov V.D., Botchkov D.V., Dyagilev V.M. et al. High power pseudospark switches for pulsed power // *proceeding of: Power Modulator Symposium, 2002 and 2002 High-Voltage Workshop*. 2002. doi:10.1109/MODSYM.2002.1189518.
111. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М., 1990. 624 с.
112. Л. А. Бессонов. Теоретические основы электротехники. 9-е изд. М.: Высшая школа, 1996.
113. Кайканов М.И. Исследование генерации импульсного электронного пучка в диоде с высоким импедансом: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2013.
114. Герасимов А.И. Водно-растворные высоковольтные резисторы. Разработка, исследования, применение (обзор) // *ПТЭ*. 2006. № 1. С. 5–32.
115. Матханов П. Н., Гоголицын Л. З. Расчёт импульсных трансформаторов. М.: Энергия, 1980. 112 с.
116. Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. 208 с.
117. Каштанов В. В. Анализ фронта выходных импульсов трансформатора. *Радиотехника*, 1995. Т. 12. С. 38–40.
118. Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И. и др. // *ПТЭ*. 2004. № 3. С. 130–134.
119. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. 488 с.
120. А. Н. Матвеев. Электричество и магнетизм. Первое изд. М.: Высшая школа, 1983. 463с.

121. Пушкарев А.И. Исследование первеанса планарного диода с многоострийным катодом // ЖТФ. 2008. Т. 78, Вып. 3. С 78-82.
122. Pushkarev A.I., Remnev G.E., Ezhov V.V. и др. Research of Energy Equilibrium of Planar Diode with Explosive Emission Cathode // Изв. вузов. Физика. 2006. Т.49., №11 (Прил.). С. 144–147.
123. Котов Ю.А., Литвинов ЕА, Соковнин С.Ю. и др. Металлокерамические катоды для ускорителей электронов // Доклады РАН. 2000. Т. 370. № 3. С. 332–335.
124. Савицкий А.П., Прибытков Г.А., Вагнер М.И. и др. Порошковые композиционные материалы "металл-неметалл" для взрывоэмиссионных катодов// Известия ТПУ. 2010. Т. 317, № 2. С. 83–89.
125. Roy A., Menon R., Mitra S. et al. Impedance collapse and beam generation in a high power planar diode // Journal of applied physics. 2008. V. 104, № 1. P. 014904.
126. Saveliev Yu., Sibbett W., Parkes D. Perveance of a planar diode with explosive emission finite-diameter cathodes // Applied physics letters. 2002. V.81, № 13. P. 2343–2345.
127. Пушкарев А.И., Исакова Ю.И., и др. Влияние краевых эффектов на работу планарного диода с взрывоэмиссионным катодом // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54, № 11-3. С. 60–67.
128. Егоров И. С. Оптимизация параметров электронного диода частотного сильноточного ускорителя [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 1–8. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/113-10819> (09.01.2015).
129. Vochkov V.D., Dyagilev V.M., Ushich, V.G. et al. Russian pseudospark switches: condition and prospects // Digest of Technical Papers. 12th IEEE International Pulsed Power Conference 27-30 June 1999. 1999. Vol. 2. P. 1275–1278. doi:10.1109/PPC.1999.823757.
130. Никишкин В.И., Иванов А.С., Муравьев Г.В., Свиныин М.П. Выводное окно ускорителей электронов // Патент РФ № 1688775. 09.11.88.
131. Полосков А. В., Есипов В. С., Кайканов М. И. Исследование местной биологической защиты частотного ускорителя электронов ASTRA-M [Электронный ресурс] // Перспективы развития фундаментальных наук: Сборник научных трудов IX Международной конференции студентов и молодых учёных, Томск, 24-27 Апреля 2012. - Томск: ТПУ, 2012. С. 188–190.
132. 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.
133. Кайканов М. И., Ремнёв Г. Е., Юдина Н. В. Исследование реологических свойств нефти при облучении импульсным сильноточным электронным пучком / И. С. Егоров, Ю. В. Лоскутова // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 6-2. С. 37–41.
134. Kolokolov D. Y., Egorov I. S., Kaykanov M. I. et al. Treatment of industrial and household waste water with the pulse electron accelerator-based setup // 3rd International Congress on Radiation

Physics and Chemistry of Condensed Matter, High Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Abstracts, Tomsk, September 17-21, 2012. Tomsk: TPU Press, 2012. P. 263.

135. Remnyov 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.

Приложение А
на 2 листах, лист 1

УТВЕРЖДАЮ
И. о. главного инженера - первого заместителя
генерального директора
ООО «Газпром трансгаз Томск»

И.А. Кузнецов
И.А. Кузнецов
20.12.12 г.



