

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Исаев Антон Алексеевич

**УСКОРЕНИЕ НУКЛИДОВ ВОДОРОДА В ПОРТАТИВНЫХ
ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТРОЙСТВАХ СО СКРЕЩЕННЫМИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ**

Специальность: 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

**Научный
руководитель:**

Школьников Эдуард Яковлевич

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электротехника»
НИЯУ МИФИ, г. Москва

**Официальные
оппоненты:**

Долгов Алексей Николаевич

доктор физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник ФГУП «Всероссийский научно-
исследовательский институт автоматики имени
Н.Л. Духова», г. Москва

Ивановский Андрей Владимирович

доктор физико-математических наук, старший научный
сотрудник, заместитель директора Института лазерно-
физических исследований по исследованиям
высокотемпературной замагниченной плазмы –
начальник научно-исследовательского отделения
ФГУП «Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики», г. Саров

Морев Сергей Павлович

доктор физико-математических наук, эксперт
АО «Научно-производственное предприятие «Исток»
имени А.И. Шокина», г. Фрязино

Защита диссертации состоится «22» июня 2022 г. в 15 час 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.01.05 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ds.mephi.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МИФИ.01.05,
кандидат технических наук



М.В. Лалаян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Развитие отдельных направлений прикладной ядерной физики, таких как элементный анализ горных пород, нахождение и идентификация скрытых опасных веществ, нейтронная радиотерапия и радиография, неразрушающий контроль материалов, исследование взаимодействия нейтронов со средой, реакторных сборок и управление ими, имитация нейтронных полей токамака, стелларатора и иных реакторов термоядерного синтеза, требует применения портативных импульсных нейтронных генераторов (ИНГ) нового поколения на базе ускорительных трубок (УТ).

Традиционно выпускаемые атомной промышленностью Российской Федерации УТ не полностью удовлетворяют требованиям, выдвигаемым этими технологиями по ряду физико-технических параметров.

Усовершенствование УТ должно быть направлено на решение задач, связанных с увеличением нейтронного выхода и ресурса, повышением стабильности генерации нейтронов, уменьшением «энергетической цены» нейтрона, габаритов ИНГ, размеров излучающей области, а также длительности нейтронного импульса.

Предметом настоящего диссертационного исследования являлось изучение процессов ускорения нуклидов тяжелого водорода в импульсных вакуумных устройствах со скрещенными электромагнитными полями. Разработка на основе полученных результатов соответствующих технических решений, направленных на создание ИНГ с улучшенными выходными характеристиками, позволяет существенно увеличить их технологические возможности по сравнению с ИНГ, используемыми на данном этапе. Это определяет **актуальность** представленной к защите диссертационной работы.

Целью исследований являлась разработка устройств и изучение процессов импульсного ускорения нуклидов водорода в вакуумных устройствах со скрещенными электромагнитными полями, обеспечивающих принципиальную возможность генерации быстрых нейтронов с рекордными для портативных ИНГ характеристиками по потоку и стабильности.

Для достижения этой цели были решены следующие **задачи**:

1. Разработка, наладка и запуск экспериментального стенда для проведения работ по физическому моделированию импульсных ионных диодов портативных нейтронных генераторов. В состав стенда входят следующие системы: сильноточный генератор импульсного напряжения, вакуумная рабочая камера для размещения ионного диода, макеты ионных диодов, системы регистрации электрических и нейтронных параметров, вакуумная и лазерная системы.

2. Анализ ускорения ионов дейтерия и генерации нейтронов в ионно-плазменных диодах с магнитной изоляцией электронной компоненты азимутально-симметричным полем постоянного магнита.

3. Анализ особенности генерации и ускорения дейтронов и генерации нейтронов в плазменных ИЕС-диодах с магнитной изоляцией на базе систем с постоянным магнитом.

4. Разработка конструкции разрядного узла ионного диода с конической формой нейтронообразующей мишени, симметрично охватывающую спиральный проводник с током для магнитной изоляции вторично-эмиссионных электронов.

5. Экспериментальное исследование плазменных диодов с магнитной изоляцией электронного компонента вторично-эмиссионных электронов магнитным полем, создаваемым спиральным конусным проводником с током.

6. Разработка модели и проведение на ее основе анализа процессов ускорения ионов водорода в быстронарастающих электромагнитных полях, создаваемых в лазерной плазме при сильноточном разряде электрической емкости на спиральную электродинамическую линию, с последующей генерацией нейтронов.

7. Экспериментальное исследование энергетических распределений дейтронов, ускоренных в разработанном ионном диоде на основе спиральной линии с быстронарастающим током, и генерации нейтронов при взаимодействии ускоренных дейтронов с мишенью из дейтерированного полиэтилена.

Перечисленные задачи обладают **научной новизной**:

1. Предложены, разработаны и экспериментально исследованы две оригинальные модификации диодной ускоряющей системы с использованием

лазерной плазмы и плазмы, генерируемой в вакуумной полости с осциллирующими дейтронами (ИЕС-диод), позволяющие существенно сократить габаритные размеры диода и получить нейтронный поток до 10^6 н/имп., что позволяет использовать устройство в передовых технологиях.

2. На основании теоретического и экспериментального исследований показана возможность создания систем подавления вторично-эмиссионных электронных потоков на основе спирального проводника с импульсным током, расположенным коаксиально относительно катода мишени плазменного диода, что особенно эффективно действует при больших ионных токах в отличие от постоянных магнитов.

3. Разработаны два конструктивных варианта запаянной ускорительной трубки с системой магнитной изоляции вторично-эмиссионного электронного потока, а также определены технологические аспекты их реализации с прогнозными оценками получения в этих устройствах нейтронного потока до 10^8 н/имп. при поперечных размерах порядка 0,1 м.

4. Разработана математическая модель формирования азимутально-симметричных магнитных полей, образуемых при мощном разряде электрической емкости на спиральный проводник, и ускорения сгустка лазерной дейтериевой плазмы в быстронарастающих электромагнитных полях, использующей фактор взаимодействия ею магнитного момента с магнитным полем спирального проводника с током.

5. Экспериментальные исследования процессов ускорения ионов водорода в быстронарастающих электромагнитных полях, создаваемых в лазерной плазме при мощном разряде электрической емкости на спиральный проводник, показали возможность получения нейтронных потоков до уровня 10^7 н/имп., соизмеримых со значением потоков, достигаемых в современных портативных ускорителях.

6. Разработаны методики электродинамических и нейтронных измерений, позволяющие прогнозировать характеристики ускорительных трубок по экспериментальным данным, полученным в условиях генерации слабых нейтронных полей на мишенях малого размера, без нарушения требований

радиационной безопасности.

7. Применена оригинальная схема запуска в высоковольтном генераторе импульсного напряжения, позволяющая обеспечивать его надежную синхронизацию с источником дейтронов.

По результатам проведенных исследований предложено 7 технических решений, защищенных патентами Российской Федерации [1-7].

Научная и практическая значимость диссертации заключается в том, что получены существенные сведения о физических процессах ускорения дейтронов в вакуумных электродинамических устройствах с лазерной наработкой плазмы. Эта информация позволит значительно сократить время конструирования и разработки УТ нового поколения. Освоение подобных приборов позволит значительно нарастить технические характеристики и технологические возможности аппаратурно-методических комплексов (АМК), реализующих отмеченные выше прикладные ядерные технологии.

Результаты, полученные в ходе диссертационной работы, были использованы при выполнении проектов Минобрнауки России (соглашения № 14.575.21.0049 и № 05.605.21.0182) и РНФ (соглашение № 15-19-00151).

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Разработанные оригинальные модификации диодов с подавлением электронного компонента полями кольцевых постоянных магнитов с продольной намагниченностью и результаты исследования ускорения дейтронов и генерации нейтронов в таких системах.

2. Разработанное оригинальное техническое решение диода с подавлением электронного компонента импульсными магнитными полями спиральной электродинамической линии, расположенной вблизи нейтронообразующей мишени, и результаты исследований ускорения дейтронов и генерации нейтронов в таких системах.

3. Разработанный оригинальный макет диода на основе быстронарастающих электромагнитных полей, создаваемых в лазерной плазме при мощном разряде электрической емкости на спиральную линию, и результаты исследований

ускорения дейтронов и генерации нейтронов в таких системах.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием откалиброванного исследовательского оборудования, общепризнанных экспериментальных методик, многократными повторениями экспериментов и подтверждается согласованностью массивов экспериментальных данных между собой и с результатами теории.

Личный вклад автора заключается в разработке и отладке экспериментального стенда для проведения работ по физическому моделированию импульсных ионных диодов портативных нейтронных генераторов, проведении экспериментальных исследований и физической интерпретации получаемых результатов. Автором проведено компьютерное моделирование изучаемых процессов и теоретические расчеты, представленные в диссертации. При участии автора разработаны эскизные проекты УТ нового поколения с подавлением электронного компонента магнитными полями.

