

На правах рукописи

Ильясова Маргарита Вадимовна

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЙТРОННОЙ И ГАММА
СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПОВЕДЕНИЯ
БЫСТРЫХ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА

Специальность **1.3.9** – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель: **Шевелев Александр Евгеньевич**, кандидат физико-математических наук, и.о. старшего научного сотрудника, ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты:

Чернышев Федор Всеволодович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории процессов атомных столкновений ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Кашук Юрий Анатольевич, кандидат физико-математических наук, начальник отдела нейтронной и спектроскопической диагностики, Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" "Проектный центр ИТЭР"

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН)

Защита состоится «01» декабря 2022 г. в «14» часов на заседании диссертационного совета **ФТИ 34.01.03** по физико-математическим наукам (специальность **1.3.9** – физика плазмы) в главном здании ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, улица Политехническая д. 26, Большой актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, и на сайте: <http://www.ioffe.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета (34.01.03),
кандидат физ.-мат. наук

А.В. Белашов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Понимание физики быстрых ионов в термоядерной плазме считается одной из важнейших задач для обеспечения работы термоядерного реактора. В работе будущих термоядерных реакторов, таких как ИТЭР и ДЭМО, ожидается, что энергия будет высвобождаться из реакции синтеза $D + T \rightarrow n + \alpha$, которая протекает между дейтерием и тритием в плазменном состоянии при температурах 10-20 кэВ. В результате протекания этой реакции высвобождается 17,6 МэВ энергии, которая распределяется между продуктами реакции: α -частицами, $E_\alpha = 3,5$ МэВ, и нейтронами, $E_n = 14,1$ МэВ. Нейтрон не подвергается влиянию внешнего магнитного поля и покидает токамак, при этом его кинетическая энергия может быть конвертирована в тепловую за пределами токамака. В то же время α -частицы удерживаются в плазме токамака, и их роль становится жизненно важной с точки зрения создания самоподдерживающейся термоядерной реакции синтеза. α -частицы, рожденные с энергией, превышающей средние температуры ионов трития и дейтерия, должны передать свою энергию ионам основной плазмы через замедление посредством кулоновского рассеяния. На различных установках, таких как JET, TFTR, Alcator C-Mode и др. [1-3], достаточно часто наблюдаются неустойчивости, вызванные быстрыми ионами. Неустойчивости в свою очередь оказывают влияние на удержание ионов и представляют серьезную угрозу для надежной работы термоядерного реактора.

В настоящее время эксперименты по зажиганию термоядерного синтеза проводятся в дейтериевой плазме с внешним источником быстрых ионов, т.е. энергичные ионы генерируются специально посредством дополнительного нагрева, например, ионного циклотронного резонансного нагрева (Ion Cyclotron Resonance Heating, ИЦР-нагрев) или инъекции пучка нейтральных атомов (Neutral Beam Injection, NBI), а также их комбинацией. Для изучения физики быстрых ионов разработан и функционирует специальный набор диагностических средств. Было накоплено большое количество информации, объясняющей физику быстрых ионов в плазме, но несмотря на это, остаются неразрешенными ряд фундаментальных вопросов, касающихся удержания α -частиц в термоядерном реакторе.

С точки зрения диагностики дейтерий-тритиевая плазма представляет собой жесткую рабочую среду, в которой большая часть средств диагностики быстрых ионов сталкивается с серьезными техническими и принципиальными ограничениями. Поэтому возникла необходимость поиска новых процессов, которые могли бы лечь в основу новых методов диагностики плазмы. В термоядерном реакторе с дейтерий-тритиевой плазмой ожидается высокая интенсивность испускания нейтронного и гамма-излучения. Оба процесса могут быть использованы для диагностики быстрых ионов, поскольку соответствующие методы детектирования преодолевают большую часть технических и принципиальных проблем, встречающихся в современной диагностике быстрых ионов.

Степень разработанности темы диссертации

Нейтронная спектроскопия применяется на существующих установках более

40 лет. За это время были созданы усовершенствованные спектрометры нейтронного излучения, и с их помощью были измерены спектры нейтронного излучения и изучены особенности его распределения. Спектры нейтронов, покидающих плазму, предоставляют информацию об энергетическом распределении быстрых частиц в плазме. Спектрометрия гамма-излучения – относительно новый метод в сравнении с нейтронной спектрометрией. Тем не менее, за время существования этого метода диагностики плазмы были спроектированы высокоэффективные быстрые спектрометры на основе сцинтилляторов и на основе особо чистого германия (High Purity Germanium, HPGe). Наблюдаемый в измерениях уровень гамма-излучения, рожденного высокоэнергичными ионами, используется для определения эффективной температуры хвоста функции распределения быстрых ионов. В более общем случае измеренная интенсивность гамма-излучения используется для оценки удержания быстрых ионов. Полученные данные могут быть сравнены с данными, полученными с помощью других диагностик плазмы, например, детектора потерь быстрых ионов (Fast Ion Loss Detector, FILD), анализатора атомов перезарядки (Neutral Particle Analyzer, NPA). Благодаря установке HPGe детектора на токамаке JET в 2008 году было измерено уширение за счет эффекта Доплера пиков гамма-излучения из различных ядерных реакций в плазменных экспериментах по ускорению ^2H , ^4He и ^3He ионов, с помощью комбинированного ИЦР+NVI метода нагрева.

Результаты, полученные с помощью нейтронной и гамма-диагностики на существующих установках за последние годы, демонстрируют развитие методов диагностики термоядерной плазмы, основанные на анализе ядерного излучения. В частности, результаты показывают, что из измерений нейтронного и гамма-излучения можно получить количественную информацию об энергетическом распределении быстрых ионов, их взаимодействии с ионами примесей и о влиянии неустойчивостей в плазме на распределение ионов, детально рассматривая ядерные процессы, происходящие при этом взаимодействии. Настоящая работа представляет собой актуальное развитие методов диагностики быстрых частиц в термоядерной плазме.

Цель данного исследования – изучение поведения быстрых ионов в плазме токамака с использованием методов спектрометрии нейтронного и гамма излучения.

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

1. Развить методы нейтронной спектрометрии для обеспечения нейтронных измерений в плазменных экспериментах, в том числе измерений выхода нейтронов из плазмы во время плазменного разряда, оценки скорости DD-реакции по измеренному нейтронному выходу;
2. Развить методы калибровки нейтронных спектрометров, включая методы обработки сигнала, получаемого с нейтронных спектрометров;
3. Разработать и ввести в строй системы нейтронной спектрометрической диагностики на токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе ТУМАН-3М и Глобус-М2 для изучения выхода нейтронов и распределений быстрых ионов с оценкой влияния на них различных физических явлений;

4. Развить методы анализа спектров гамма-излучения для изучения энергетических и угловых распределений быстрых ионов в плазме токамака;
5. Применить методы анализа спектров гамма-излучения в гамма-диагностике быстрых ионов в плазме токамака JET, в том числе удерживаемых α -частиц, рожденных в реакциях синтеза, а также для измерения скорости реакции синтеза;
6. Разработать экспериментальную установку для измерения на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе функций возбуждения гамма-переходов в ядрах ^{11}B и ^{11}C , рожденных в ядерных реакциях между ядрами ^3He и ^9Be для проведения детального анализа спектров гамма-излучения, генерируемого в плазме со сценариями нагрева ионов малой добавки ^3He .

Объект исследования: быстрые ионы в плазме токамака.