Акт

внедрения научно-технической продукции (НТП)

№ 11 от " 29 " декабря 2012 г.
по договору № 01/0531/08 от " 20 " июня 2008 г.

«Опытная установка по очистке промышленных и хозяйственных стоков»

(наименование (предмет) договора, № и наименование этапа договора)

Институт физики высоких технологий федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Контрагент

(Полное наименование контрагента по договору)

Функциональный заказчик

Департамент по транспортировке, подземному хранению и
использованию газа ОАО "Газпром".

Отдел главного энергетика ООО "Газпром трансгаз Томск".

составил настоящий акт о том, что выполненная работа удовлетворяет требованиям технического задания,
соответствует условиям договора и внедрена

№ п/п	Наименование строки	Характеристика строки
1	2	3
1	Наименование НТП	Опытная установка по очистке промышленных и хозяйственных стоков (далее - ОУОПХС).
1.1	Вид результата	Отчет, ОУОПХС, конструкторская и техническая документация (технические условия, руководство по эксплуатации, формуляр), разрешительная документация (сертификат соответствия в системе ТР), технические решения (изобретение).
2	Стоимость, руб., коп.	7 169 274,00
2.1	Кроме того, НДС, руб., коп.	Не облагается
2.2	Перечень актов сдачи-приемки НТП	Акт №1 от 31.08.08 г. (2 000 000 руб. 00 коп.), Акт №2 от 19.12.2008 г. (1 500 000 руб. 00 коп.), Акт №3 от 31.04.09 г. (2 000 000 руб. 00 коп.), №4 от 28.12.2009 г. (3 320 000 руб. 00 коп.), №5 от 31.12.2009 г. (250 000 руб. 00 коп.).
3	Возможность демонстрации использования результата НИОКР	Да
4	Структурное подразделение и/или организация ОАО «Газпром», использующие НТП	ООО "Газпром трансгаз Томск"
5а	Документы о правовой регистрации НТП:	
5.1	Наименование патента/заявки	Заявка на выдачу патента на изобретение "Способ очистки сточных вод".
5.2	Регистрационный № патента/заявки	№2011133121/05 (048842)
5.3	Приоритет патента/заявки (дата подачи заявки)	05.08.2011

5.4	Расходы на государственную регистрацию прав, руб., коп.	6 250,00
5.5	Номер и дата платежного (-ных) поручения (-ий)	№ 17006 от 17.06.11, №17007 от 17.06.11, №36037 от 18.10.12
6	Область внедрения (использования): - в производстве продукции; - при выполнении работ или оказании услуг; - в управлении организации	Реконструкция очистных сооружений компрессорных станций ООО «Газпром трансгаз Томск». Подготовка к серийному производству ОУОПХС для оснащения компрессорных станций магистральных газопроводов, состоящего из установки пучковой очистки и стерилизации стоков (базовый блок), специализированного источника питания установки, пульта управления, системы автоматики и программного интерфейса, обеспечивающих автоматическую работу оборудования.
7	Срок полезного использования	Основное средство: 61 месяц (5 лет 1 мес.). Нематериальный актив (изобретение): 20 лет.
8	Планируемый эффект от внедрения (использования)	Факторами экономической эффективности являются: - снижение степени загрязнения сточных вод; - снижение затрат на новое строительство и реконструкцию используемых в наше время установок на биологических методах очистки стоков. Так, например, стоимость блочно-модульной установки очистки стоков биологического типа составляет 20,7 млн. руб., а стоимость разработки составляет 6,4 млн. руб., в т.ч. стоимость непосредственно ОУОПХС - 2 млн.руб. Ожидаемый экономический эффект при строительстве КОС проекта "Газопровод Якутия - Хабаровск - Владивосток I очередь" составит 65,5 млн. руб. Дополнительным фактором экономии является снижение эксплуатационных затрат на эксплуатацию очистных сооружений, стоимость земель под сооружениями и т.п. Разработанная ОУОПХС оборудования может быть использована также на производственных базах и других аналогичных сооружениях ОАО "Газпром" при проведении различного рода работ.
9	Заключение функционального заказчика	В ходе работ изготовлен макет оборудования по очистке промышленных и хозяйственных стоков, проведены исследования с реальным составом стоков, определение химического состава стоков и эффективности очистки импульсно-пучковым методом на ПП «Володино», получено положительное решение о выдаче патента № 2011133121/05 (048842) от 20.10.2012 на способ очистки стоков с использованием разработанного оборудования, разработаны технические условия и комплект эксплуатационной документации (паспорт, руководство по эксплуатации), разработана конструкторская документация на ОУОПХС, разработан и изготовлен ОУОПХС, разработанная ОУОПХС сертифицирована в системе технических регламентов.

Начальник технического отдела

A.C. Маслов

Главный энергетик - начальник отдела
главного энергетика

B.A. Сяр