

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Лавренин Виктор Анатольевич

**МАЛОГАБАРИТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ГЕНЕРАТОР
НЕЙТРОННОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЙ
НА БАЗЕ КАМЕРЫ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА**

Специальность 1.3.13 – «Электрофизика, электрофизические установки»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва, 2023

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» и во ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»

Научный руководитель:

Юрков Дмитрий Игоревич

доктор технических наук

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова», заместитель директора – первый заместитель главного конструктора – руководитель научно-производственного центра импульсной техники

Официальные оппоненты:

Сапожников Михаил Григорьевич

доктор физико-математических наук, профессор

Объединенный институт ядерных исследований, главный научный сотрудник

Чебышов Сергей Борисович

доктор технических наук, профессор

АО «СНИИП», первый заместитель генерального директора по научной работе - главный конструктор

Гавриш Сергей Викторович

доктор технических наук

ООО «НПП «Мелитта», начальник отдела источников света

Защита состоится 07 декабря 2023 г. в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.1.06 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

МИФИ.1.06, к.т.н.



М.В. Лалаян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Среди импульсных источников ионизирующего излучения (ИИ) одними из самых распространенных являются установки на базе явления пинчевания высокотемпературной плазмы. Пинчевые установки обеспечивают генерацию импульсных излучений разных типов с характерной длительностью порядка десятка наносекунд и обеспечивают большую импульсную плотность потока ИИ за счёт предельных значений плотности и температуры плазмы в пинчах. Разряд типа плазменный фокус (ПФ) отличается наибольшей интенсивностью ИИ по отношению к вкладываемой в разряд энергии и относительно простой реализации накопителя энергии. Это позволяет создавать достаточно компактные установки с большим выходом импульсных ИИ. Отличительной особенностью разряда ПФ является специальная конструкция газоразрядной камеры для реализации разряда.

Исследования разряда типа ПФ и установок на его основе проводятся, начиная с 70-ых годов прошлого века. За это время показано, что в зависимости от конструкции накопителя энергии, камеры ПФ и типа газового заполнения камеры нецилиндрический z-пинч в камерах ПФ является источником широкого набора излучений – мягкого и жесткого рентгеновского излучения (РИ), нейтронного излучения (при использовании дейтерия D и/или трития T), излучения в ультрафиолетовом и видимом спектрах, высокоэнергетичных электронных и ионных пучков, кумулятивных плазменных струй. Наибольшее распространение установки ПФ получили как источники импульсного нейтронного излучения. Различные исследовательские установки ПФ обеспечивают уровень выхода нейтронов от 10^4 до 10^{13} нейтр./имп., длительность импульса от 10 до 100 нс, энергию нейтронов 2,5 МэВ либо 14 МэВ. Такие установки применяются для изучения взаимодействия импульсного излучения с веществом и изучения закономерностей развития пинчевых разрядов.

В настоящее время для научно-исследовательских задач разработано большое число установок ПФ. Однако поскольку ПФ обеспечивает крайне высокие

уровни выхода ИИ при компактности и малогабаритности самих установок, то разряд типа ПФ находит применения и в ряде практических задач. Для этого разрабатываются генераторы импульсного нейтронного или рентгеновского излучения на базе камер ПФ. Важными параметрами генераторов, в отличие от исследовательских установок ПФ, являются общий ресурс работы генератора и камер ПФ, сохраняемость свойств камер в течение времени эксплуатации и хранения, транспортабельность и малогабаритность, эргономичность и безопасность в использовании. Фактически единственным производителем нейтронных генераторов на базе камер ПФ является ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова». Во ВНИИА разработана линейка образцов генераторов с выходом нейтронов от 10^6 до 10^{12} нейтр./имп. и длительностью от 10 до 50 нс. Однако поскольку постоянно происходит актуализация научных и производственных задач, то в последние годы появилась потребность в малогабаритных субкилоджоульных импульсных нейтронных и рентгеновских генераторах на базе камер ПФ.

В частности, важной задачей применения генераторов ПФ является их использование в учебном процессе в высших учебных заведениях. Как указано выше, явление ПФ является источником широкого набора импульсных излучений, поэтому ПФ представляет большой интерес для учебного процесса – на одной установке можно практически получать и нейтронное и рентгеновское излучение, электронные либо ионные пучки, и плазменные струи. Учебных установок для генерации нейтронного излучения (основанных на разных принципах работы) достаточно мало, поскольку генерация нейтронов связана с повышенными требованиями к радиационной безопасности. В общем, требования к учебному генератору на камерах ПФ можно сформулировать следующим образом: уровень выхода нейтронов $10^5 \div 10^7$ нейтр./имп. с энергией 2,5 МэВ (для обеспечения требований радиационной безопасности), ресурс работы в тысячи срабатываний, возможность регулировки режимов генерации (нейтроны, рентген) и наличие систем регистрации излучений, эргономичность и простота в обслуживании.

Разработка такого генератора позволит применять генераторы с камерами ПФ в учебном процессе и при проведении научных исследований в высших учебных заведениях.

Цель работы заключается в обосновании конструкторских решений для разработки малогабаритного импульсного нейтронного и рентгеновского генератора на базе камер ПФ.

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

- научно обосновать электротехнические требования к генератору импульсных токов в составе генератора для обеспечения генератором уровня выхода нейтронного излучения $10^5 \div 10^6$ нейтр./имп.;
- разработать конструкцию камер ПФ для малогабаритного генератора, обеспечивающих генерацию нейтронного и рентгеновского излучений;
- провести математическое моделирование работы камер ПФ субкилоджоульного диапазона и определить оптимальные геометрические параметры камер;
- разработать систему диагностики электротехнических параметров генератора и выходных параметров ИИ;
- определить максимально достижимые параметры нейтронного и жесткого рентгеновского излучения разработанных камер ПФ;
- научно обосновать технические решения в камере ПФ для достижения максимального ресурса работы камер ПФ и сохраняемости камер в течение длительного времени хранения;
- реализовать предлагаемые решения в макетном образце генератора с камерами ПФ;
- экспериментально подтвердить расчетные электротехнические режимы работы камеры ПФ, а также ресурс, срок сохраняемости и нейтронный выход.

Научная новизна

1. Проведены расчеты работы камер ПФ с разными геометрическими размерами и разными емкостными накопителями. Результаты расчета позволили

выбрать оптимальные размеры камеры ПФ. Это позволило сразу перейти к разработке КД опытного образца камеры ПФ субкилоджоульного диапазона.

2. Обоснованы и реализованы новые технические решения в камере ПФ для достижения максимального ресурса работы камер ПФ и сохраняемости выходных параметров камер в течение длительного времени хранения.

3. Обоснованы электротехнические требования к генератору импульсных токов в составе малогабаритного генератора субкилоджоульного диапазона для обеспечения генератором уровня выхода нейтронного излучения $10^5 \div 10^7$ нейтр./имп.

4. Научно обоснована и разработана камера ПФ с пониженным выходом рентгена, реализована в макетном образце, и получен патент на полезную модель.