Методология и методы исследования: Оценка скорости реакции синтеза, проходящей в плазме токамака с участием быстрых ионов, производилась методом спектрометрических измерений потоков нейтронов в экспериментах с DD плазмой и потоков высокоэнергетического гамма-излучения из $\text{D-}^3\text{He}$ плазмы. Информация об энергетическом распределении быстрых ионов извлекалась из измеренной интенсивности гамма-линий из ядерных реакций между быстрыми частицами и ядрами примеси бериллия с использованием данных о сечениях соответствующих реакций. Угловое и энергетическое распределение альфа-частиц, удерживаемых в плазме, восстанавливалось методом анализа Доплеровской формы гамма-линии 4,44 МэВ из реакции $^9\text{Be}(\alpha, n\gamma)^{12}\text{C}$.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- развиты методы спектрометрии нейтронного излучения при помощи детекторов на основе жидкого органического сцинтиллятора BC-501A, включая разработку методов цифровой обработки сигналов, в частности методы отделения сигнала, полученного при регистрации нейтронного излучения, от сигнала, полученного при регистрации гамма-излучения сцинтилляционными детекторами;
- разработана оригинальная методика измерения функций отклика сцинтилляционного спектрометра на моноэнергетические нейтроны, основанная на методе совпадений регистрации нейтронов и гамма-квантов при облучении пучком ионов ^4He бериллиевой мишени на циклотроне;
- с помощью нейтронных спектрометров получены экспериментальные данные о выходе нейтронного излучения из дейтериевой плазмы токамаков ТУМАН-3М и Глобус-М2 в разрядах с инжекцией пучка атомов дейтерия;
- из измерений нейтронного излучения с помощью нейтронных спектрометров получены экспериментальные данные об удержании быстрых ионов в разрядах плазмы на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2;
- развиты алгоритмы восстановления энергетического и углового распределений быстрых ионов по спектрам гамма-излучения, рождаемого в ядерных реакциях в плазме токамака;

- получены экспериментальные данные об энергетическом и угловом распределениях удерживаемых α -частиц, рожденных в реакциях синтеза в плазме токамака JET;
- из измеренных спектров и профилей гамма-излучения с энергией 16,7 МэВ, рожденного в реакции ${}^3\text{He}(d,\gamma){}^5\text{Li}$, получена экспериментальная оценка скорости реакции синтеза ${}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He}$ в D- ${}^3\text{He}$ плазме JET.

Практическая ценность полученных результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- созданные спектрометры нейтронного излучения нашли применение в экспериментальных исследованиях характеристик плазмы на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2;
- разработанная методика измерения функций отклика спектрометров на моноэнергетические нейтроны может быть использована для калибровки сцинтилляционных спектрометров и для восстановления распределений нейтронного излучения по экспериментально измеренным спектрам;
- разработанные методики цифровой обработки и амплитудного анализа сигналов сцинтилляционных детекторов нейтронного излучения применяются в экспериментах с высокотемпературной плазмой на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2;
- разработанные методики изучения распределений быстрых ионов нашли применение в экспериментальных исследованиях плазмы на токамаке JET и будут применены в диагностике плазмы термоядерного реактора ИТЭР;
- развита методика оценки скорости реакции синтеза в D- ${}^3\text{He}$ плазме по измеренному гамма-излучению 16,7 МэВ;
- разработана экспериментальная установка для измерения на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе функций возбуждения гамма-переходов в ядрах, рожденных в реакциях между изотопами водорода и гелия и ядрами Be, В и С.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика калибровки спектрометров нейтронного излучения на основе органических сцинтилляторов с использованием метода совпадений регистрации нейтронов и гамма-квантов, рожденных в реакции ${}^9\text{Be}(\alpha,n\gamma){}^{12}\text{C}$;
2. Нейтронные спектрометрические системы на токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе ТУМАН-3М и Глобус-М2 с использованием спектрометров на основе жидкого органического сцинтиллятора BC-501А, позволяющих проводить измерения нейтронных спектров при скорости счета до 10^6 c^{-1} в условиях значительного фона гамма-излучения;
3. Развитие методов анализа спектров гамма-излучения, генерируемого в плазме, для изучения распределений быстрых ионов, включая удерживаемые α -частицы, рожденные в реакции синтеза. Экспериментальные оценки скорости реакции синтеза в D- ${}^3\text{He}$ плазме токамака JET из анализа профилей высокоэнергетического гамма-излучения;

4. Экспериментальная установка для измерения функций возбуждения гамма-переходов в ядрах, рожденных в реакциях между изотопами водорода и гелия и ядрами Be, B и C, на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Тестовые измерения спектров нейтронного и гамма-излучения, рожденного при облучении бериллиевой мишени пучком ионов ^3He .

Апробация работы и степень достоверности полученных результатов

Результаты, представленные в диссертации, прошли проверку численным моделированием и расчетами, а также сравнением с результатами, полученными с помощью других диагностик плазмы. Материалы, вошедшие в диссертацию, доложены на научных семинарах в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также на научных семинарах в зарубежных лабораториях: на токамаке JET, Калэмский научный центр, г. Абингдон, Великобритания, а также на токамаке ASDEX Upgrade, Институт Физики Плазмы Макса Планка, г. Гархинг, Германия.

Результаты были представлены на международных и всероссийских конференциях:

- Звенигородская (Международная) конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, 18-22 марта, 2019 г.;
- Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» (2019, 2021 гг.);
- 23-я конференция по диагностике высокотемпературной плазмы, онлайн, 14-18 декабря, 2020г. (23rd High-Temperature Plasma Diagnostic Conference, virtual, 14-18 December 2020);
- 28-я конференция МАГАТЭ по термоядерной энергетике, онлайн, 10-15 мая, 2021 г. (28th IAEA Fusion Energy Conference, virtual, 10-15 May 2021);
- Международная конференция по диагностике на термоядерных реакторах, Варенна, Италия, 6-10 сентября, 2021 г. (International Conference on Fusion Reactor Diagnostics, Varenna, Italy, September 6-10, 2021);
- LXXI Международная конференция по ядерной физике «Ядро-2021. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии», онлайн, 20-25 сентября, 2021 г. (LXXI International conference “NUCLEUS – 2021”, 20-25 September 2021, online).

Результаты и материалы, изложенные в диссертации, опубликованы в ведущих журналах по физике плазмы и экспериментальной ядерной физике «Nuclear Fusion», «Plasma Physics and Controlled Fusion», «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment», «Review of Scientific Instruments», «Физика Плазмы», «Письма в Журнал Технической Физики», и других.

Личный вклад автора в решение поставленных задач

Автором лично сформулированы цель диссертационной работы и задачи, которые было необходимо решить для ее достижения; изучено современное состояние проблемы спектрометрических измерений нейтронного и гамма-излучения, генерируемых в высокотемпературной плазме; проведена обработка данных, полученных при проведении калибровки нейтронных спектрометров BC-501A, получены функции отклика спектрометров на моноэнергетическое нейтронное излучение и получена оценка эффективности регистрации нейтронов спектрометрами в зависимости от энергии; проведены обработка и анализ данных, полученных в экспериментах на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2; проведены обработка и анализ данных, полученных в экспериментах на токамаке JET с применением метода анализа спектров гамма-излучения по интенсивностям гамма-линий; получена экспериментальная оценка интенсивности реакции синтеза в D- ^3He

плазме токамака JET из интенсивности гамма-излучения с энергией 16,7 МэВ; получены угловые распределения вылета продуктов ядерных реакций между ионами ^3He и ^9Be для возбужденных состояний ядер ^{11}B и ^{11}C .