Апробация работы. Основные положения диссертации были представлены к обсуждению на 17 профильных конференциях: I - VI Международная конференция «Плазменные и лазерные исследования и технологии», Россия, г. Москва (2020, 2019, 2018, 2017, 2016, 2015); XIV Международная конференция «Забабахинские научные чтения», Россия, г. Снежинск (2019); XII, XIII Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц, Россия, г. Алушта (2019, 2017); IX International Particle Accelerator Conference, Канада, г. Ванкувер (2018); XXVIII Symposium on Plasma Physics and Technology, Чешская Республика, г. Прага (2018); XLIV, XLV Международная конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Россия, г. Звенигород (2018, 2017); XXV, XXVI Всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц (RuPAC), Россия, г. Протвино (2018), г. Санкт-Петербург (2016); X конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение», Россия, г. Москва (2016); Международная отраслевая научная конференция «АТОМТЕХ-2015. Электрофизика», Россия, г. Москва (2015).

По результатам диссертационного исследования **опубликовано** 13 печатных

работ [8-20] в рецензируемых научных журналах, входящих в международные базы данных **Web of Science** и **Scopus**, из них 8 публикаций [8-11, 13, 15, 17, 18] представлено в изданиях из **Перечня ВАК**. Автором получено 7 патентов Российской Федерации на результаты интеллектуальной деятельности [1-7].

Объем диссертации составляет 121 страницу, включает 51 рисунок, 85 формул и 1 таблицу. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списков условных сокращений и наиболее часто встречающихся условных обозначений, списка цитируемых источников информации из 154 наименований и приложения с информацией об использовании результатов диссертации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности темы диссертационной работы, формулировке ее целей, задач, научной новизны и практической значимости.

Глава 1 содержит два раздела. В первом проведен обзор прикладных ядерных технологий, в которых возникает потребность использовать портативные ИНГ с повышенным потоком нейтронов в полный телесный угол. Наиболее важными из них являются технологии дистанционного ядерного контроля различных объектов, основанные на нейтронном методе исследования элементного состава вещества.

Такой контроль может проводиться по результатам осуществления ядерных реакций под действием нейтронов с испусканием гамма-кванта (n, γ), протона (n, p), двух нейтронов ($n, 2n$), альфа-частицы (n, α) нейтронными гамма-методами неупругого рассеяния (n, n', γ) или радиационного захвата (n, γ), нейтрон-нейтронным анализом, основанным на эффектах поглощения и рассеяния, а также методом спектрометрии и интегральным элементным анализом [43, 44]. При нейтрон-нейтронном анализе рассматриваются поля, формируемые в результате реакции деления ядра (n, f), пропускания нейтронов через объект или альбедных потоков.

При реализации нейтронно-активационного метода в исследуемых образцах под действием нейтронов образуются радиоактивные ядра или изомеры. Элементный состав при этом идентифицируют по энергетическому спектру

γ -излучения (энергетическая спектрометрия) или периоду полураспада активированных ядер (временная спектрометрия). По интенсивности вторичного излучения оценивают концентрацию идентифицируемых элементов. Обусловленность алгоритма нахождения энергетического спектра, влияющего на достоверность определения элементного состава вещества, связана с уровнем стабильности нейтронного потока ИНГ и его величины.

При экспрессном ядерном контроле различных объектов, как правило, в импульсно-периодическом режиме анализируются радиационные поля γ -квантов неупругого рассеяния и радиационного захвата, альбедные нейтронные поля, а также поля запаздывающих нейтронов, формируемые при анализе делящихся материалов. Здесь наиболее актуальными представляются методы элементного анализа горных пород в условиях естественного залегания, а также нахождения и идентификации скрытых взрывчатых веществ, делящихся материалов и наркотических средств.

Анализ перспективных ядерных технологий дистанционного контроля, показал, что для повышения их эффективности необходимо обеспечить следующие требования к параметрам ИНГ нового поколения:

1. Повышение нейтронного выхода ИНГ при сохранении габаритов прибора для обеспечения лучшей статистики проводимых измерений, повышения информативности и достоверности получаемых результатов.

2. Повышения стабильности при генерации импульсно-периодических нейтронных потоков для повышения информативности и достоверности получаемых результатов за счет обеспечения лучшей обусловленности алгоритмов обработки формируемых ядерных сигналов.

3. Уменьшение габаритов и веса ИНГ для обеспечения возможности их транспортировки, оперативного перемещения, а также использования ИНГ в аппаратуре нейтронного каротажа геофизических скважин, накладывающей серьезные ограничения на радиальный размер ИНГ.

4. Уменьшение размеров нейтронообразующих мишени УТ при сохранении нейтронного выхода для повышения контрастности проводимых измерений.

5. Повышение энергии ускоряемых дейтронов до значений, превышающих 300 кэВ, для обеспечения возможности использования ИНГ нового поколения при активационном каротаже.

Во втором разделе обсуждаются известные схемы реализации портативных устройств для генерации импульсно-периодических полей быстрых нейтронов, которые могут обеспечивать ядерные технологии, рассмотренные в первом разделе. К ним относятся диоды с плазменным анодом на базе источников дейтронов с осциллирующими электронами, вакуумной дугой и лазерной плазмой, обращенные диоды с коллективным ускорением нуклидов водорода в прямых электронных потоках, устройства типа «плазменный фокус», импульсные ускорители лазерной плазмы, а также диоды с осциллирующими дейтронами.

Анализ литературы и расчеты показали, что усовершенствование УТ на базе источников дейтронов с осциллирующими электронами и вакуумной дугой имеют ограниченные перспективы в плане удовлетворения требований к повышению эффективности портативных ИНГ, обозначенных выше.

Хорошими перспективами повышения эффективности обладают УТ с лазерно-плазменным источником дейтронов (ЛПИД). Известные трубки подобного типа позволяют достигать средних потоков нейтронов в полный телесный до 10^{10} н/с с уровнем стабильности $< 15\%$ при ограниченном энергообеспечении ЛПИД (< 50 мДж в лазерной вспышке). Размеры изделия, например, допускали его использование в аппаратурно-методических комплексах для нейтронно-активационного анализа горных пород в условиях их естественного залегания, характеризуемого жесткими требованиями к их габаритам. Это можно сказать и по поводу диодов с осциллирующими дейтронами. Дальнейшее повышение эффективности подобных приборов связано с усовершенствованием магнитных систем подавления электронной проводимости в диодных системах УТ, чему посвящена значительная часть диссертационного исследования.

Импульсные индукционные ускорители лазерной плазмы – новое направление в области генерации нейтронов, которое требует проведения исследований в части оптимизации их конструкции. Перспективным в этом плане

представляется использование спиральной линии для формирования импульсных электромагнитных полей. Это обстоятельство определило другую часть исследований в рамках диссертационной работы.

Что касается обращенных диодов с коллективным ускорением дейтронов в прямых электронных потоках и устройств типа «плазменный фокус», то, как показывает анализ соответствующей литературы, они представляют интерес с точки зрения повышения выходных характеристик ИНГ, но имеют ограничения по ресурсу работы. Это является основным препятствием к их использованию для решения задач, обозначенных выше.

Проведенный анализ выявил следующие перспективные направления в области усовершенствования УТ:

1. Исследование и конструирование УТ на базе ЛПИД с подавлением электронной проводимости постоянными магнитами с продольной намагниченностью.

2. Исследование и конструирование УТ на базе ЛПИД с подавлением электронного компонента импульсными магнитными полями спиральной электродинамической линии, расположенной вблизи нейтронообразующей мишени.

3. Исследование и конструирование УТ на базе ИЕС-диодов с «магнитной изоляцией».

4. Исследование процессов ускорения дейтронов в составе лазерной плазмы быстропеременными магнитными полями, формируемыми с помощью спиральных электродинамических линий.

Перечисленные факторы определили направление работы автора диссертации, как исследование процессов ускорения нуклидов водорода в портативных импульсных плазменных устройствах со скрещенными электромагнитными полям.

Глава 2 посвящена описанию результатов разработки и испытаний экспериментального оборудования для исследования процессов ускорения нуклидов водорода и генерации нейтронов в скрещенных импульсных

электромагнитных полях.

Стержнем этих работ является конструирование, изготовление и запуск экспериментальной установки, одна из конфигураций которой в общем виде представлена на рисунке 1.