Практическая значимость

1. Спроектирован и изготовлен малогабаритный импульсный генератор нейтронов субджоульного диапазона с выходом нейтронов $10^6 - 10^7$ нейтр./имп. энергии 2,5 МэВ, при средней длительности импульса нейтронов 15 нс, генератор также генерирует рентгеновские импульсы длительностью 2-4 нс. Ресурс генератора составляет более тысячи включений.

2. Разработана, испытана и применяется в составе генератора нейтронов камера ПФ Т19-ЛЗ16, ресурс камеры составляет более тысячи включений.

3. Генератор используется при проведении НИР как наносекундный импульсный источник нейтронов при изучении быстропротекающих процессов, а также при обучении студентов в курсах: нейтронная физика, импульсные источники нейтронов, детекторы нейтронов и т.д.

4. Разработана конструкция газоразрядной камеры плазменного фокуса как источника нейтронного излучения с пониженным выходом жесткого РИ. Получен патент на полезную модель № 214548.

Полученные в диссертации результаты используются при проведении научно-исследовательских и лабораторных работ на кафедре прикладной ядерной физики ИФТИС НИЯУ МИФИ.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод проектирования камеры ПФ: на основе расчетной программы «МГД модель» для заданных электротехнических параметров емкостного накопителя генератора нейтронов определяются оптимальные геометрические размеры камеры ПФ путем согласования времени достижения максимума тока в разрядном контуре генератора с временем движения токовой плазменной оболочки в камере ПФ от момента формирования до сжатия в пинч в конце анода, что позволяет исключить из технологии изготовления камеры длительный этап предварительного макетирования.

2. Научно обоснованные технологические приемы, использованные в процессе изготовления камеры ПФ малогабаритного импульсного нейтронного генератора, для обеспечения требуемых свойств данной камеры, а именно:

- применение в составе конструкции камеры насыщенного D или D-T смесью генератора газа на основе пористого титана и подбор режимов его работы для обеспечения ресурса камеры более чем 1000 срабатываний, увеличения срока сохранности камеры, а также для обеспечения радиационной безопасности при работе с D-T наполнением камеры;

- введение в объём камеры ПФ малых количеств инертных газов (Ar) в количестве $\sim 1\div 5\%$ от давления с целью повышения стабильности нейтронного выхода, а также снижения зарядного напряжения.

3. Научно обосновано создание малогабаритного генератора субкилоджоульного диапазона энергий с нейтронным выходом $10^5\div 10^6$ нейтр./имп нейтронов с энергией 2,5 МэВ, и выходом $10^7\div 10^8$ нейтр./имп. 14 МэВ-ных нейтронов. Генератор используется при проведении НИР как импульсный источник нейтронов наносекундной длительности для калибровки сцинтилляционных детекторов нейтронов, а также как импульсный источник жесткого РИ. Ресурс генератора составляет несколько тысяч срабатываний, минимальный интервал между срабатываниями 15 с.

Достоверность результатов, изложенных в работе, подтверждается применением общепризнанных экспериментальных методик, метрологически

аттестованного измерительного оборудования для регистрации электротехнических параметров генератора и выходных параметров ИИ камер ПФ, сравнением и верификацией результатов моделирования с экспериментальными данными.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в работе, получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал непосредственно участие в экспериментальных работах на камерах плазменного фокуса с макетными образцами малогабаритного импульсного нейтронного генератора, включая планирование экспериментов, проведение экспериментов, обобщение и анализ полученных экспериментальных данных, подготовка докладов и презентаций, написание научных работ.

Автором обоснованы выносимые на защиту научные положения, сделаны выводы по работе, которые вносят существенный вклад в понимание физики процессов в работе малогабаритного субкилоджоульного импульсного нейтронного генератора и камер плазменного фокуса из его состава, предложены оригинальные технические решения. Все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично.

Апробация работы

Основные научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях ФГУП «ВНИИА» в 2019, 2020, 2021 годах, II научно-практической конференции «Физико-технические интеллектуальные системы» ФТИС-2023, IX Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2023, научно-технических совещаниях ФГУП «ВНИИА» на площадке НПЦ ИТ.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 работ в рецензируемых изданиях, в том числе 3 статьи в изданиях, включенных в перечень, сформированный Минобрнауки России, 2 научные статьи в научных изданиях, индексируемых в международных

базах данных Scopus и Web of Science, получен 1 патент РФ на полезную модель, выпущен отчет по НИР.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 127 страницах текста, содержит 75 рисунков, 11 таблиц. Библиография включает 88 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и поставлены решаемые задачи, определена научная новизна и практическая ценность работы, приведены защищаемые положения.

В первой главе рассмотрены скейлинговые зависимости параметров нейтронного и рентгеновского излучений от амплитуды разрядного тока (I) на базе генераторов разработки ВНИИА и мирового опыта. По зависимостям выхода нейтронов Y_N от тока разряда видно, что для обеспечения уровня выхода нейтронов $10^5 \div 10^6$ нейтр./имп. амплитуда тока должна составлять $100 \div 180$ кА. Параметры длительности импульса нейтронов и жесткого РИ также определяются эмпирически. Известно, что для камер ПФ, работающих при амплитуде токов порядка 300 кА, значения $t_N \sim 20$ нс, $t_{РИ} \sim 5$ нс. В целом для установок ПФ, работающих при токах $300 \div 500$ кА, уровень выхода жесткого РИ составляет порядка десятка и сотен мкЗв. Поэтому при токах $100 \div 200$ кА ожидаемый уровень выхода нейтронов составит единицы и десятки мкЗв, что является удовлетворительным с точки зрения требования радиационной безопасности и при этом является достаточным для его достоверной регистрации измерительной аппаратурой. Поэтому стоит ожидать, что для малогабаритного генератора длительности будут сравнимы с приведенными выше значениями, а их количественное определение также является одной из научных целей работы.

Далее проведен обзор субкилоджоульных исследовательских установок ПФ, используемых в качестве источников импульсного нейтронного излучения. Запасаемая энергия установок, обеспечивающих выход порядка $Y_N = (10^5 \div 10^7)$

нейтр./имп. с энергией 2,5 МэВ, лежит в пределах $50 \div 2500$ Дж. Проведенный обзор показывает, что на установках субкилоджоулевого класса возможно обеспечить выход нейтронов от 10^5 до 10^7 нейтр./импульс. При этом значения токов, протекающих через плазму, варьируются в установках от 40 до 190 кА, а относительное среднее квадратичное отклонение (ОСКО) выхода нейтронов варьируются от 30 до 80 %, что говорит о нестабильности работы установок ПФ в режиме малых токов. Для установок с энергией $W > 2$ кДж обычно ОСКО лучше, чем при малых энергиях: $320 \text{ Дж} \rightarrow \text{ОСКО} = 80\%$, $2000 \text{ Дж} \rightarrow \text{ОСКО} = 30\%$. Однако в литературе приводятся результаты только по отдельным сериям срабатываний. Немного информации можно найти по массогабаритным характеристикам установок, однако, установки с выходами нейтронов порядка 10^5 и ниже имеют массу порядка 50 кг (накопитель с камерой ПФ).