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 128 страниц текста, включающего 2 таблицы, 73 рисунка и список цитированной литературы, включающий 142 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы работы, сформулированы ее цель и задачи, определен объект исследования, показаны научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, представлены научные положения, выносимые на защиту, описаны апробация работы на семинарах и конференциях различного уровня, личный вклад автора в разработку проблемы, раскрыта структура диссертации, дана характеристика каждой главы.

В первой главе рассмотрены основные источники быстрых ионов в плазме токамака. Основным способом нагрева плазмы является омический нагрев, который имеет существенные ограничения, поскольку его эффективность падает с ростом температуры плазмы. Для нагрева плазмы до температур зажигания термоядерной реакции (~20 кэВ) в токамаке применяются методы дополнительного нагрева. Инжекция пучков нейтральных атомов (NBI) и ионный циклотронный резонансный нагрев плазмы (ИЦР-нагрев) являются широко используемыми методами безындукционного нагрева плазмы в токамаках [1-4]. Энергия, передаваемая с помощью дополнительного нагрева, поглощается компонентами плазмы, в результате чего в плазме происходит генерация быстрых ионов. Наибольший интерес представляет так называемая схема трех-ионного ИЦР-нагрева с инжекцией нейтрального пучка, которая позволяет обеспечить генерацию быстрых α -частиц в плазме без непосредственного использования D-T плазмы. Такой сценарий нагрева активно применяется в экспериментах по генерации быстрых α -частиц и имитации их поведения в плазме на токамаке JET [A1, A2, A12].

Кроме того, быстрые ионы рождаются в термоядерной плазме в результате вторичного взаимодействия быстрых ионов с другими компонентами плазмы. В частности, рассматривается процесс генерации быстрых ионов отдачи за счет близких столкновений ионов основной плазмы с энергичными α -частицами, рожденными в DT реакции [5]. А также перечислены основные реакции синтеза, протекающие в плазме токамака, приводящие к рождению быстрых частиц, и ядерные реакции, которые являются результатом взаимодействия быстрых ионов и ионов примесей плазмы. Регистрация нейтронов и гамма-квантов, излучаемых высокотемпературной плазмой, предоставляет возможность идентифицировать ядерные реакции, проходящие в плазме, а также получить информацию о распределении быстрых частиц.

Во второй главе рассмотрены существующие ядерно-физические методы регистрации нейтронов и гамма-излучения, применяемые в плазменных экспериментах. Большинство доступных методов регистрации нейтронов были реализованы на существующих токамаках, и в этой главе проведен обзор нейтронных детектирующих систем на различных условиях [6]. Среди всего многообразия нейтронных детектирующих систем выгодно выделяются компактные нейтронные спектрометры на основе органических сцинтилляторов NE213 и BC-501A со схожими параметрами за счет относительной дешевизны сцинтиллятора, возможности создавать детекторы с большим объемом рабочего вещества [7].

Как и другие сцинтилляторы (органические и неорганические), BC-501A чувствителен как к нейтронному, так и к гамма-излучению, которое возбуждает органические молекулы

BC-501A на разных уровнях, создавая световые импульсы с разной скоростью спада свечения, что позволяет эффективно разделять n - γ события [7]. Аппаратурные спектры нейтронного излучения, зарегистрированного в органическом сцинтилляторе, имеют форму прямоугольной ступени. Однако, в реальности распределение амплитуд электрических импульсов имеет существенно другой вид благодаря статистическому размытию края ступени и искажению ее формы за счет нелинейности световых хода, краевым эффектам и др. [8]. Эти свойства органического сцинтиллятора BC501-A приводят к необходимости проведения процедуры калибровки компактных нейтронных спектрометров, которая включает в себя параметризацию форм импульсов, соответствующих регистрации нейтронного и гамма-излучения, для их дальнейшего разделения, измерение функций отклика детекторов на моноэнергетическое нейтронное излучение и определение энергетической зависимости эффективности регистрации нейтронов.

Также в этой главе рассмотрены ядерно-физические процессы, лежащие в основе методов измерения гамма-излучения, а также детекторы, применяемые в гамма-спектрометрии, и гамма-спектрометрические системы, установленные на различных токамаках [9]. Существующие технологии предоставляют два типа детекторов гамма-излучения, удовлетворяющих высоким требованиям использования в плазменном эксперименте: сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы [9]. Среди сцинтилляторов широко распространено применение кристаллов быстрого сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, а из полупроводниковых детекторов преимущественно используются детекторы на основе особо чистого германия, HPGe.

Токамак JET имеет наиболее совершенную систему гамма-спектрометрии среди действующих токамаков. На токамаке JET энергетические спектры гамма-излучения измеряются с помощью различных устройств с горизонтальной и вертикальной линиями обзора [A13]. В систему гамма-спектрометрии входят два спектрометра большого размера на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ $\varnothing 76,2 \text{ мм} \times 152,4 \text{ мм}$ [A5] с вертикальной линией обзора и один аналогичный спектрометр с тангенциальной линией обзора плазмы [A7]. В некоторых разрядах один из вертикальных детекторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ заменяется полупроводниковым HPGe спектрометром. В дополнение к высокоэффективным спектрометрам используется гамма-камера, состоящая из 19 компактных $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ детекторов с размерами кристаллов $\varnothing 25 \text{ мм} \times 17 \text{ мм}$ с 10 горизонтальными и 9 вертикальными линиями обзора в полоидальном сечении плазмы.

В этой главе представлены два метода анализа спектров гамма-излучения, основанные на изучении интенсивностей гамма-линий, наблюдаемых в плазме токамака, а также основанные на изучении форм гамма-линий, искаженных и уширенных за счет эффекта Доплера [A13]. Описаны физические процессы, лежащие в основе генерации гамма-излучения в плазме и используемые в анализе.

Третья глава посвящена разработке и созданию нейтронных спектрометрических систем на токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе ТУМАН-3М и Глобус-М2. На токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2 ФТИ им. А.Ф. Иоффе проводятся эксперименты по нагреву дейтериевой плазмы инъекцией пучка нейтрального дейтерия. Такие разряды сопровождаются испусканием потоков нейтронов с энергией 2,45 МэВ из DD реакции синтеза [10,11]. Для изучения распределения быстрых ионов дейтерия в токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2, а также для оптимизации режимов NBI нагрева были разработаны две нейтронные спектрометрические системы. Основная задача системы нейтронной спектрометрии заключается в предоставлении данных об энергетическом распределении нейтронов в разрядах с NBI нагревом [A8, A11].