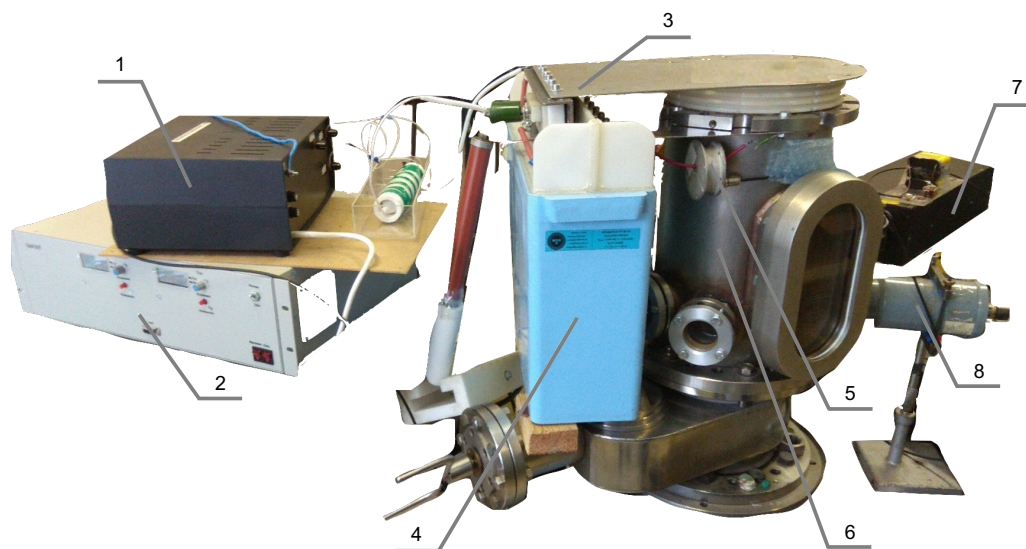


Рисунок 1 – Общий вид экспериментальной установки, где 1 – блок запуска; 2 – блок зарядки; 3 – полосковый электрод; 4 – малоиндуктивный конденсатор; 5 – пояс Роговского; 6 – экспериментальная вакуумная камера; 7 – импульсный лазер (Nd:YAG); 8 – коаксиальный фотоэлемент (ФЭК).

Установка комплектовалась, собиралась и запускалась с целью обеспечения возможности проведения на ней работ по физическому моделированию импульсных портативных вакуумных устройств нового типа для генерации быстрых нейтронов. Ее основным узлом являлась металостеклянная рабочая вакуумная камера, допускающая возможность размещения в ней источника дейтронов, магнитной системы и ускоряющих электродов с обеспечением условий необходимой электрической прочности при электрических полях до 10^5 В/м. Это позволяло в проводимых экспериментах использовать генераторы импульсных напряжений (ГИН) с амплитудой напряжения до 500 кВ. При проведении экспериментов вакуум в камере мог поддерживаться на уровне $\sim 10^{-3}$ Па с помощью мембранного форвакуумного, магниторазрядного и турбомолекулярного насосов.

На рисунке 2 в виде схематического разреза представлен вариант использования установки при исследовании разборных макетов УТ.

Большинство проведенных экспериментов было связано с использованием

ЛПИД, оснащенных импульсным лазером (Nd:YAG) с усилителем мощности, генерирующим импульсы излучения с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм, энергией в диапазоне $E_{\text{л}} = (0,1 - 1)$ Дж и длительностью $\tau \approx 10$ нс. Оптическая лазерная система позволяла получать на поверхности плазмообразующей мишени плотность мощности излучения на уровне $\sim 10^{15}$ Вт/м², необходимой для эффективной работы ЛПИД, использующих плазмообразующие мишени из дейтерированного полиэтилена или титана, насыщенного дейтерием.

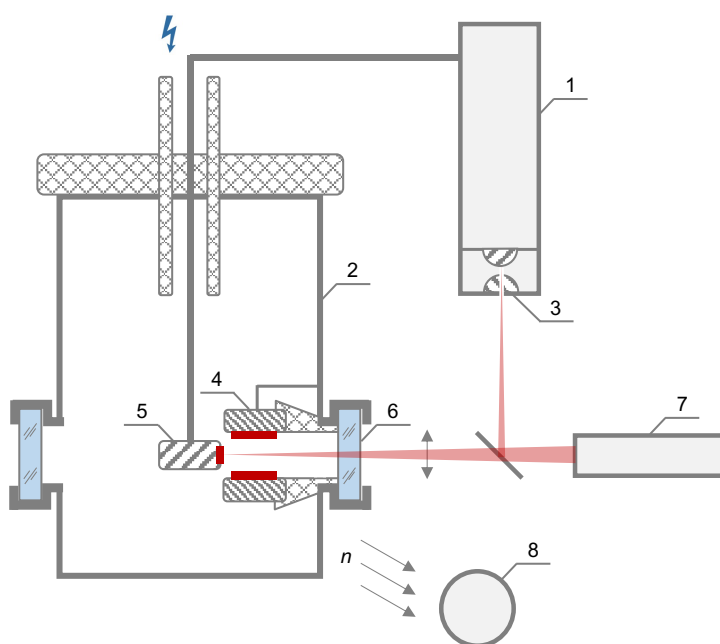
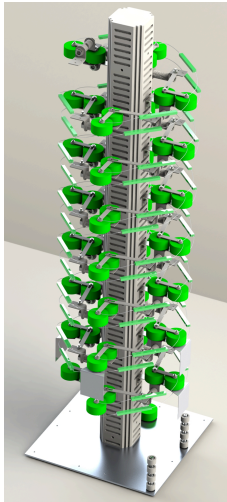


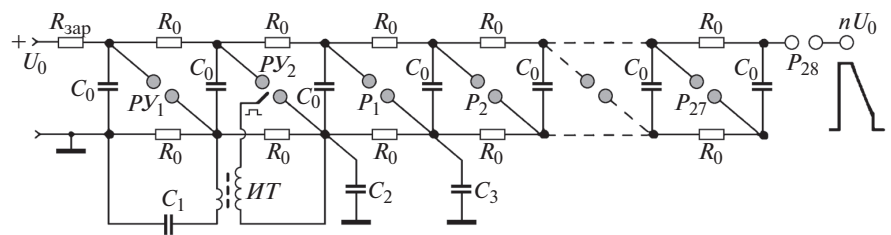
Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки, где 1 – ГИН; 2 – вакуумная камера; 3 – лазерный управляемый разрядник (ЛУР); 4 – намагниченный катод цилиндрической формы с нейтроннообразующей мишенью на внутренней поверхности; 5 – анод с плазмообразующей мишенью; 6 – оптическое окно; 7 – импульсный лазер; 8 – детектор нейтронов.

Ускоряющее напряжение создавалось с помощью специально разработанного управляемого 30-каскадного ГИН собранного по схеме Аркадьева-Маркса и способного генерировать в режиме холостого хода импульсы с амплитудой до 500 кВ и длительностью первой полуволны $\tau_0 \approx 1$ мкс. Схема ГИН и его общий вид представлены на рисунке 3. Каскады ГИН смонтированы вокруг изолирующей центральной цилиндрической стойки из капролона высотой 90 см и диаметром 7 см. Для синхронизации ускоряющего напряжения с нагрузкой в первом каскаде ГИН использовался разрядник $РУ_1$ с быстрым лазерным поджигом. При этом

управляемый трехэлектродный разрядник PV_2 с искажением поля обеспечивал надежную коммутацию второго каскада. Расчетное значение индуктивности ГИН составляло $L \approx 5$ мкГн, а «ударной» емкости $C \approx 310$ пФ. Им соответствовало время нарастания напряжения, с учетом времени перезарядки емкостей ГИН ($\tau_{\text{п}}$) с параллельного на последовательное соединение, $\tau_{\text{н}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{LC} + \tau_{\text{п}} \approx 100$ нс.



(а)



(б)

Рисунок 3 – Общий вид ГИН (а) и принципиальная схема ГИН (б), где R_0 – резисторы; $C_0 - C_3$ – электрические емкости; PV_1 – управляемый разрядник с лазерным поджигом, а PV_2 – с электрическим поджигом; $P_1 - P_{28}$ – неуправляемые искровые разрядники атмосферного давления.

В процессе экспериментов осуществлялись электродинамические и нейтронные измерения. Для получения временных зависимостей тока ускоренных дейтронов использовалась схема измерений, представленная на рисунке 4.

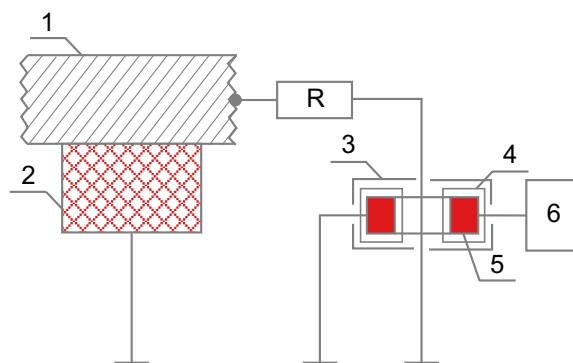


Рисунок 4 – Схема измерения тока ускоренных ионов, где $R \sim (1 \div 10)$ Ом; 1 – участок металлической стенки рабочей камеры; 2 – графитовое объемное шунтовое сопротивление; 3 – корпус магнитоиндукционного преобразователя (МИП); 4 – катушка МИП; 5 – ферромагнитный сердечник МИП; 6 – осциллограф.