В главе также рассмотрены генераторы с камерами ПФ производства ВНИИА, относящиеся к классу килоджоульных импульсных нейтронных генераторов – ИНГ-103, ИНГ-103М, ИНГ-104. Наиболее близкий по энергетике генератор ИНГ-103М включает в себя разрядный модуль с блоком питания и управления генератором в одном корпусе, пульт управления и камеру типа ПФ6. Разрядный модуль состоит из высоковольтного импульсного конденсатора, коммутатора (газонаполненные тиратроны) и токоподвода. Генераторы позволяют работать в режиме одиночных срабатываний каждые 6 минут.

Стабильность генерации излучения снижается по мере снижения амплитуды разрядного тока и передаваемой в камеры ПФ энергией. Этот результат, видимо, связан с тем, что при низких значениях разрядного тока токоплазменная оболочка (ТПО) уже не может эффективно сжиматься в пинч. Поэтому одной из задач диссертации является разработка конструкции камеры ПФ для малогабаритного генератора с минимальными достижимыми значениями ОСКО и апробация путей снижения ОСКО.

Для обеспечения требований радиационной безопасности в генераторах ВНИИА используется методика производства отпаянных камер ПФ, имеющих в своем составе генератор газа (ГГ) на основе пористого титана. В таких камерах

рабочий газ (D или DT) находится в связанном состоянии в кристаллической решётке титана и выделяется путём подачи тока накала на нагреватель генератора газа только на время работы с камерой, после работы газ поглощается обратно титаном. При этом решена проблема обеспечения требований радиационной безопасности в процессе эксплуатации камер с DT наполнением, а также повышается ресурс работы камер ПФ и срок их сохраняемости за счет того, что ГГ поглощает большую часть выделяющихся в камере ПФ примесей. Для рассмотренных генераторов регламентируемый срок сохраняемости камер ПФ составляет 4 года.

Эксплуатация малогабаритного генератора в научных целях подразумевает большое число постоянных срабатываний, так как генератор должен быть задействован в учебном процессе (лабораторные работы, научно-исследовательская деятельность) в течение учебного года, что требует повышения ресурса до нескольких тысяч срабатываний.

Таким образом, рассмотрев особенности и характеристики импульсных нейтронных генераторов на базе камер ПФ килоджоульного диапазона и исследовательских лабораторных установок субкилоджоульного диапазона, были сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена разработке конструкции камеры ПФ малогабаритного импульсного нейтронного генератора. Конструкция камер ПФ фактически уникальна для каждого генератора и установки. Она зависит как от электротехнических параметров конкретного ГИН для согласования движения ТПО с протеканием разрядного тока в контуре, так и от параметров газового наполнения межэлектродного промежутка (рабочее давление, тип газа, состав газа и количество примесей). Поэтому в данной главе сформулированы основные требования, предъявляемые к камере ПФ, с точки зрения проектирования конструкции камеры.

Проведено моделирование работы различных конструкций камер ПФ для малогабаритного генератора с помощью двумерной магнитогидродинамической (МГД) модели расчета движения ТПО в камерах ПФ. Для определения

оптимальной длины анода в программе проведено моделирование работы камер с различной высотой анода (H_a) в диапазоне от 5 мм до 70 мм – рисунок 1. При этом использовано характерное значение напряжения $U = 22$ кВ, рабочий газ – дейтерий, значения рабочего газа 2, 7 и 12 Торр. Давление $p = 12$ Торр является характерным рабочим давлением камер килоджоульных генераторов ВНИИА, а 2 и 7 Торр характерные рабочие давления камер ПФ, работающих при токах $100 \div 200$ кА, описанных в литературе. Результаты моделирования позволили получить зависимости тока особенности $I_{oc}(H_a)$ двух типов накопителей малогабаритного генератора – 4 мкФ и 2 мкФ. При использовании накопителя большей емкости и $p = 12$ Торр максимальные значения I_{oc} достигаются только при $H_a < 20$ мм. При снижении рабочего давления до 7 Торр диапазон максимального $I_{oc} > 150$ кА достигается при значениях H_a до 30 мм, а при $p = 2$ Торр фактически во всем диапазоне H_a значение I_{oc} не снижается ниже 150 кА.

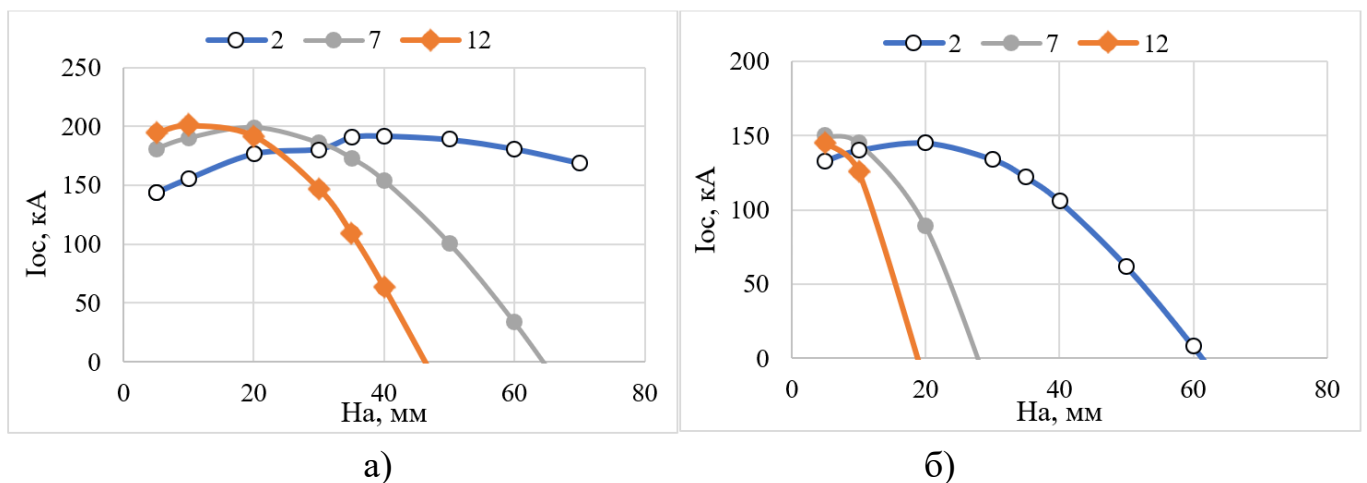


Рисунок 1 – Результаты расчетов разрабатываемой камеры в МГД-коде:
а) – 4 мкФ, б) – 2 мкФ