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе была разработана методика калибровки компактных нейтронных спектрометров на основе сцинтиллятора BC-501A, включающая цифровые методы об-

работки сигналов, получаемых с нейтронных спектрометров BC-501A, и методику проведения нейтрон-гамма разделения [A4]. Методика нейтрон-гамма ($n\gamma$) разделения реализуется в специальном коде DeGaSum, в котором фиксируются параметры аппаратного отклика при регистрации гамма-кванта или нейтрона. Форма импульса, соответствующего зарегистрированному детектором единичному событию, с хорошей точностью описывается формулой [9]:

$$U(E, t) = A(E) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}}\right)^p \cdot \left(e^{-\frac{t-t_0}{\tau_2}} + B \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau_3}}\right), \quad (1)$$

где $A(E)$ – амплитуда импульса, пропорциональная зарегистрированной энергии частицы, t_0 – время, соответствующее началу импульса, τ_1 , τ_2 , τ_3 , B и p – параметры, соответствующие конкретной электронной схеме преобразования сигнала и временным характеристиками импульса высвечивания. Импульс

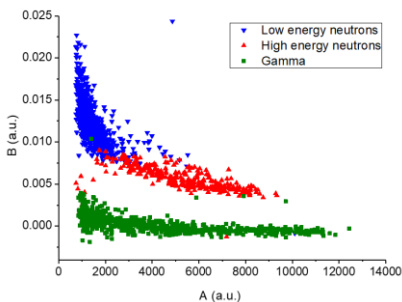


Рисунок 1. – Результаты нейтрон-гамма разделения, основанного на разделении по форме импульса: параметр B (формула (1)) в зависимости от амплитуды импульса A (формула (1)) [A4]

каждого сигнала может быть описан путем варьирования параметров A , t_0 , B , а остальные параметры в формуле (1) должны быть зафиксированы. Параметр B , который описывает хвостовую часть импульса, отличается для нейтронного и гамма-импульса, что позволяет разделить эти события. На практике применяется набор из трех форм импульсов: для описания регистрации гамма-события, для описания регистрации нейтронов с высокой и низкой энергиями. Каждый импульс описывается одной формой импульса из набора. Диаграмма $n\gamma$ -разделения, основанного на разделении по форме импульса показана на Рисунке 1.

В методике калибровки компактных нейтронных спектрометров BC-501A в качестве источника нейтронов была предложена ядерная реакция ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$. В данной реакции после испускания нейтрона энергетической группы n_1 рождается ядро ${}^{12}\text{C}^*$, находящееся в первом возбужденном состоянии, возбуждение которого снимается излучением гамма-кванта с энергией 4,44 МэВ. Из кинематики ядерной реакции следует, что энергия нейтронов n_1 , попадающих в детектор, зависит от угла обзора мишени детектором относительно направления пучка налетающих ионов ${}^4\text{He}$, что в свою очередь предоставляет возможность измерения нейтронов в широком диапазоне энергий. Процесс протекания ядерной реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ позволяет реализовать метод нейтрон-гамма совпадений, который основывается на синхронной регистрации гамма-излучения и нейтронов, рождающихся в результате протекания реакции, и выделить моноэнергетические нейтроны n_1 .

Описанная методика калибровки нейтронных спектрометров, включающая в себя метод $n\gamma$ -разделения и поиска нейтрон-гамма ($n\gamma$) совпадений, была применена в измерениях на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Была проведена серия экспериментов по измерению функций отклика компактных нейтронных спектрометров на основе жидкого органического сцинтиллятора BC-501A с размерами $\varnothing 50,8 \text{ мм} \times 50,8 \text{ мм}$ [A4]. Детекторы располагались на расстоянии 50 см от ${}^9\text{Be}$ мишени, и их положение изменялось относительно оси пучка ионов. В измерениях было возможно менять положение каждого детектора от 0° до 150° относительно направления пучка. Также использовался гамма-спектрометр на основе кристалла быстрого сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce}) \varnothing 76,2 \text{ мм} \times 76,2 \text{ мм}$ для регистрации 4,44 МэВ

гамма-квантов, который располагался на расстоянии $\sim 3,5$ см от мишени. Сигналы детекторов BC-501A и LaBr₃(Ce) синхронно оцифровывались с частотой дискретизации 500 МГц. В экспериментах на циклотроне ускорялись ионы ⁴He⁺² до энергий 2,055, 5,53, 6,05 и 10,08 МэВ. При таком расположении детекторов относительно мишени и при таких выбранных энергиях ионов ⁴He время пролета 4,44 МэВ гамма-кванта от мишени до LaBr₃(Ce) гамма-детектора составляет примерно 0,15 нс. При этом время пролета нейтронов n_1 при фиксированном расстоянии до детектора d определяется их энергией E : $t=72,3d(1/E)^{1/2}$, и составляет от 11 до 26 нс в этих экспериментах, что позволяет по этой временной задержке между регистрацией гамма-кванта и нейтрона выделить моноэнергетическую группу нейтронов n_1 с определенной энергией. Достоинством метода поиска $n\gamma$ -совпадений является относительно простое определение эффективности регистрации нейтронов нейтронным спектрометром, ε , которая определяется как отношение числа зарегистрированных нейтронов n_1 , a_{n1} , к числу зарегистрированных 4,44 МэВ гамма-квантов, a_γ , с учетом геометрического фактора, G , и коэффициента углового распределения вылета нейтронов, k_{n1} : $\varepsilon=a_{n1}/(a_\gamma \cdot G \cdot k_{n1})$ [A4].

В результате проведения экспериментов по калибровке компактных нейтронных спектрометров были получены функции отклика двух нейтронных спектрометров на основе сцинтиллятора BC-501A на моноэнергетическое нейтронное излучение в широком диапазоне энергий от 1,9 до 10,4 МэВ. Примеры измеренных функций отклика показаны на Рисунке 2. Кроме того, была определена зависимость эффективности детектора от энергии регистрируемого нейтрона для порога регистрации $E_n=1,3$ МэВ, представленная на Рисунке 3. Эффективность регистрации нейтронов для данных спектрометров достигает максимума $\sim 25\%$ при энергии $\sim 4,5$ МэВ.

Система нейтронной спектрометрии токамака ТУМАН-3М включает в себя компактный нейтронный детектор на основе органического сцинтиллятора BC-501A Ø50,8 мм × 50,8 мм [A8]. Нейтронный детектор защищен магнитным экраном от рассеянного магнитного поля токамака и помещен в свинцовый бокс для защиты от жесткого рентгеновского излучения, падающего на детектор из плазмы. Спектрометр BC-501A располагается на расстоянии ~ 250 см от оси тора и имеет тангенциальную линию обзора плазмы. Сигнал детектора оцифровывался в течение всего разряда с частотой

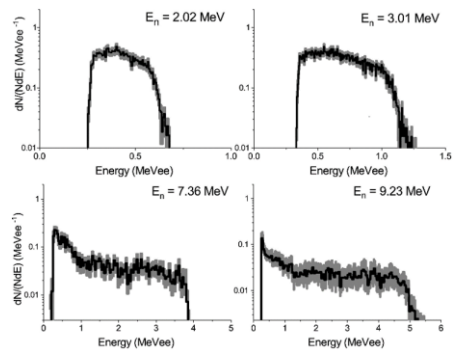


Рисунок 2. – Функции отклика компактных нейтронных спектрометров, нормированные на эффективность регистрации нейтронного излучения. Неопределенности показаны серой областью [A4]

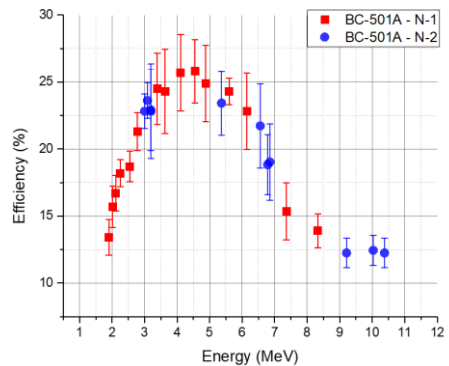


Рисунок 3. – Зависимость эффективности регистрации нейтронного излучения для порога регистрации $E_n=1,3$ МэВ от энергии нейтронов [A4]

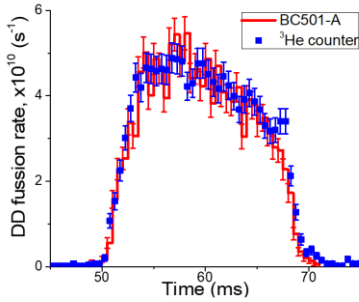


Рисунок 4. – Временная эволюция скорости термоядерной DD-реакции с временным шагом 0.5 мс в разряде #20070810, полученная с помощью нейтронного спектрометра BC-501A (красная линия) и нейтронного газового счетчика на основе ^3He (синие точки) [A8]

ТУМАН-3М энергия инжектированного пучка дейтерия находилась в диапазоне от 20 до 27 кэВ. После применения процедуры γ -разделения была получена скорость регистрации нейтронов спектрометром BC-501A.