В процессе ускорения дейтронов через графитовое объемное шунтовое сопротивление ($R_{\text{ш}} \sim 10^{-3} \text{ Ом}$), плотно прилегающее к стенке рабочей камеры, протекает ток $I(t)$ примерно одинаковый по временной структуре и величине току дейтронов в виду малости собственной емкости камеры по отношению к «ударной» емкости ГИН и ее электрического сопротивления по отношению к динамическому сопротивлению диодной системы. Далее этот ток с помощью магнитоиндукционного преобразователя вырабатывает сигнал, фиксируемый осциллографом.

Регистрация формы ускоряющего импульса, подаваемого на исследуемую диодную систему, осуществлялась с помощью антенного устройства в виде небольшого металлического стержня, в котором в результате электромагнитной наводки возникал электрический ток, фиксируемый осциллографом, повторяющий форму импульса напряжения.

В экспериментах по ускорению дейтронов в быстронарастающем магнитном поле был применен метод коллекторных измерений с временным анализом получаемого токового сигнала. При этом поток ускоренной плазмы Q предварительно проходил через пролетную трубу, состыкованную с рабочим объемом ускорителя плазмы, достигая коллектора (см. рисунок 5).

В пролетной трубе происходило пространственное разделение ионов, имеющих разные скорости. В пространстве между сеткой и цилиндром Фарадея ионы извлекались из плазмы.

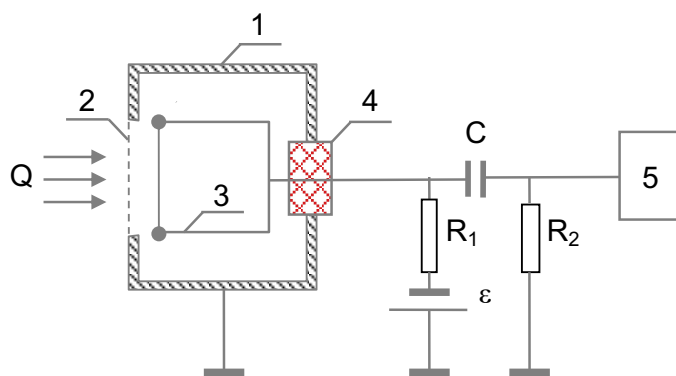


Рисунок 5 – Схема коллекторных измерений, где 1 – корпус; 2 – сетка; 3 – цилиндр Фарадея; 4 – изолятор; 5 – осциллограф или временной анализатор; Q – поток плазмы; $R_1 = 100 \text{ кОм}$; $R_2 = 50 \text{ Ом}$; C – электрическая емкость $0,1 \text{ мкФ}$; ε – электрическая батарея.

С помощью соответствующей электронной схемы формировался токовый сигнал $I_d(t)$, фиксируемый осциллографом. Если отсчет времени осуществляется с момента пересечения первым дейтроном переднего торца трубки дрейфа, то этот сигнал позволяет оценивать энергетический спектр ускоренных дейтронов, нормированный на 1, используя следующую формулу:

$$w(T_d) \approx \frac{K}{T_d^{3/2}} I_d \left(L \sqrt{\frac{M}{T_d}} \right), \quad (1)$$

где T_d – кинетическая энергия дейтрона, L – длина пролетной трубы, M – масса нуклона, K – калибровочный коэффициент.

При проведении экспериментов для обеспечения необходимых требований радиационной безопасности генерация нейтронов осуществлялась в импульсном режиме с использованием пробных дейтериевых нейтронообразующих мишеней малого размера (площадь $\Delta S \sim 1 \text{ см}^2$) на ядерной реакции $D(d, n)^3\text{He}$, имеющей существенно меньшее микросечение по сравнению с реакцией $T(d, n)^4\text{He}$.

Импульсный поток быстрых нейтронов измерялся методом Хансена и Мак-Киббена с предварительным замедлением нейтронов, позволяющим использовать серийный гелиевый детектор на ядерной реакции $^3\text{He}(n, p)^3\text{T}$. Схема его подключения представлена на рисунке 6. Калибровка детектора осуществлялась с помощью аттестованных ампульных плутоний-бериллиевых или полоний-бериллиевых источников, использующих ядерную реакцию $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$.

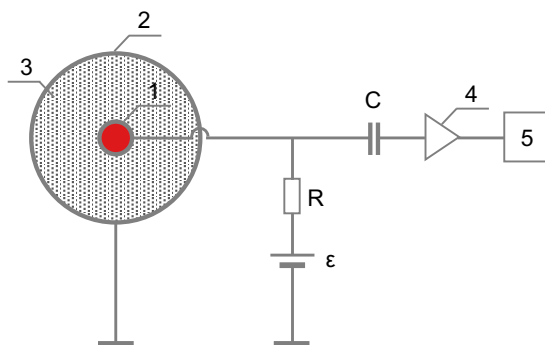


Рисунок 6 – Схема включения детектора нейтронов, где 1 – анод; 2 – катод; 3 – газовая смесь; 4 – усилитель; 5 – пересчетный прибор.

Затем проводился компьютерный пересчет показаний системы детектирования ΔN на прогнозируемый нейтронный поток УТ по следующей формуле:

$$\Phi \approx \Delta N f \frac{S_M A_{\Pi} \chi_T \rho_M}{\Delta S A_M \chi_{\Pi} \rho_{\Pi}} \int_0^{\infty} dt I_d(t) \int_0^{eU(t)} dT_d \frac{\sigma_{(d,t)}(T_d)}{F_M(T_d)} \left[\int_0^{\infty} dt I_d(t) \int_0^{eU(t)} dT_d \frac{\sigma_{(d,d)}(T_d)}{F_{\Pi}(T_d)} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где S_M – площадь мишени моделируемой УТ; $U(t)$ – ускоряющее напряжение; $\sigma_{(d,d)}(T_d)$, $\sigma_{(d,t)}(T_d)$ – микросечения реакций $D(d, n)^3\text{He}$, $T(d, n)^4\text{He}$; $A_{\Pi, M}$, $\chi_{D, T}$, $F_{\Pi, M}(T_d)$ – атомные номера элемента-носителя, коэффициенты по дейтерию и тритию, энергетические потери дейтрона в пробной и реальной мишенях.

Глава 3 посвящена описанию результатов компьютерного и физического экспериментов по ускорению дейтронов и генерации нейтронов в диодах с магнитной изоляцией (ДМИ), направленных на их усовершенствование за счет использования ЛПИД, малогабаритных ГИН, постоянных магнитов или импульсных магнитных систем.

Проведению экспериментов предшествовала разработка алгоритма адекватной оценки критического значения индукции постоянного магнитного поля, при котором осуществляется подавление электронной проводимости в коаксиальном ДМИ с ЛПИД, как показано на рисунке 7.

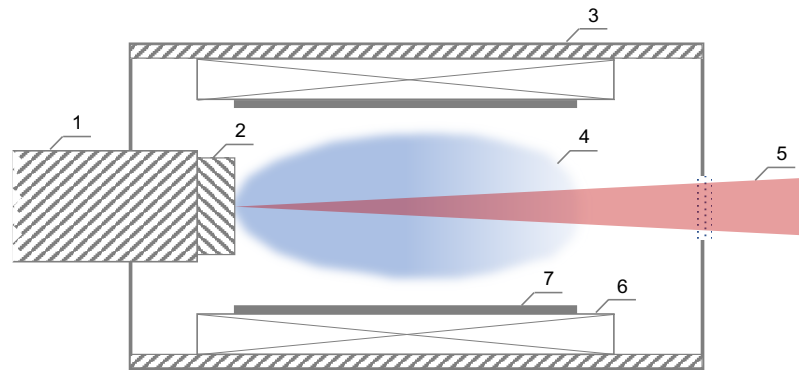


Рисунок 7 – Схема ДМИ с ЛПИД, где 1 – анод; 2 – плазмообразующая мишень; 3 – катод; 4 – плазменный анод; 5 – лазерное излучение; 6 – постоянный магнит; 7 – нейтронообразующая мишень.

В его основу была положена модель диффузии Бома поперек магнитного поля, на основании которой было получено приближенное выражение для поперечной составляющей дейтронного тока:

$$j_{d\perp}(r, B, t) \approx \frac{10\chi_d q \theta(t) r}{R_{\Pi\Phi}^2(B, t)(Vt + 10a)B} e^{-\frac{r^2}{R_{\Pi\Phi}^2(B, t)}}, \quad (3)$$

где a – радиус пятна фокусировки лазерного излучения, $V \approx 2 \cdot 10^5$ м/с – максимальная скорость разлета плазмы в продольном направлении,

$$R_{\text{пф}}(B, t) \approx V_{\perp}(B)t + 10a, V_{\perp}(B) \approx \frac{0,35V}{\sqrt{(1+1,9\sqrt{B})}} \quad (4)$$

– зависимости поперечного радиуса плазменного фронта и скорости его расширения от значения продольной составляющей вектора индукции магнитного поля, полученные для диапазона изменений $B = (0,1 \div 0,7)$ Тл,

$$\theta(t) \approx \theta_0 \frac{(10a)^{3\gamma}}{R_{\perp}^{2\gamma}(B, t)(Vt+10a)^{\gamma}} \quad (5)$$

– временная зависимость температуры плазмы [эВ], учитывающая адиабатический характер ее расширения с показателем γ .