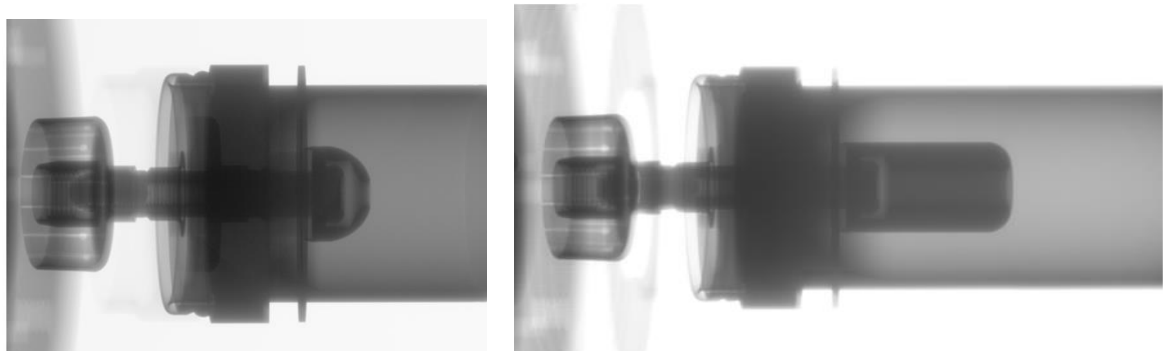


Рисунок 2 – Конструкция макетных камер ПФ для малогабаритного импульсного нейтронного генератора: а) – $H_a = 20$ мм, б) – $H_a = 35$ мм

На основе проведенных расчетов предложены конструкции камеры ПФ малогабаритного генератора с $H_a = 20$ мм и 35 мм, и изготовлены макетные образцы камер – Т19-Л316. Конструкция камер приведена на рисунке 2.

На данных макетных камерах проведены серии срабатываний с использованием макета малогабаритного генератора с емкостью накопителя четыре мкФ. Заполнение внутреннего объема камер рабочим газом проводилось на вакуумном стенде через вентиль. Экспериментально показано, что предложенные конструкции позволяют получать выход нейтронов на уровне 10^6 нейтр./имп. на макете малогабаритного генератора. При этом конструкция с $H_a = 20$ мм показывает лучшую стабильность генерации нейтронов в отдельных сериях из пяти–десяти последовательных срабатываний – результаты срабатываний приведены на рисунке 3.

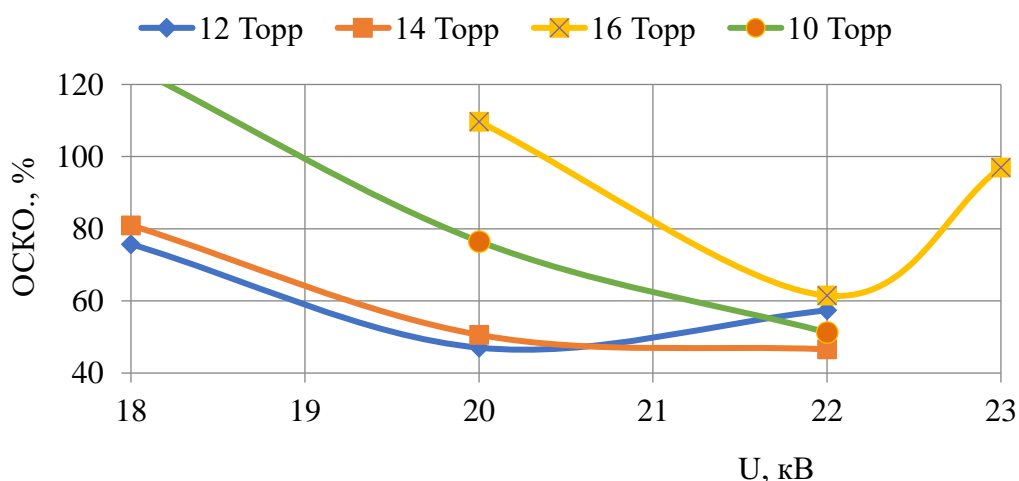


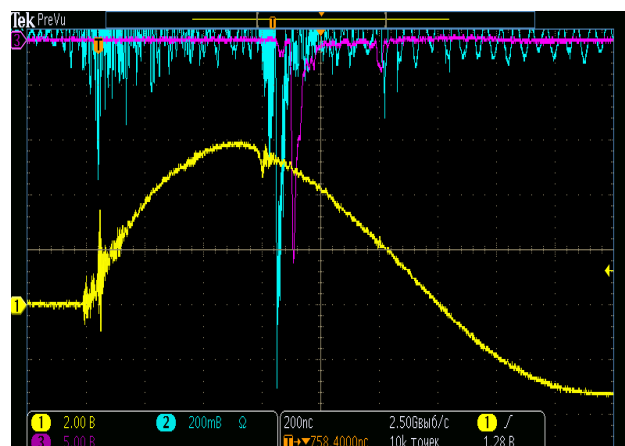
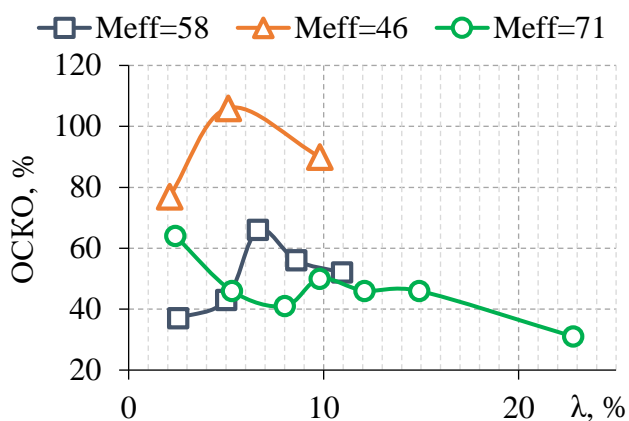
Рисунок 3 – Результаты срабатываний камеры Т19-Л316 № 0344 в составе макетного генератора при работе на чистом дейтерии

Для изучения вопроса возможности повышения стабильности генерации нейтронного излучения и снижения уровня рабочего напряжения генератора (для повышения суммарного ресурса его работы) было проведено изучение влияния добавок примесей тяжелых инертных газов на работу камер ПФ. Введение примесей тяжелых инертных газов к D или D-T наполнению камер ПФ позволяет повысить уровень выхода нейтронов в камерах ПФ. Вводятся от 1 до 10 % инертных газов относительно суммарного давления рабочего газа. За счет введения тяжелых примесей в камеру ПФ можно обеспечивать заданный уровень выхода

нейтронов при более низких значениях зарядного напряжения, и соответственно амплитуды разрядного тока. То есть, например, если введение примеси при амплитуде тока 200 кА увеличивает средний выход нейтронов с $5 \cdot 10^6$ нейтр./имп. до нескольких единиц на 10^7 нейтр./имп., то можно рассчитывать, что уровень выхода $5 \cdot 10^6$ нейтр./имп. при таком же наполнении камеры будет обеспечиваться при токах на уровне 100 кА. В качестве основного рабочего газа использован D_2 , а в качестве примеси аргон (Ar). Варьирование содержания тяжелых примесей проводилось по двум параметрам: общей эффективной массы газовой смеси $M_{\text{eff}} = M_{D_2} \cdot p_{D_2} + M_{\text{gas}} \cdot p_{\text{gas}}$, где p_{D_2} – давление D в камере ПФ (торр), p_{gas} – давление инертного газа в камере ПФ (торр), M_{D_2} – атомная масса D_2 (а.е.м.), M_{gas} – атомная масса инертного газа (а.е.м.); процентному содержанию примеси тяжелого газа $\lambda = p_{\text{gas}} / (p_{D_2} + p_{\text{gas}})$ в общей газовой смеси по давлению. Экспериментально показано, что выход нейтронов на уровне 10^6 нейтр./имп. обеспечивается уже при амплитуде разрядного тока $130 \div 140$ кА, что на 50 кА меньше, чем при чистом дейтериевом наполнении камеры Т19-Л316.