Скорость счета спектрометра BC-501A позволяет наблюдать эволюцию нейтронного выхода во время разряда плазмы, что в свою очередь дает оценку скорости DD реакции. Чтобы получить абсолютные значения нейтронного выхода и скорости реакции синтеза, при анализе данных были учтены эффективность регистрации нейтронов, положение детектора, геометрический фактор, определяемый положением детектора, вероятность испускания нейтрона в направлении детектора.

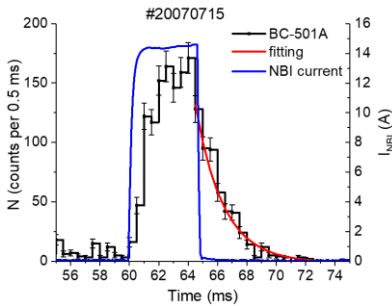


Рисунок 5. – Сигналы, измеренные во время разряда плазмы токамака ТУМАН-3М #20070715: синяя линия – ток источника ионов I_{NBI} , А; черная линия – скорость счета нейтронного спектрометра BC-501A, отсчеты в 0.5 мс; красная линия – экспоненциальная кривая, описывающая спад скорости счета нейтронного спектрометра, отсчеты в 0,5 мс [A8]

500 МГц и обрабатывался в режиме офлайн. Процедура γ -разделения, описанная выше, была применена при обработке сигналов, измеренных нейтронным детектором BC-501A на токамаке ТУМАН-3М, в результате чего были получены спектры нейтронного и гамма-излучения.

Для восстановления энергетического распределения нейтронов, рожденных в плазме во время разрядов токамаков ТУМАН-3М и Глобус-М2, использовался код DeGaSum. Алгоритмы восстановления распределения нейтронов подробно описаны в [A3,12]. Для восстановления функции энергетического распределения нейтронов и получения количественной оценки нейтронного выхода во время разряда плазмы, использовались функции отклика, полученные в ходе процедуры калибровки, описанной выше.

В экспериментах с инжекцией пучка нейтрального дейтерия в D-плазму токамака ТУМАН-3М энергия инжектированного пучка дейтерия находилась в диапазоне от 20 до 27 кэВ. После применения процедуры γ -разделения была получена скорость регистрации нейтронов спектрометром BC-501A. Скорость счета спектрометра BC-501A позволяет наблюдать эволюцию нейтронного выхода во время разряда плазмы, что в свою очередь дает оценку скорости DD реакции. Чтобы получить абсолютные значения нейтронного выхода и скорости реакции синтеза, при анализе данных были учтены эффективность регистрации нейтронов, положение детектора, геометрический фактор, определяемый положением детектора, вероятность испускания нейтрона в направлении детектора. Прохождение нейтронного излучения из плазмы до детектора моделировалось методом Монте-Карло с помощью кода MCNP. Временная эволюция скорости DD синтеза представлена на Рисунке 4 (красная линия) для разряда плазмы токамака ТУМАН-3М #20070810. Общая ошибка измерения скорости DD-синтеза не превышает 10% [A8]. Калиброванный нейтронный ^3He -счетчик, который также использовался в нейтронных измерениях на токамаке ТУМАН-3М, дает аналогичные результаты по оценке нейтронного выхода, учитывая эффективность счетчика (Рисунок 4, синие точки).

На основе проведенных нейтронных измерений было оценено время замедления быстрых ионов D, инжектированного в плазму ТУМАН-3М. Для этой цели был проанализирован спад нейтронного выхода в разряде #20070715

после окончания инъекции пучка дейтерия. Во время этого разряда энергия дейтерий инжектировалась с энергией $E_b=27$ кэВ. Временная эволюция скорости счета нейтронного спектрометра ВС-501А в данном разряде показана на Рисунке 5. Характерное время спада скорости счета нейтронного спектрометра $\tau_n \approx 1,88$ мс (красная линия на Рисунке 5). Измерение времени спада нейтронных потоков позволяет оценить общее время удержания быстрых ионов дейтерия, генерирующих поток нейтронов, τ_{loss} , которое определяется характерным временем потерь за счет перезарядки, неустойчивостей пучка, полагая, что $1/\tau_n \approx 1/\tau_{loss} + 1/\tau_s$. Здесь $\tau_s = (\tau_{se}/3) \cdot \ln[(E_b^{3/2} + E_c^{3/2}) / (E_n^{3/2} + E_c^{3/2})]$ – характерное время замедления быстрого дейтерия до энергии E_c , при которой сечение DD-реакции уменьшается в e раз относительно значения энергии пучка E_b [13,14]. τ_{se} – сплитцеровское время замедления на электронах; E_c – критическая энергия $E_c = 14,8 \cdot T_e \cdot A_b \cdot Z_i^{4/3} / A_i^{2/3}$ (Z_i – зарядовое число ионов плазмы; A_i – атомный номер ионов плазмы) [13]. Расчеты показали, что в исследуемом разряде $\tau_s = 2,2$ мс. Измеренное время спада нейтронного потока $\tau_n \approx 1,88$ мс дает оценку времени удержания быстрых ионов, генерирующих DD нейтроны, $\tau_{loss} \approx 14$ мс. Этот результат свидетельствует о том, что кулоновское замедление является преобладающим механизмом потерь энергии быстрых ионов в рассматриваемом разряде. Время спада скорости счета нейтронного спектрометра $\tau_n = 1,88$ мс, полученное с помощью спектрометра ВС-501А, согласуется с измерениями, проведенными с помощью ^3He счетчика, в разряде #20070715. Значение $\tau_n \sim 0,85\tau_s$ находится в хорошем соответствии с данными, полученными в предыдущих исследованиях на токамаке ТУМАН-3М [15], в которых $\tau_n \sim 0,84\tau_s$.