На первом этапе расширения плазмы плотность извлекаемого из нее тока определяется законом Богуславского-Чайлда-Ленгмюра (закон степени трех вторых). Когда значение плотности этого тока становится равным значению диффузионного тока в области плазменного фронта процесс расширения резко замедляется. Этому этапу соответствует значение поперечного радиуса плазменного фронта, определяемого из приближенного уравнения:

$$j_{d\perp}[R_{\text{пф}}, B, t(R_{\text{пф}}, B)] \approx \frac{4\varepsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2}{M_d}} \frac{U^{\frac{3}{2}}[t(R_{\text{пф}}, B) - t_3]}{(R_k - R_{\text{пф}})^2} \quad (6)$$

и задающего в неявном виде функцию $R_{\text{пф}}(B) = f_1(B)$. В этой формуле введены обозначения: $t(R_{\text{пф}}, B) = 10^{-5}(R_{\text{пф}} - 10a)\sqrt{1 + 1,9\sqrt{B}}$, t_3 – время запуска ГИН, R_k – радиус катода (мишени) ДМИ.

Из рассмотрения динамики дейтрона в диоде определялась зависимость радиуса точки поворота дейтрона от индукции магнитного поля $R_{\text{пф}}(B) = f_2(B)$. Численное решение уравнения $f_1(B) = f_2(B)$ дало оценку критического магнитного поля $B_{\text{кр}} = (0,3 \div 0,6)$ Тл для предполагаемых к разработке вариантов УТ и позволило сформулировать требования к постоянному магниту, который обладал продольной намагниченностью и состоял из ферромагнетика на основе соединений $NdFeB$. Исследования проводились на экспериментальной установке (см. рисунок 1) согласно схеме, представленной на рисунке 2.

Ускорение дейтронов осуществлялось электрическим полем, формируемом при подаче на анод импульса положительного напряжения с амплитудой,

варьируемой в диапазоне $U_0 = (150 - 300)$ кВ. Плотность потока излучения лазера в области фокусировки составляла $q \approx 5 \cdot 10^{14}$ Вт/м². Длительность лазерного импульса была при этом ~ 10 нс. Процесс измерения нейтронного выхода следовал методике, изложенной выше. Из данных обработки нейтронных измерений следует, что их относительная погрешность не превышала 25% при доверительной вероятности 0,95. Прогнозный расчет возможного максимального нейтронного потока, излучаемого мишенью на ядерной реакции $T(d, n)^4\text{He}$, осуществлялся на компьютере с использованием формулы (2). Его результаты представлены на рисунке 8.

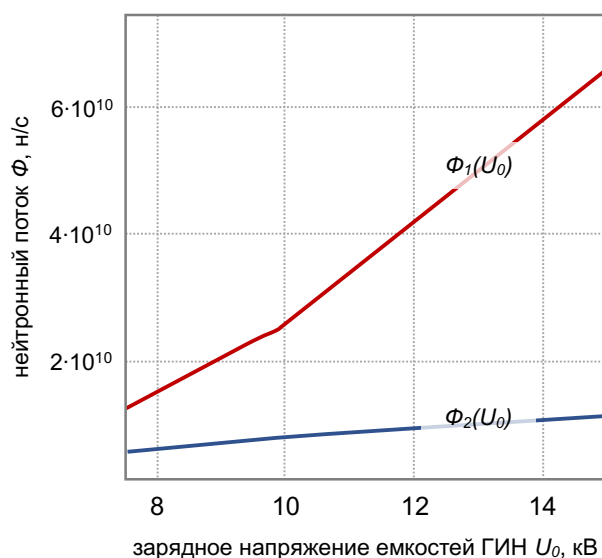


Рисунок 8 – Зависимости нейтронного потока ДМИ, излучаемого в полный телесный угол от зарядного напряжения емкостей ГИН, где кривая $\Phi_1(U_0)$ соответствует генерации нейтронов при наличии магнита (магнитная изоляция), кривая $\Phi_2(U_0)$ – в отсутствии него.

Был рассмотрен также другой вариант реализации малогабаритного ДМИ на базе плазменного диода с осциллирующими дейтронами (см. рисунок 9).

Его анод выполнен в виде постоянного кольцевого магнита, катод состоит из двух постоянных магнитов. Электроды помещаются в вакуумную камеру, заполненную изотопами тяжелого водорода до рабочего давления, варьируемого в пределах $\sim (10 \div 10^{-1})$ Па. При подаче высокого напряжения в диоде возникает электрический разряд, сопровождаемый осцилляцией нуклидов водорода в анодной полости, которой сопутствует генерация нейтронов. В проведенном эксперименте при напряжении 70 кВ и индукции магнитного поля на оси диода

$B = 0,2$ Тл нейтронный выход с пробной мишени составил $\sim 10^5$ н/имп. По аналогии с ДМИ на базе ЛПИД был сделан прогнозный расчет нейтронного потока для реальной УТ, который при частоте 10 Гц составил величину $\sim 10^9$ н/с.

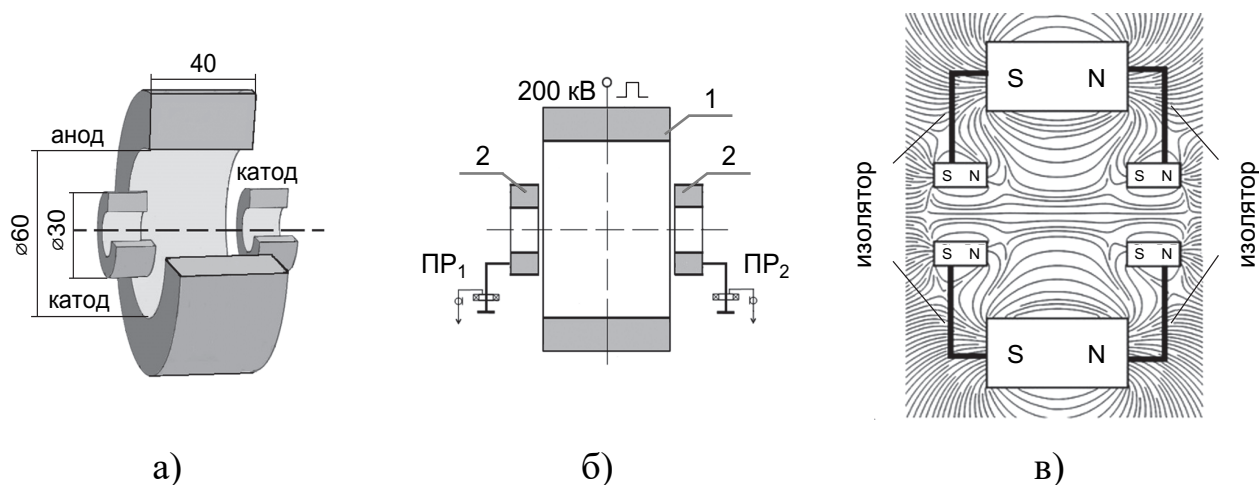


Рисунок 9 – Система электродов (а), сечение системы (б), конфигурация магнитного поля (в) в ИЕС-диоде с полым катодом и магнитной изоляцией, где 1 – анод; 2 – катод.

В ДМИ с постоянным магнитным полем индукция в области мишени УТ ограничена внешними поперечными размерами магнита, что влечет за собой соответствующее ограничение на радиальные габариты ИНГ. Этого недостатка лишена система подавления электронной проводимости с импульсным магнитным полем, создаваемым спиральной электродинамической линией при разряде на нее емкостного накопителя энергии. При этом в спирали возникает импульс тока, создающий вблизи катода переменное магнитное поле, возбуждающее по закону электромагнитной индукции в катоде встречный азимутальный вихревой переменный ток, который создает вблизи катода дополнительное магнитное поле той же направленности (см. рисунок 10).

Катод-экран ведет себя как короткозамкнутый виток с током. Импульсное магнитное поле, генерируемое вихревым током в короткозамкнутом витке, в пространстве, охватываемом спиралью, направлено против поля источника. Это приводит к ослаблению поля внутри спирали. Был разработан алгоритм моделирования магнитного поля, основанный на его приближенном представлении в виде суперпозиции полей элементарных колец с током, на которые разбивается спираль, и колец с противотоком, аппроксимирующих ток, наведенный в катоде.