Анализ экспериментальных данных с точки зрения влияния примеси Ar на стабильность генерации нейтронного излучения камерой Т19-Л316 показал, что в некоторых режимах работы ОСКО достигало 100 %, как и в случае работы камеры при чистом дейтериевом наполнении, но наблюдались режимы с ОСКО на уровне 40–50 %. Причем при повышении значения эффективной массы M_{eff} значения ОСКО снижаются. Наиболее стабильная генерация наблюдается при $M_{\text{eff}} = 71$, причем для любого соотношения $p(\text{Ar}) / (p(D_2) + p(\text{Ar}))$ ОСКО лежит в диапазоне от 30 до 60 %. Зависимости ОСКО среднего выхода нейтронов от процентного содержания Ar в D_2 наполнении камеры показаны на рисунке 4а, а характерные осциллограммы при срабатываниях камеры Т19-Л316 (кривая разрядного тока, форма импульсов нейтронов) на рисунке 4б.

Дополнительно экспериментально показано, что длительность импульса нейтронного излучения макетной камеры малогабаритного генератора лежит в диапазоне от 5 до 20 нс и не зависит от уровня выхода нейтронов и от наличия примеси Ar.



а)

б)

Рисунок 4 – Результаты работы камеры T19-Л316 при наполнении $D_2 + Ar$: а) – зависимость ОСКО выхода нейтронов камеры от процентного содержания Ar в D_2 наполнении камеры, б) – характерная осциллограмма при срабатывании T19-Л316

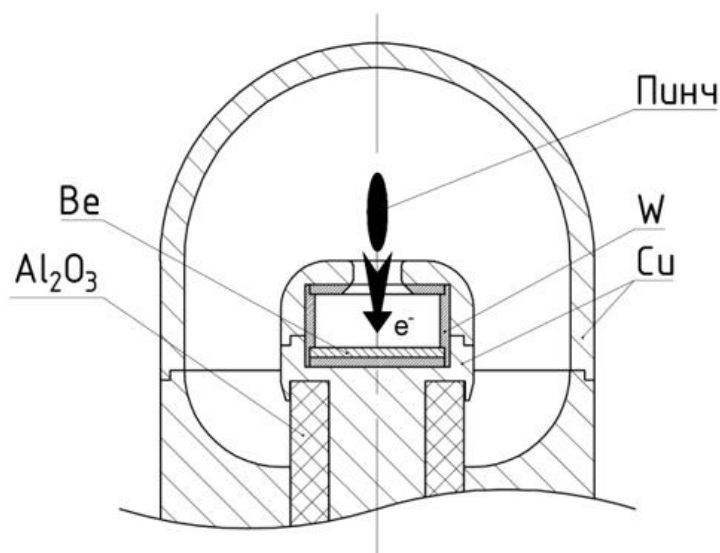


Рисунок 5 – Конструкция камеры ПФ со встроенным поглотителем жесткого РИ

На макетных камерах также проведено исследование уровня жесткого РИ, показано, что выход жесткого РИ за одно срабатывание составляет единицы мкГр и не зависит от уровня выхода нейтронного излучения. Для нивелирования влияния жесткого РИ при использовании генератора в качестве источника импульсного нейтронного излучения разработана конструкция макетной камеры малогабаритного генератора, исключая генерацию жесткого РИ при срабатываниях за счет использования внутри анода диска-мишени из материала с низким Z и цилиндрического экрана из материала с большим Z вокруг диска-мишени. Предложенное решение может быть распространено на все типы камер

ПФ, выпущен патент на полезную модель «Плазменный источник проникающего излучения». Конструкция такой камеры приведена на рисунке 5.

Третья глава посвящена изучению работы камер Т19-Л316 с блоком ГГ. Поскольку ресурс работы камер ПФ с вакуумным вентилем невелик, после 30–50 включений выход нейтронов уменьшается практически в два раза. Для обеспечения ресурса работы камеры в тысячи срабатываний предлагается дополнить камеру блоком ГГ, что позволит преобразовать макетную камеру с вакуумным вентилем в отпаянный (герметичный) прибор, исключить необходимость использования вакуумного стенда при работе камеры, а также обеспечить безопасную работу с D-T смесью и генерацию 14 МэВ-ных нейтронов, необходимую при использовании малогабаритного генератора в задачах калибровки. Поэтому в данном разделе рассмотрены физические принципы работы ГГ в составе отпаянных камер ПФ, изучены особенности работы ГГ в составе разработанной камеры для малогабаритного генератора, проведены исследования достижимого уровня выхода нейтронов и его стабильности на отпаянном образце камеры Т19-Л316 с ГГ.

Технически камеры с ГГ работают следующим образом: перед включением ГГ подогревают до нужной температуры путем подачи тока накала (до 650мА), и рабочий газ выделяется во внутренний объем камеры на время работы. В процессе работы давление в камере может регулироваться изменением значения тока накала, а после работы ток отключается от нагревателя ГГ, и он поглощает рабочий и примесные газы. Причем полное остывание ГГ занимает 2-3 минуты, а поглощение давления до уровня 0,1 Торр происходит в течение 30 секунд после снятия тока накала.

В зависимости от внутреннего объема камеры ПФ варьируется число параллельно подключаемых газопоглотителей, объединенных в конструкции одного ГГ. Для наиболее близких камер ПФ к разрабатываемой (ПФ6, ПФ7) в блоке ГГ используется один газопоглотитель. Он обеспечивает давление примерно до 15 Торр в объеме камер 100 см³. Внутренний объем Т19-Л316 составляет порядка 70 см³, поэтому использования блока ГГ с одним газопоглотителем должно быть достаточно для использования камеры в рабочем диапазоне давлений. На

основе отработанных решений в камерах ПФ6 и ПФ7 разработана отпаянная конструкция камеры Т19-Л316 с блоком ГГ для малогабаритного генератора. Внешний вид камеры Т19-Л316 с блоком ГГ приведен на рисунке 6.