Система нейтронной диагностики на токамаке Глобус-М2 содержит два газоразрядных счетчика на основе изотопа ^{10}B и два компактных нейтронных спектрометра на основе органического сцинтиллятора ВС-501А размером $\text{Ø}50,8 \text{ мм} \times 50,8 \text{ мм}$ [A11]. Схема расположения нейтронных спектрометров относительно токамака Глобус-М2 представлена на Рисунке 6. Первый ВС-501А спектрометр (NS-1) располагается в свинцовой защите на расстоянии от передней стенки защиты до вакуумной камеры токамака ~ 430 см. Второй спектрометр (NS-2) также был помещен в свинцовую защиту на расстоянии 210 см от камеры токамака. Оба нейтронных спектрометра защищены от действия магнитного поля токамака магнитными экранами. Нейтронный выход из плазмы токамака Глобус-М2 измеряется с помощью двух ^{10}B счетчиков СНМ-11. Первый счетчик (NC-1) установлен рядом со спектрометром NS-1 на расстоянии приблизительно 4,5 м от камеры токамака, и его положение зафиксировано. Второй счетчик может перемещаться по залу токамака на расстояние от 1 до 11 м от камеры, чтобы обеспечить измерения нейтронного выхода в более широком диапазоне. Была проведена *in situ* калибровка нейтронных счетчиков с использованием Am-Be источника нейтронов для обеспечения точных измерений общего выхода нейтронов из плазмы токамака Глобус-М2 [A9]. Системой нейтронной диагностики проводились измерения нейтронного излучения, рожденного в

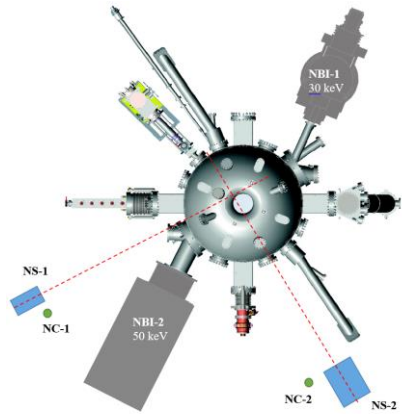


Рисунок 6. – Схема расположения системы нейтронной диагностики в зале токамака Глобус-М2. NS-1, NS-2 – нейтронные спектрометры №1 и №2, NC-1, NC-2 – нейтронные счетчики на основе ^{10}B №1 и №2; NBI-1 – инжектор пучка нейтральных частиц, 30 кэВ, NBI-2 – инжектор пучка нейтральных частиц, 50 кэВ [A11]

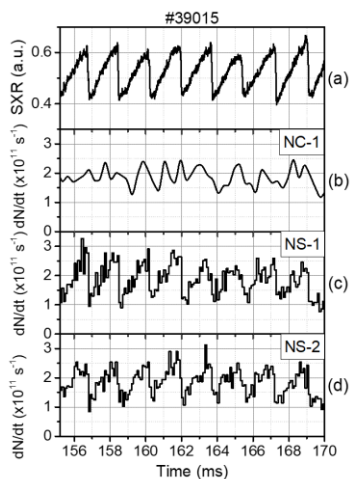


Рисунок 7. – Пилообразные осцилляции, наблюдавшиеся во время разряда #39015: а) сигнал SXR, б) нейтронный выход из плазмы, зарегистрированный NC-1, в) нейтронный выход из плазмы, зарегистрированный NS-1, д) нейтронный выход из плазмы, зарегистрированный NS-2 [A11]

На распределение быстрых ионов в плазме влияет множество кинетических эффектов, изучение которых выходит за рамки задач настоящих исследований, направленных на демонстрацию возможности диагностики быстрых ионов с помощью нейтронных измерений. Компактные нейтронные спектрометры позволяют измерить энергетические спектры DD нейтронов, испускаемых из плазмы. На восстановленных из измерений на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2 энергетических распределениях нейтронов наблюдается характерный пик в области энергий 2-2,5 МэВ, что соответствует регистрации нерассеянных нейтронов и нейтронов, однократно рассеянных на малый угол, рожденных в DD реакции.

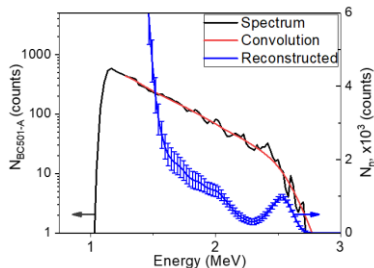


Рисунок 8. – Результат восстановления энергетического распределения нейтронов (синяя линия), полученного из спектра нейтронного излучения (черная линия). Красная линия – свертка полученного энергетического распределения нейтронов с функциями отклика спектрометра [A11]

плазме во время разрядов токамака Глобус-М2 с инжекцией пучка нейтрального дейтерия. Энергия инжектированного пучка дейтерия в этих экспериментах составляла около 28 кэВ.

В разряде плазмы токамака Глобус-М2 #39015 наблюдались пилообразные колебания. Сигнал, зарегистрированный нейтронными спектрометрами NS-1 и NS-2, нормированный на нейтронный выход из плазмы, представлен на Рисунке 7с,д вместе с сигналом, зарегистрированным нейтронным счетчиком NC-1 (Рисунок 7б), который использовался для калибровки спектрометров. Сигналы нейтронных спектрометров синхронизированы с сигналом датчика мягкого рентгеновского излучения (SXR), представленном на Рисунке 7а). Во время срыва пилообразных осцилляций нейтронный выход падает на ~60% от собственного максимума, что демонстрирует существенные потери или перераспределение быстрых ионов в плазме во время развития неустойчивости такого рода [A11].

Влияние пилообразных колебаний на распределение быстрых ионов описывается моделью перемешивания плазмы, которая была предложена Б.Б. Кадомцевым в 1975 г. [16] и развивалась во многих работах [17]. На настоящий момент это описание представляет собой достаточно сложную модель с многими параметрами.

В качестве примера, на Рисунке 8 (черная линия) представлен энергетический спектр нейтронов, полученный путем суммирования результатов измерений во время разрядов плазмы #40257, 40258, 40260 токамака Глобус-М2 для достижения большей статистики. Используя код DeGaSum и полученные функции отклика спек-

трометров ВС-501А, было восстановлено энергетическое распределение нейтронов (Рисунок 8, синяя линия) [A11]. Компактные нейтронные спектрометры ВС-501А показали себя как эффективный инструмент для измерения нейтронных потоков из плазмы токамака. Использование детекторов такого типа позволяет оценить нейтронный выход и интенсивность протекания реакций синтеза в разряде плазмы, а также изучать особенности энергетического распределения быстрых ионов в различных режимах нагрева плазмы инжекцией пучка нейтральных атомов [A10].

Четвертая глава посвящена применению методов анализа спектров гамма-излучения, представленных в Главе 2, в экспериментах с генерацией α -частиц, рожденных при инжекции пучков дейтерия в $D\text{-}^3\text{He}$ плазму токамака JET. Используя 3-ионный $D\text{-}(D_{\text{NBI}})\text{-}^3\text{He}$ сценарий нагрева, инжектированные частицы D_{NBI} были ускорены в центре $D\text{-}^3\text{He}$ плазмы до более высоких энергий с помощью ИЦР-волн, что привело к возникновению локализованного в центре плазмы источника α -частиц [18]. Основные параметры плазмы в этих экспериментах: ток плазмы, $I_p=2,5$ МА, магнитное поле $B_0\approx 3,7$ Тл, средняя электронная плотность $n_{e0}\approx 6\times 10^{19}\text{ м}^{-3}$, мощность ИЦР-нагрева и NBI $P_{\text{ИЦР}}\sim 4\text{-}6$ МВт, $P_{\text{NBI}}\sim 3\text{-}20$ МВт, концентрация ионов ^3He $n_{^3\text{He}}/n_e\approx 20\%\text{-}25\%$ [A5]. В $D\text{-}^3\text{He}$ плазме информация об источнике α -частиц (выход и пространственный профиль) может быть получена из измерений гамма-излучения 16,7 МэВ, рожденного в $^3\text{He}(d,\gamma)^5\text{Li}$ реакции, которая является второй ветвью $^3\text{He}+D$ реакции синтеза [19]. Спектр гамма-излучения, измеренный спектрометром LaBr₃(Ce) с вертикальной линией обзора, полученный путем суммирования данных из разрядов JET #94698, 94700, 94701 с похожими параметрами плазмы в энергетическом диапазоне от 10 до 20 МэВ, представлен на Рисунке 9 [A13]. Область локализации α -частиц, рожденных в плазме, была определена с помощью томографического восстановления профиля гамма-излучения, с использованием сигналов гамма-камеры. Доля источника гамма-излучения в диапазоне энергий $E>10$ МэВ, видимая для вертикального спектрометра в полоидальном сечении плазмы, была оценена как 60,4%. Из полученного спектра гамма-излучения были восстановлены интенсивности гамма-переходов в основное состояние (γ_0) и в первое возбужденное состояние (γ_1) ядер ^5Li , рожденных в $^3\text{He}(d,\gamma)^5\text{Li}$ реакции.