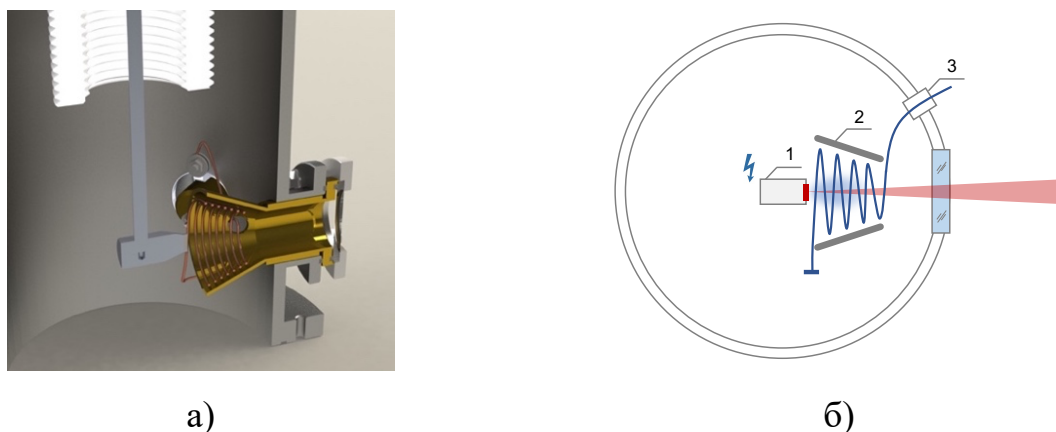


Рисунок 10 – Общий вид (а) и схематический разрез (б) электродной системы ДМИ с импульсной магнитной изоляцией, где 1 – анод; 2 – конусообразный катод; 3 – вывод спиральной катушки.

В процессе компьютерного эксперимента, по аналогии с методикой нахождения критического значения магнитной индукции в случае постоянного магнитного поля, находятся критическое значение тока в спирали $I_{0кр} \sim (1 \div 10)$ кА и оптимальные значения угла наклона спирали $\tan \alpha \approx \frac{r_1}{2H}$, где r_1, H – ее минимальный радиус и продольный размер соответственно.

Экспериментальное исследование ускорения дейтронов и генерации нейтронов в этом ДМИ осуществлялось на установке, описанной выше в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 11.

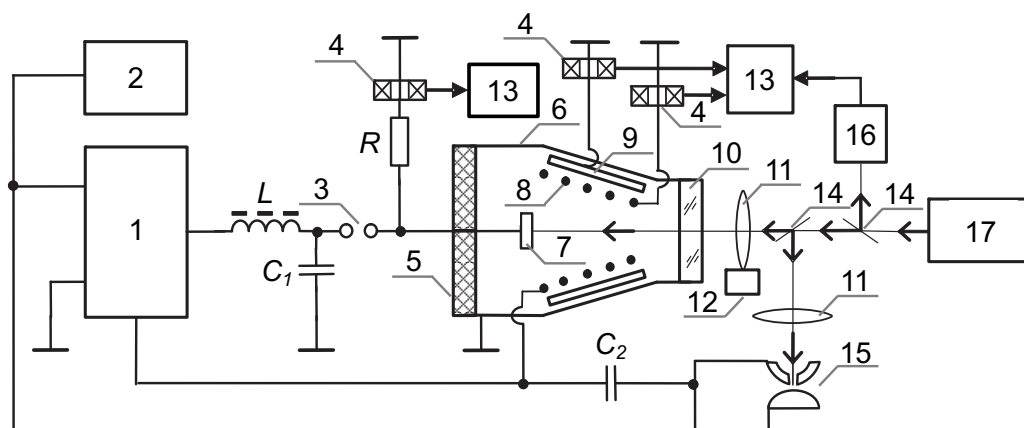


Рисунок 11 – Схема эксперимента по формированию потока ускоренных дейтронов, где 1 – ГИН; 2 – блок зарядки ГИН; 3 – разрядник-обостритель; 4 – пояса Роговского; 5 – изолятор; 6 – вакуумная камера; 7 – плазмообразующая мишень; 8 – спиральная линия; 9 – ионный коллектор с нейтронообразующей мишенью; 10 – оптическое окно; 11 – фокусирующие линзы; 12 – сканирующее устройство; 13 – осциллограф; 14 – частично прозрачные зеркала; 15 – ЛУР; 16 – ФЭК; 17 – лазер.

На рисунке 12 представлено семейство зависимостей тока дейтронов от времени, полученное при различных энергиях лазерного импульса.

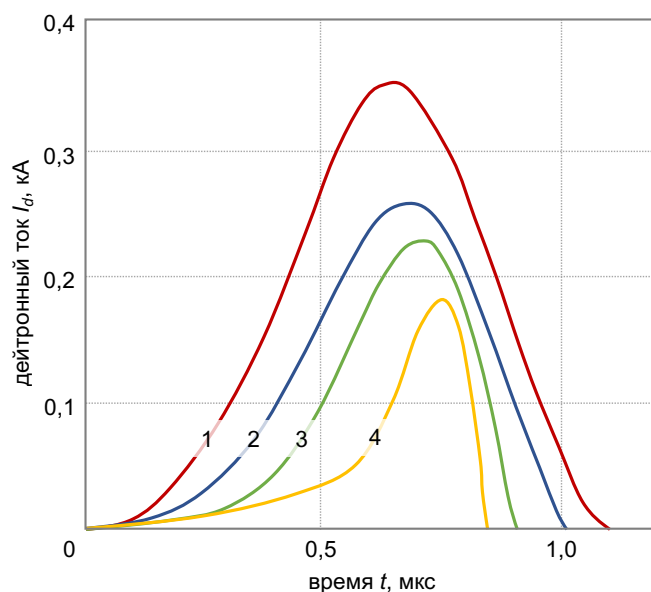


Рисунок 12 – Экспериментальные зависимости $I_d(t, W)$, где кривая 1 соответствует значению энергии лазера $W = 80$ мДж; кривая 2 – 200 мДж; кривая 3 – 380 мДж; кривая 4 – 750 мДж.

Временные зависимости тока дейтронов позволяют спрогнозировать ожидаемый средний поток нейтронов в полный телесный угол, излучаемый УТ с металло-тритиевой мишенью, используя следующую формулу:

$$\Phi_{(d,t)} \approx 6 \cdot 10^{20} \frac{f_{\chi T}}{A_M} \int_0^\infty dt I_d(t) \int_0^{eU_0 \sin(\frac{\pi t}{2\tau_H})} dT_d \frac{1}{T_d F(T_d) [174^2 + (T_d - 96)^2]} e^{-\frac{54,4}{\sqrt{T_d}}} \quad (7)$$

Результаты прогнозирования потока нейтронов, излучаемого мишенью УТ на базе ДМИ с импульсной магнитной изоляцией в полный телесный угол, при частоте следования нейтронных вспышек 10 Гц содержатся в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты прогнозирования нейтронного потока УТ.

Ядерная реакция	U_0 , кВ	Φ [н/с], $W = 80$ мДж	Φ [н/с], $W = 200$ мДж	Φ [н/с], $W = 380$ мДж	Φ [н/с], $W = 750$ мДж
T(d, n) ⁴ He	100	$2,2 \cdot 10^9$	$5,1 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^{10}$	$2,0 \cdot 10^{10}$
T(d, n) ⁴ He	200	$1,1 \cdot 10^{10}$	$2,7 \cdot 10^{10}$	$5,1 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{11}$

На основании результатов компьютерных и физических экспериментов были разработаны технологические требования к изготовлению двух вариантов конструкций малогабаритных запаянных УТ, схематические разрезы которых представлены на рисунке 13.

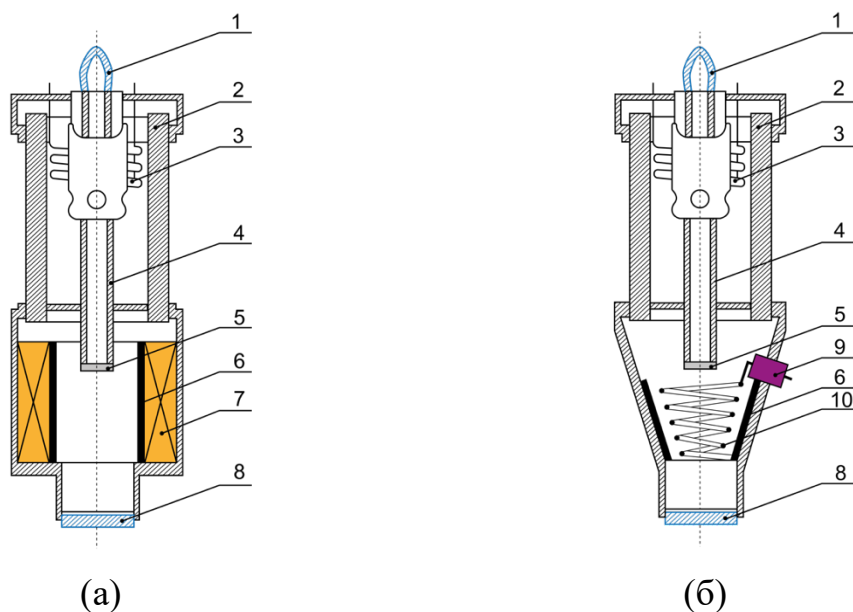


Рисунок 13 – Схематические разрезы запаянных УТ на базе ДМИ, где 1 – штенгель; 2 – изолятор; 3 – геттер; 4 – анод; 5 – лазерная мишень; 6 – нейтронная мишень; 7 – магнит; 8 – окно; 9 – изолятор для электрического ввода; 10 – спиральный электрод.