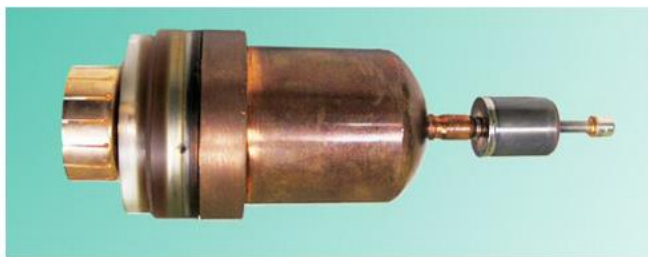


Рисунок 6 – Внешний вид камеры Т19-Л316 с блоком ГГ

Исследовательские испытания образцов камер Т19-Л316 с ГГ, насыщенным чистым D, проведены с целью подтверждения возможности генерации нейтронов на уровне $10^5 \div 10^7$ нейтр./имп камерами Т19-Л316 с ГГ в составе малогабаритного генератора. Малогабаритная камера Т19-Л316 с ГГ позволяет провести исследования, поскольку, во-первых, работа на камере при относительно низких разрядных токах позволяет проводить частые срабатывания камеры (одно срабатывание в 30 сек), что позволяет набрать достоверную экспериментальную статистику результатов. Во-вторых, использование ГГ позволяет легко варьировать давление внутри камеры Т19-Л316 в широких пределах, и тем самым, регулировать момент сжатия ТПО относительно момента времени $T/4$. В этих работах для измерения выхода нейтронного излучения использованы прибор измерения выхода нейтронов ТПИВН61 с блоком ТПИВН61.500 и измеритель нейтронного потока автоматический ИНПА с блоком регистрации БДЗ на основе гелиевых счетчиков.

Результаты работы Т19-Л316 №0344 показывают, что выход нейтронов на уровне 10^6 нейтр./имп. и выше достигается при зарядном напряжении 19 кВ, т. е. при амплитуде разрядного тока около 200 кА (рисунок 7).

В ходе выполнения диссертационной работы разработана и экспериментально отработана методика насыщения блока ГГ камер Т19-Л316 D₂ либо D-T смесью с примесью тяжелого инертного газа, который постоянно находится во внутреннем объеме камеры. Экспериментально подтверждено положительное влияние примеси тяжелого инертного газа в количестве $\sim 0,5$ Торр

для камер Т19-Л316 малогабаритного субкилоджоульного генератора с ГГ на уровень выхода нейтронов и ОСКО выхода нейтронов.

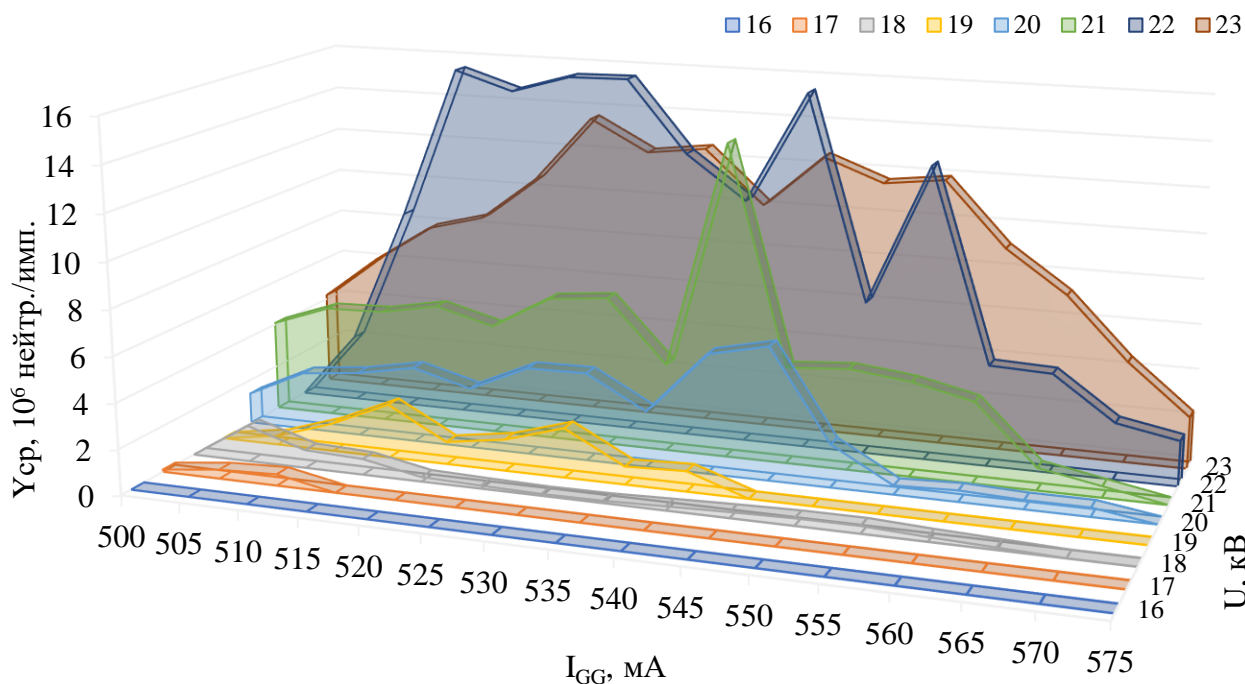


Рисунок 7 – Зависимости выхода нейтронов камеры Т19-Л316 от тока накала блока ГГ I_{GG} и зарядного напряжения U малогабаритного импульсного нейтронного генератора с емкостью 4 мкФ

Для камер Т19-Л316 с блоком ГГ вакуумный стенд не используется, а выделяющиеся в камере в процессе работы примеси поглощаются титановым поглотителем. При этом повторяемость циклов поглощение-выделение ГГ должна обеспечивать одинаковый уровень давления в камере ПФ в зависимости от подаваемого тока накала для сохранения значения времени особенности. Поэтому на отпаянной камере Т19-Л316 с ГГ, насыщенным дейтерием, и давление Ar на уровне 0,5 Торр во внутреннем объеме, была проведена длительная серия срабатываний камеры, позволившая оценить стабильность генерации нейтронного излучения. Результаты серии приведены на рисунке 8, на котором показаны результаты 460-ти срабатываний камеры в одном режиме: $U=18 \text{ кВ}$, $I_n=540 \text{ mA}$. В отдельных срабатываниях выход нейтронов имел достаточно большой разброс от 10^6 до 10^7 нейтр./имп. Но показательной характеристикой является скользящее среднее значение выхода Y_{sr} , показанное на рисунке жирной кривой. Y_{sr} (по 20

срабатываниям) лежит в диапазоне от $3 \cdot 10^6$ нейтр./имп. до $8 \cdot 10^6$ нейтр./имп. Среднее значение выхода по всем срабатываниям составило $5,4 \cdot 10^6$ нейтр./имп. По кривой линейного тренда скользящего среднего (пунктирная линия) на рисунке 8 видно, что значения скользящего среднего в серии лежат в пределах $(5 \div 6) \cdot 10^6$ нейтр./имп., ОСКО Y_{sr} составляет $(15 \div 20)\%$.