Из разложения гамма-спектра на две линии оценен коэффициент ветвления переходов в основное (I_0) и первое возбужденное состояние (I_1) в ^5Li как $I_0/I_1=1,12\pm 0,18$. Оно согласуется со значением $I_0/I_1=1,0\pm 0,2$, полученным в работе [20] при $E_D=480$ кэВ.

Для γ_0 -перехода известен коэффициент ветвления реакций $^3\text{He}(d,\gamma_0)^5\text{Li}^3\text{He}(d,p)^4\text{He}$, который позволяет из интенсивности линии γ_0 получить оценку скорости генерации α -частиц и зависит от энергии ионов D [21]. Для расчета скорости генерации α -частиц учитывалась зависимость коэффициента ветвления от энергии. Для этого коэффициент ветвления был усреднен по энергетическому распределению быстрых ионов дейтерия, рассчитанному кодом TRANSP, исходя из известных параметров NBI и ИЦР-нагрева в исследуемых разрядах [A13]. Используя среднее значение коэффициента ветвления $\langle B \rangle = 4,69 \times 10^{-5}$, была получена оценка скорости протекания $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ реакции в видимом объеме плазмы,

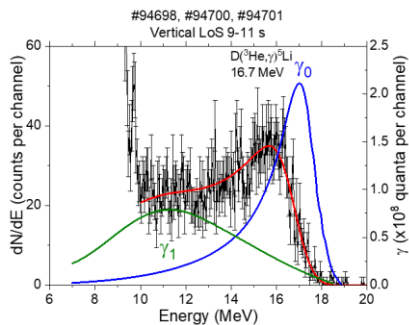


Рисунок 9. – Измеренный спектр гамма-излучения, полученный путем суммирования данных разрядов JET #94698, 94700, 94701 в диапазоне энергий от 10 до 20 МэВ, и восстановленное энергетическое распределение испущенных гамма-квантов γ_0 и γ_1 , показанное синей и зеленой линиями, соответственно [A13]

усредненная по трем разрядам #94698, 94700, 94701, равная $\sim 5,79 \times 10^{13} \text{ c}^{-1}$. Средняя скорость генерации α -частиц во всей плазме была оценена путем интегрирования по тору как $\langle R_{\alpha} \rangle \approx (1,45 \pm 0,4) \times 10^{16} \text{ c}^{-1}$ [A13]. Суммарная ошибка определения скорости рождения α -частиц составляет 27%. В то же время интенсивность D- ^3He реакции, оцененная из вычислений кодом TRANSP, составила $(1 \div 2) \times 10^{16} \text{ c}^{-1}$ [A5], что хорошо согласуется с экспериментальными наблюдениями, предоставленными гамма-спектрометрами.

Рожденные в $^3\text{He}(d,p)^4\text{He}$ реакции α -частицы удерживаются в плазме магнитным полем и обладают энергией, достаточной для взаимодействия с ионами примеси ^9Be . Это взаимодействие приводит к испусканию гамма-излучения с энергией 4,44 МэВ из $^9\text{Be}(\alpha, n\gamma)^{12}\text{C}$ реакции, которое наблюдалось в спектрах гамма-излучения, зарегистрированных гамма-спектрометрами, вместе с гамма-линиями из D+ ^9Be реакций (2,86, 3,37 и 3,59 МэВ) [A13].

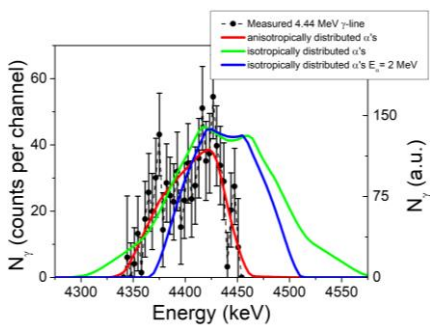


Рисунок 10. – Измеренная интегральная гамма-линия 4,44 МэВ из реакции $^9\text{Be}(\alpha, n\gamma)^{12}\text{C}$ (черные точки) и описание формы линии (красная линия), соответствующее энергетическому и угловому распределению α -частиц, представленному на Рисунке 11; зеленая линия соответствует форме линии в случае изотропного углового распределения α -частиц; синяя линия – форма линии, рассчитанная для α -частиц с энергией 2 МэВ с изотропным угловым распределением [A13]

держит значительную фракцию высокоэнергичных α -частиц с энергией 5–7 МэВ. Присутствие высокоэнергичных α -частиц объясняется кинематикой ядерной реакции между ионами ^3He и D. Угловое распределение α -частиц (Рисунок 11b)). было получено относительно угла θ между направлением движения α -частиц и линией обзора HPGe спектрометра. Полученное угловое распределение обладает сильной анизотропией с максимумом в диапазоне углов 50° – 100° . Эта анизотропия вызывает искажение гамма-пика и его смещение в область низких энергий.

Для сравнения на Рисунке 10 зеленой линией показана форма гамма-линии 4,44 МэВ, рассчитанная для полученного энергетического распределения α -частиц (Рисунок 11a)) в предположении изотропного углового распределения. Изотропное угловое распределение

Исследования удерживаемых α -частиц были проведены в экспериментах с увеличенной мощностью NBI нагрева. В этих экспериментах использовался HPGe спектрометр с вертикальной линией обзора, который позволяет наблюдать смещение и искажение формы линии 4,44 МэВ за счет эффекта Доплера. На Рисунке 10 показана гамма-линия с энергией 4,44 МэВ из реакции $^9\text{Be}(\alpha, n\gamma)^{12}\text{C}$ после вычитания фона, полученная путем суммирования данных из разрядов #95677, #95679, #95680, #95681, #95683, #95684, #95686, #95697 (черные точки) со схожими параметрами плазмы. Восстановленное с помощью анализа Доплеровской формы линии распределение ионов по энергии и углам, полученное с помощью кода DeGasum, показаны на Рисунке 11 [A13].

Распределение получено на основе имеющихся данных о нейтрон-гамма корреляции в диапазоне энергий $E_{\alpha} \sim 1,9$ –7 МэВ. Анализ не проводился для α -частиц с энергией $E_{\alpha} < 1,9$ МэВ, поскольку сечение $^9\text{Be}(\alpha, n\gamma)^{12}\text{C}$ реакции в этом энергетическом диапазоне очень мало [22]. Полученное энергетическое распределение α -частиц содержит

дает симметричную форму линии значительно шире наблюдаемой. Форма линии, полученная для моноэнергетических частиц с энергией 2 МэВ, изотропно распределенных, шире измеренной линии (Рисунок 10, синяя линия). Таким образом, измерение Доплеровской формы гамма-линии с энергией 4,44 МэВ позволило заметить, что несмотря на то, что угловое распределение рожденных α -частиц изотропно, в эксперименте наблюдалась сильная угловая анизотропия удерживаемых α -частиц в видимом для детектора объеме с большой фракцией высокоэнергичных α -частиц [A13]. Этот эффект вызван движением удерживаемых α -частиц в токамаке JET по замкнутой банановой траектории [23]. Детектор с вертикальной линией обзора наблюдает только часть этой траектории, на которой частицы движутся по спирали в направлении от детектора.