Глава 4 посвящена описанию результатов компьютерного и физического экспериментов по ускорению дейтронов в составе лазерной плазмы быстронарастающими электромагнитными полями и генерации нейтронов. При этом поле ускорений формировалось в плазме с помощью спиральной линии с импульсным током за времена ~ 10 нс. На рисунке 14 представлена схема такого импульсного ускорителя дейтериевой плазмы.

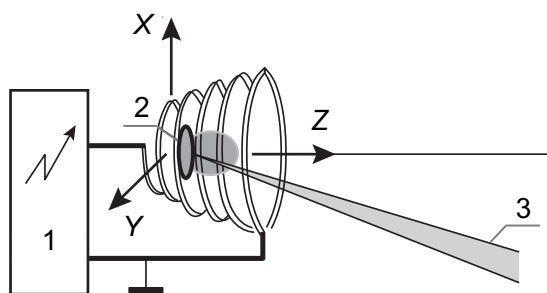


Рисунок 14 – Схема ускорения лазерной плазмы, где 1 – импульсный источник высокого напряжения; 2 – лазерная мишень; 3 – лазерное излучение.

Быстронарастающее магнитное поле индуцирует в сгустке лазерной плазмы вихревой ток. Азимутальная составляющая этого тока взаимодействует с радиальной составляющей магнитного поля и создает поле удельных сил Ампера, ускоряющее плазму в аксиальном направлении и определяемое выражением:

$$f_z(r, z, t) \approx 2\pi\sigma B_r(r, z, t) \frac{d}{dt} \int_0^r x dx B_z(r, z, t), \quad (8)$$

где σ – проводимость плазмы, $B_{r,z}(r, z, t)$ – компоненты вектора индукции магнитного в точке плазменного объема с цилиндрическими координатами r, z в момент времени t . Такая модель позволила на качественном локальном уровне понять механизм ускорения в быстронарастающих электромагнитных полях спиральной линии. Дальнейшее ее усовершенствование осуществлялось при рассмотрении ускорения конкретного плазменного сгустка из N_d дейтронов в виде расширяющегося сферического образования, с учетом влияния индуктивности разрядного контура. При этом процесс ускорения рассматривался с использованием системы уравнений движения центра тяжести плазменного сгустка с координатой $z_c(t)$ и массой $\Delta m \approx 2N_d M$:

$$\begin{cases} \frac{dV_c}{dt} = -\frac{\mu(t, z_c)}{\Delta m} \frac{\partial}{\partial z} B_z(0, z, t)|_{z=z_c}, \\ \frac{dz_c}{dt} = V_c \end{cases}, \quad (9)$$

где $V_c(t)$ – скорость центра инерции плазменного сгустка, $\mu(t, z_c)$ – магнитный момент плазменного сгустка. На рисунке 15 представлены результаты проведенного компьютерного эксперимента в виде расчетных зависимостей энергии $T_d \approx 2 \cdot 10^{-3} M V_c^2 / e$ от безразмерного времени ωt , полученные для случая ускорения в спирали из 5 витков.

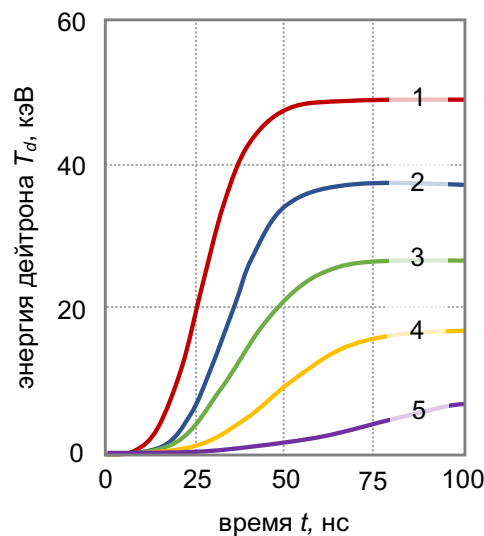


Рисунок 15 – Семейство зависимостей средней энергии дейтрона от времени, где параметр семейства – напряжение на емкостном накопителе энергии (1 – $U = 25$ кВ, 2 – 20 кВ, 3 – 15 кВ, 4 – 10 кВ, 5 – 5 кВ).

Эксперимент по ускорению дейтронов в быстронарастающем электромагнитном поле проводился на установке, снабженной коллекторным устройством с пролетной трубкой (см. рисунки 5, 16).

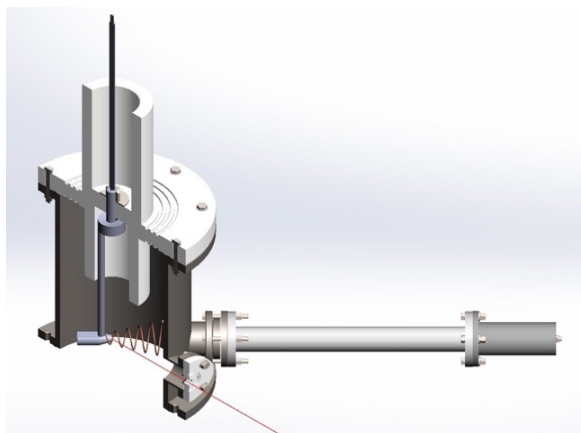


Рисунок 16 – Общий вид узла соединения вакуумной рабочей камеры, содержащей спиральную линию с пролетной трубкой.

По данным временного анализа осциллограмм была построена функция распределения ускоренных дейтронов по кинетическим энергиям, представленная на рисунке 17.

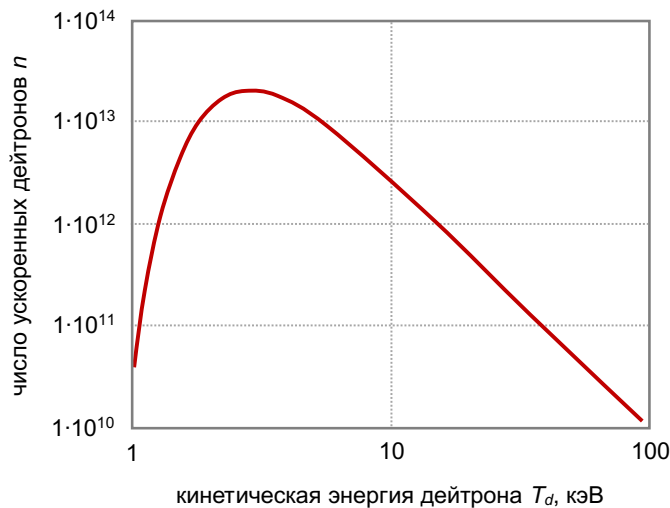


Рисунок 17 – Нормированная на число частиц функция распределения ускоренных дейтронов по кинетическим энергиям $n(T_d)$.

Данные проведенных измерений в хорошем соответствии с результатами компьютерного эксперимента, представленными на рисунке 15. Нейтронные измерения в процессе эксперимента фиксировали выход нейтронов в пределах от 10^4 до 10^5 н/имп., что также совпадало с результатами соответствующих компьютерных расчетов.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведенный автором анализ возможных путей реализации высокоэффективных портативных ИНГ для решения наиболее актуальных задач дистанционного ядерного анализа, выдвигаемых современными условиями, выявил перспективные направления, связанные с исследованием и конструированием УТ на базе ЛПИД и ИЕС-диодов с подавлением электронной проводимости магнитными полями (ДМИ), а также исследованием импульсных ПУ с ускорением дейтронов в составе лазерной плазмы быстропеременными электромагнитными полями, создаваемыми спиральной электродинамической линией.

2. Разработана и запущена экспериментальная установка для проведения на ней работ по физическому моделированию импульсных портативных вакуумных устройств нового типа, генерирующих быстрые нейтроны. Вакуум в ее рабочей камере составлял $\sim 10^{-3}$ Па. Оптическая лазерная система позволяла получать на поверхности плазмообразующих мишеней плотность мощности излучения на уровне $\sim 10^{15}$ Вт/м², необходимой для эффективной работы ЛПИД, а ее изоляционные параметры допускали возможность работы с ГИН при амплитуде напряжения до 500 кВ.