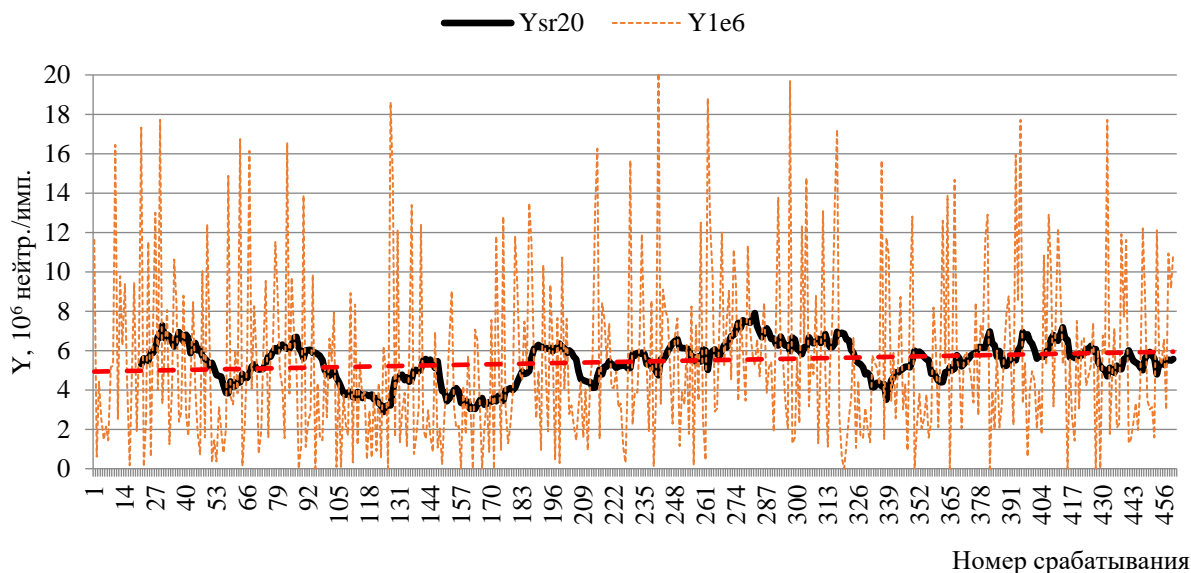


Рисунок 8 – Зависимость выхода нейтронов от номера срабатывания для камеры Т19-ЛЗ16 с ГГ (D_2+Ar)

В четвертой главе рассмотрено использование разработанной камеры Т19-ЛЗ16 с ГГ в составе макета малогабаритного генератора, рассмотрена компоновка и конструкция такого генератора. Отдельно исследован вопрос ресурса работы малогабаритного генератора с учетом реализованных режимов работы камер Т19-ЛЗ16 с насыщенным ГГ и примесью инертного газа Ar в объеме камер. Рассмотрена практическая реализация макета малогабаритного генератора с камерой Т19-ЛЗ16 для его применения в учебных целях на базе кафедры №24 «Прикладная ядерная физика» в НИЯУ «МИФИ», приведены результаты измерений основных характеристик импульсных ионизирующих излучений.

Принципиальные составные части малогабаритного генератора: разрядный модуль для накопления электрической энергии и передачи её в камеру ПФ; блок высоковольтного питания для преобразования электрической энергии от сети 220 В либо от аккумуляторного источника в зарядное напряжение до 25 кВ; блок запуска для формирования управляющего импульса на коммутатор из состава

разрядного модуля; пульт для управления работой генератора; блок управления генератором для связи между командами с пульта и с остальными блоками генератора; блок питания (аккумуляторный либо от сети); набор соединительных жгутов.

На основе проведенных исследований был разработан вариант малогабаритного генератора (СГПФ) с камерой типа Т19-Л316 для её использования в учебном и научном процессе в НИЯУ МИФИ. Назначение данного генератора – отладка работы детекторов импульсного нейтронного и рентгеновского излучения, применяемых на кафедре, проведение лабораторных и научно-исследовательских работ. Внешний вид СГПФ приведен на рисунке 9.

Результаты последовательных срабатываний СГПФ с камерой Т19-Л316 при $E=500$ Дж приведены на рисунке 10. Анализ полученных данных показывает, что преобладающая часть срабатываний лежит в диапазоне 10^6-10^7 нейтр./имп., нулевых срабатываний не наблюдается, средний выход нейтронов составил $\langle Y_N \rangle = (5 \pm 1) \cdot 10^6$ нейтр./имп. (при $p=0,95$).

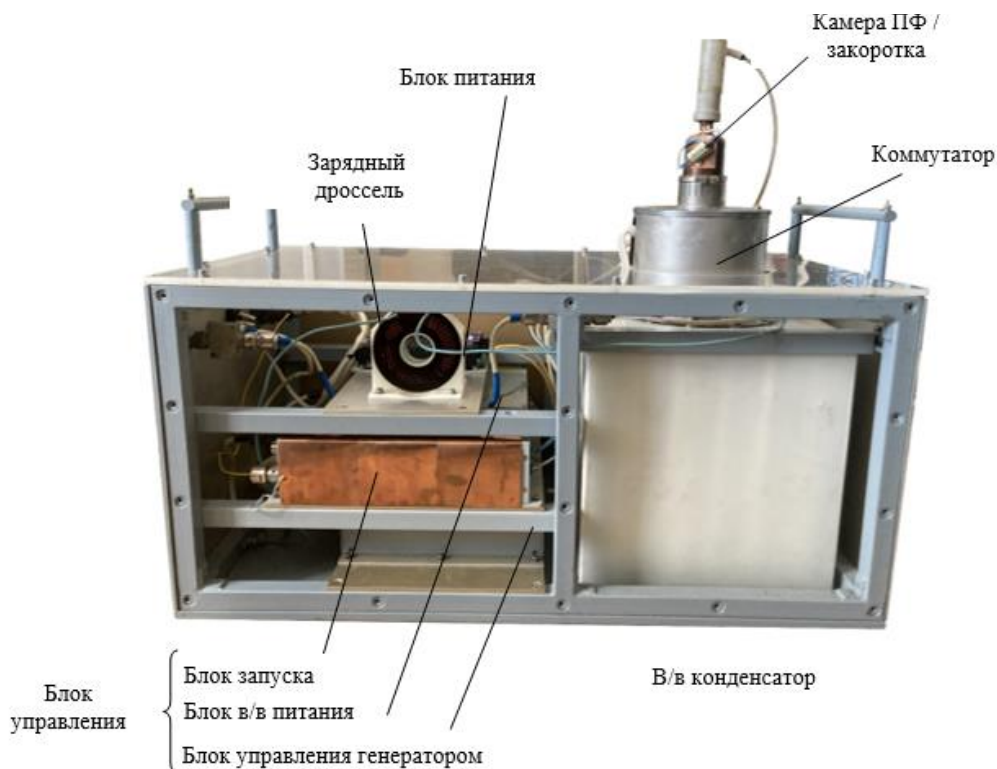


Рисунок 9 – Внешний вид малогабаритного субкилоджоульного генератора СГПФ

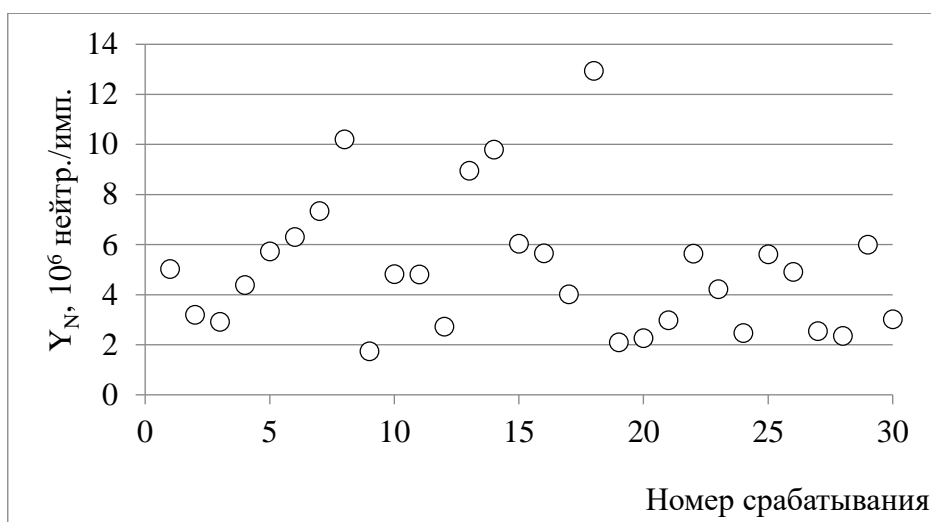


Рисунок 10 – Выход нейтронов генератора СГПФ с накопителем емкостью 4 мкФ в составе разрядного модуля и камерой Т19-Л316

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертации

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведен анализ конструкции камер ПФ, использующихся в генераторах килоджоульного диапазона, и выделены основные технические решения, на базе которых разрабатывалась камера малогабаритного генератора. Предложена конструкция и форма электродов камеры малогабаритного генератора на основе проведенного моделирования в программе МГД-код, оптимальная высота анода камеры малогабаритного генератора лежит в интервале от 20 до 35 мм.

2. Проведены экспериментальные исследования достижимого уровня выхода нейтронов на макетных камерах ПФ малогабаритного генератора. Показано, что выход нейтронов на уровне 10^6 нейтр./имп. достигается при $U=22$ кВ для различных вариантах высоты H_a , однако камера с $H_a=20$ мм продемонстрировала лучшую стабильность генерации нейтронов в отдельных сериях из пяти-десяти последовательных срабатываний (на уровне $50 \div 60$ %).

3. Исследования путей повышения стабильности выхода нейтронов на разработанных макетных камерах показали, что введение оптимального количества Ag к D_2 наполнению позволяет достигать ОСКО выхода нейтронов

уровне 40÷50 %. Оптимальное соотношение между Ar и D достигаются при эффективной массе $M_{\text{eff}} = M_{D_2} \cdot p_{D_2} + M_{\text{gas}} \cdot p_{\text{gas}} = 71$ и процентном содержании примеси $\lambda = p_{\text{gas}} / (p_{D_2} + p_{\text{gas}}) \cdot 100 \% = 5 \div 25 \%$.

4. Разработана конструкция макетной камеры малогабаритного генератора, исключая генерацию жесткого РИ при срабатываниях за счет использования внутри анода диска-мишени из материала с низким Z и цилиндрического экрана из материала с большим Z вокруг диска-мишени. Предложенное решение может быть распространено на все типы камер ПФ, выпущен патент на полезную модель «Плазменный источник проникающего излучения».

5. Разработан и отлажен на нескольких образцах камер Т19-Л316 метод насыщения ГГ D_2 либо D-T смесью с заполнением объема камеры ПФ аргоном до давления $\sim 0,5$ Торр. Экспериментально подтверждено положительное влияние примеси тяжелого инертного газа для камер малогабаритного генератора с ГГ на уровень выхода нейтронов и ОСКО выхода нейтронов.

6. Экспериментально показано, что введение примеси Ar позволяет снизить рабочее напряжение макета малогабаритного генератора с 22 кВ до 13÷19 кВ.

7. Показано, что на разработанной камере с ГГ для малогабаритного генератора ресурс работы составляет не менее 1000 срабатываний. При работе в режиме генерации нейтронов на уровне $5 \cdot 10^6$ нейтр./имп. число нулевых срабатываний составило 4 %, при работе в режиме генерации нейтронов на уровне $5 \cdot 10^5$ нейтр./имп. число нулевых срабатываний составило 15%.

8. На основе существующих и предложенных конструкторских решений выработана компоновка малогабаритного генератора на базе камер ПФ с варьированием запасаемой энергии генератора от сотни до тысячи Дж путём замены высоковольтного конденсатора.

9. Проведенные испытания работы малогабаритного нейтронного генератора СГПФ с камерой плазменного фокуса типа Т19-Л316 подтвердили его работоспособность. Серия включений СГПФ в лабораторных условиях при запасаемой энергии 500 Дж показала, что выход нейтронов с энергией 2,5 МэВ на СГПФ лежит в пределах 10^6 – 10^7 нейтр./имп., средний выход нейтронов составил

$\langle Y_N \rangle = (5 \pm 1) \cdot 10^6$ нейтр./имп. (при $p=0,95$). Средняя длительность нейтронного излучения составила $\langle t_N \rangle = (15,7 \pm 0,3)$ нс.

Список основных публикаций автора по теме диссертации:

1. D.I. Yurkov, V.A. Lavrenin, B.D. Lemeshko, Yu.V. Mikhailov, I.A. Prokuratov, A.K. Dulatov. A Gas Generator Based on Porous Titanium in the Composition of Sealed-Off Plasma Focus Chambers. // Instruments and Experimental Techniques, 2021, Vol. 64, No. 6, pp. 825–829.

2. Д.И. Юрков, В.А. Лавренин, Б.Д. Лемешко, Ю.В. Михайлов, И.А. Прокуратов, А.К. Дулатов. Сохраняемость камер плазменного фокуса с дейтерий-тритиевым заполнением // Успехи прикладной физики, 2021, т. 9, №4, С. 347–358.

3. Д.И. Юрков, В.А. Лавренин, Б.Д. Лемешко, А.Н. Селифанов, А.К. Дулатов. Верификация расчетной модели движения токоплазменной оболочки в камерах плазменного фокуса // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2022, т. 11, №3, С. 260–265.

4. Патент 214548 РФ U1 214 548. Газоразрядная камера плазменного фокуса / Д.А. Андреев, А.В. Голиков, А.К. Дулатов, В.А. Лавренин, Б.Д. Лемешко, Ю.В. Михайлов, И.А. Прокуратов, А.Н. Селифанов, Д.И. Юрков (Россия) – № 2022122904, Заявлено 26.08.2022, Опубликовано 03.11.2022, Бюл. № 31.

5. Д.И. Юрков, В.А. Лавренин, Б.Д. Лемешко, Ю.В. Михайлов, И.А. Прокуратов. Импульсы нейтронного и жесткого рентгеновского излучения камеры плазменного фокуса при разрядных токах 100-200 кА. Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2022, т. 11. № 4, С. 296–304.

6. D.I. Yurkov, V.A. Lavrenin, B.D. Lemeshko, Y.V. Mikhailov, I.A. Prokuratov. Operation of Plasma Focus Chamber as a Part of a Subkilojoule Pulsed Neutron Generator // Plasma Physics Reports, 2023, 49(6), pp. 816–820.