3. Для обеспечения стабильности работы действующих макетов плазменных ускорителей при их физическом моделировании в составе экспериментальной установки использовался специально разработанный для этих целей ГИН оригинальной конструкции, позволяющий генерировать высоковольтные импульсы с амплитудой до 450 кВ при токах до 3 кА с временем нарастания напряжения ~ 100 нс. Оригинальная система его запуска обеспечивала высокую стабильность генерации нейтронов в процессе испытаний разборных макетов УТ.

4. Разработаны методики получения осциллограмм тока дейтронов, ускоренных в ДМИ, и высокого напряжения на его ускоряющем зазоре, адаптированные под электродинамические характеристики исследуемых импульсных вакуумных устройств.

5. Разработана методика коллекторных измерений и анализа по времени пролета энергетического спектра дейтронов, ускоряемых в быстропеременном электромагнитном поле спиральной линии с применением специальной компьютерной программы обработки данных, учитывающей особенности формирования пакета ускоренных дейтронов.

6. Разработана методика нейтронных измерений при физическом моделировании ДМИ, позволяющая получать информацию о предполагаемых реальных нейтронных характеристиках разрабатываемых УТ при обеспечении необходимых условий радиационной безопасности.

7. Получены данные об особенностях ускорения дейтронов и генерации нейтронов в плазменных диодах с магнитной изоляцией постоянными или импульсными магнитными полями для проектирования УТ для ИНГ нового поколения с характерным линейным размером $\sim 0,1$ м, способных генерировать с использованием метало-тритиевых мишеней потоки нейтронов до 10^{11} н/с в полный телесный угол.

8. Показана перспективность использования магнитной изоляции с точки зрения повышения энергетического КПД ИНГ. Предложены две конструкции запаянной УТ на базе ДМИ с магнитной изоляцией постоянным цилиндрическим магнитом и импульсной магнитной изоляцией полем спиральной электродинамической линии конической формы.

9. Определены технологические перспективы создания портативных запаянных вакуумных УТ на базе ДМИ с ЛПИД с потоком до 10^{11} н/с в полный телесный угол, реализуемых в рамках указанных выше технических решений. Показана принципиальная возможность освоения мелкосерийного производства портативных УТ на базе ДМИ с потоком до 10^{11} н/с.

10. Разработана математическая модель формирования азимутально-симметричных магнитных полей, образуемых при мощном разряде электрической емкости на спиральную линию, которая может быть использована в ДМИ с импульсной магнитной изоляцией или ПУ с ускорением дейтронов в быстронарастающих электромагнитных полях.

11. Разработана математическая модель процесса ускорения лазерной плазмы, содержащей дейтроны, в электромагнитных полях спиральной электродинамической линии с последующей генерацией нейтронов. На ее основе составлена компьютерная программа для оценки нейтронного выхода за импульс и прогнозирования нейтронного потока предполагаемого ИНГ на базе данного ПУ.

12. Проведены эксперименты по исследованию энергетических распределений дейтронов ускоренных в ПУ на основе спиральной электродинамической линии с быстронарастающим электрическим током и генерации нейтронов при взаимодействии ускоренных дейтронов с мишенью из дейтерированного полиэтилена. В процессе эксперимента выход нейтронов фиксировался в пределах от 10^4 до 10^5 н/имп., что совпадало с результатами компьютерных расчетов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Патент 192808 РФ, МПК U1 G21G 4/00. Импульсный генератор нейтронов / А.А. Исаев, А.Е. Шиканов, К.И. Козловский [и др.] (Россия), заявитель и патентообладатель НИЯУ МИФИ. – № 2019117594; Заявлено 06.06.2019; Оpubл. 02.10.2019, Бюл. № 28.
2. Патент 187270 РФ, МПК U1 G21G 4/02 // H05H 3/06. Импульсный генератор нейтронов / А.А. Исаев, Е.Д. Вовченко, К.И. Козловский [и др.] (Россия), заявитель и патентообладатель НИЯУ МИФИ. – № 2018136430; Заявлено 16.10.2018; Оpubл. 28.02.2019, Бюл. № 7.
3. Патент 168503 РФ, МПК U1 G21G 4/02. Ионный диод для генерации нейтронов / А.А. Исаев, Е.Д. Вовченко, К.И. Козловский, А.Е. Шиканов (Россия), заявитель и патентообладатель НИЯУ МИФИ. – № 2016119692; Заявлено 20.05.2016; Оpubл. 07.02.2017, Бюл. № 4.
4. Патент 161783 РФ, МПК U1 G21G 4/02. Импульсный генератор нейтронов / А.А. Исаев, Е.Д. Вовченко, К.И. Козловский [и др.] (Россия), заявитель и патентообладатель НИЯУ МИФИ. – № 2015149128/07; Заявлено 17.11.2015; Оpubл. 10.05.2016, Бюл. № 13.

5. Патент 149963 РФ, МПК U1 H05H 3/06. Ионный триод для генерации нейтронов / А.А. Исаев, Е.Д. Вовченко, К.И. Козловский [и др.] (Россия), заявитель и патентообладатель НИЯУ МИФИ. – № 2014128877/07; Заявлено 14.07.2014; Опубл. 27.01.2015, Бюл. № 3.
6. Патент 2556038 РФ, МПК C1 H05H 3/06. Импульсный генератор нейтронов / А.А. Исаев, Е.Д. Вовченко, К.И. Козловский, А.Е. Шиканов (Россия), заявитель и патентообладатель НИЯУ МИФИ. – № 2014111550/07; Заявлено 25.03.2014; Опубл. 10.07.2015, Бюл. № 19.
7. Патент 143417 РФ, МПК U1 H05H 3/06. Импульсный генератор нейтронов / А.А. Исаев, Е.Д. Вовченко, К.И. Козловский [и др.] (Россия), заявитель и патентообладатель НИЯУ МИФИ. – № 2014107319/07; Заявлено 25.02.2014; Опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.
8. Technological Possibilities of Realization of Sealed Accelerator Tubes Based on Diodes with Magnetic Isolation / A.A. Isaev, R.P. Pleshakova, A.V. Ilyinskiy [et al.] // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2020. – Vol. 83. – P. 1467-1470.
9. Compact Induction Accelerator of Laser Plasma for Ion Energy up to 1 MeV / A.A. Isaev, K.I. Kozlovskij, A.E. Shikanov [et al.] // *Phys. Part. Nuclei Lett.* – 2020. – 17. – P. 498-502.
10. Collective Acceleration of Ions in a Pulsed Magnetic Field of a Conical Spiral / A.A. Isaev, K.I. Kozlovskij, A.E. Shikanov [et al.] // *Phys. Atom. Nuclei*. – 2019. – 82. – P. 1424-1428.
11. On the Acceleration of the Particle Flux of Laser Deuterium Plasma in a Fast-Growing Magnetic Field / A.A. Isaev, K.I. Kozlovskij, A.E. Shikanov, E.D. Vovchenko // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. – 2018. – Vol. 15, № 7. – P. 990–993.
12. Investigation of accelerating ion triode with magnetic insulation for neutron generation / A.A. Isaev, A.E. Shikanov, K.I. Kozlovskij [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 941, Conference 1. – 012091.
13. Study of the Insulating Magnetic Field in an Accelerating Ion Diode / A.A. Isaev, K.I. Kozlovskij, A.S. Martynenko [et al.] // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2017. – Vol. 80, № 11. – P. 1677-1682.

14. Small-size high-current ion diode with pulsed magnetic insulation of electrons for 500 keV energy / A.A. Isaev, K.I. Kozlovskij, E.D. Vovchenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 907, Conference 1. – 012025.
15. Deuteron flux production in a small high-voltage high-current diode with pulsed magnetic insulation / A.A. Isaev, A.E. Shikanov, K.I. Kozlovskij [et al.] // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 2017. – T. 62, № 6. – C. 968-970.
16. Collective acceleration of laser plasma in a nonstationary and nonuniform magnetic field / A.A. Isaev, K.I. Kozlovskij, A.E. Shikanov, E.D. Vovchenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 941, Conference 1. – 012016.
17. Neutron Diagnostics for Deuteron Flows from Pulsed Plasma Formations in a Magnetic Field / A.A. Isaev, A.E. Shikanov, E.D. Vovchenko, K.I. Kozlovskii // Physics of Atomic Nuclei. – 2017. – Vol. 80, № 11. – P. 1673-1676.
18. An accelerating voltage generator for compact pulsed neutron sources / A.A. Isaev, E.D. Vovchenko, K.I. Kozlovskij [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. – 2017. – Vol. 60, Issue 3. – P. 362-366.
19. Project of the borehole neutron generator for the direct determination of oxygen and carbon by activation method / A.A. Isaev, B.Yu. Bogdanovich, K.I. Kozlovskij [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 747, № 1. – 012007.
20. Magnetic discharge accelerating diode for the gas-filled pulsed neutron generators based on inertial confinement of ions / A.A. Isaev, K.I. Kozlovskij, A.E. Shikanov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 747, № 1. – 012006.