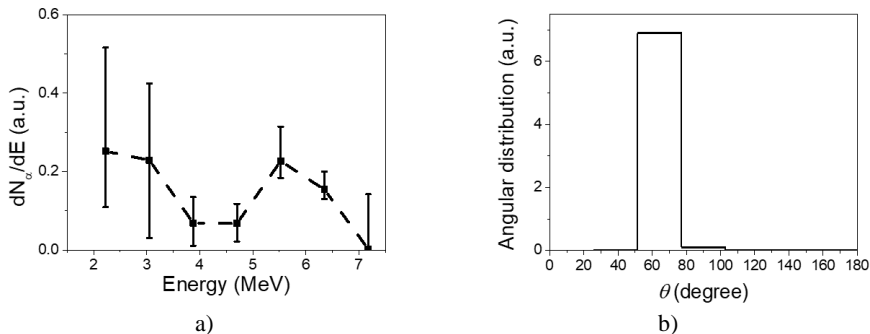


Рисунок 11. – Энергетическое а) и угловое б) распределение удерживаемых α -частиц, восстановленные из HPGe измерений гамма-линии 4,44 МэВ в видимом объеме плазмы. Угловое распределение представлено относительно угла между направлением движения α -частицы и линией обзора HPGe детектора [A13]

Пятая глава посвящена подготовке к измерению энергетической зависимости сечений гамма-переходов ядер ^{11}B и ^{11}C , рожденных в ядерных реакциях ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, \gamma){}^{11}\text{B}$ и ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, \gamma){}^{11}\text{C}$ между ионами ${}^3\text{He}$ и ${}^9\text{Be}$, необходимых для более детального анализа быстрых ионов в плазме с содержанием ионов ${}^3\text{He}$ и ионов примеси ${}^9\text{Be}$ [A6]. На настоящий момент сведения о сечениях ядерных реакций с участием ядер ${}^9\text{Be}$ и изотопа ${}^3\text{He}$ имеют отрывочный характер, отсутствуют источники, в которых бы была изложена детальная информация о функциях возбуждения гамма-переходов в указанных реакциях в широком диапазоне энергий налетающих частиц. Кроме того, для анализа распределений быстрых ионов в плазме необходима информация об угловой зависимости испускаемых гамма-квантов. В большинстве исследований угловая зависимость не изучалась.

Для проведения изучения зависимости сечений гамма-переходов ядер ^{11}B и ^{11}C в реакциях ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, \gamma){}^{11}\text{B}$ и ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, \gamma){}^{11}\text{C}$ в экспериментах на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе была разработана и изготовлена экспериментальная установка, которая может быть использована при измерении функций возбуждения гамма-переходов в ядрах, рожденных в реакциях между изотопами Н и He и ядрами Be, B и C. Установка включает в себя камеру реакций, позволяющая с особой точностью измерить заряд пучка ионов, попавшего на мишень. Спектры гамма-излучения в разработанной установке одновременно измеряются двумя HPGe детекторами, наблюдающими мишень под различными углами относительно направления пучка ионов. В ходе подготовки к измерениям энергетической зависимости сечений гамма-переходов в реакциях между ${}^9\text{Be}$ и ${}^3\text{He}$ были проведены предварительные

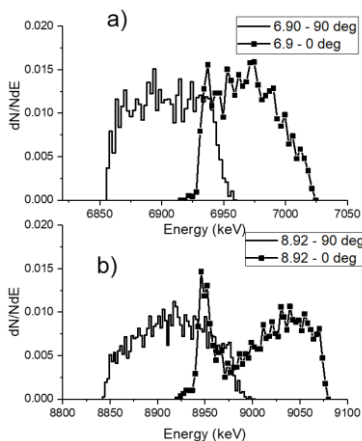


Рисунок 12 – Формы линий гамма-переходов а) 6,9 МэВ из реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, n){}^{11}\text{C}$ и б) 8,92 МэВ из реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, p){}^{11}\text{B}$, измеренные под углами 0° и 90° [А6]

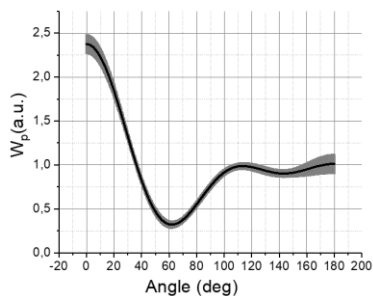


Рисунок 13. – Угловое распределение вылета протонов при заселении уровня 8,92 МэВ ядра ${}^{11}\text{B}$ в реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, p){}^{11}\text{B}$ относительно направления пучка ${}^3\text{He}$ при $E_{\text{He}} 2,57$ МэВ. Неопределенности определения углового распределения отмечены серой областью [А6]

ходов 2, 2,12, 4,8, 6,9, 7,29 и 8,92 МэВ. Проводится обработка и анализ полученных экспериментальных данных.

измерения спектров гамма и нейтронного излучения из бериллиевой мишени, облучаемой пучком ионов ${}^3\text{He}$ с энергией 2,57 МэВ [А6]. Спектры гамма-излучения измерялись двумя HPGe спектрометрами: ORTEC GMX45P4-83-CW-PL и CANBERRA GR5021. Также в качестве монитора использовался дополнительный гамма-спектрометр LaBr₃(Ce) с размерами $\varnothing 38$ мм \times 51 мм. В измерениях спектров нейтронов из реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, n){}^{11}\text{C}$ использовался спектрометр на основе органического сцинтиллятора BC501-A. В ходе эксперимента положение HPGe детекторов менялось относительно направления пучка ионов, падающих на мишень, что позволило измерить доплеровские формы линий при углах обзора 0° , 30° , 60° , 90° и 120° . Расстояние от мишени до детекторов составляло 40 см. На Рисунке 12 показаны формы линий переходов 6,9 МэВ из реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, n){}^{11}\text{C}$ и 8,92 МэВ из реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, p){}^{11}\text{B}$ [А6]. Анализ Доплеровской формы гамма-линий позволил восстановить угловое распределение продуктов реакций (п и р), проходящих в бериллиевой мишени при облучении пучком ${}^3\text{He}$.

Поиск углового распределения продуктов реакций находился методом, описанным в работе [22]. На Рисунке 13 показано угловое распределение вылета протонов при заселении уровня 8,92 МэВ ядра ${}^{11}\text{B}$ в реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, p){}^{11}\text{B}$ относительно направления пучка ${}^3\text{He}$. Таким образом, были подготовлены измерения сечений и угловых распределений гамма и нейтронного излучения в широком диапазоне энергий [А6]. С использованием разработанной системы измерений спектров нейтронного и гамма излучения в ядерных реакциях с участием легких ядер на пучке циклотрона ФТИ им. А.Ф. Иоффе была проведена серия экспериментов по измерению угловых распределений гамма излучения в реакциях ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, n){}^{11}\text{C}$ и ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, p){}^{11}\text{B}$ [24]. Были измерены спектры и угловое распределение гамма-излучения в диапазоне 1,52-7 МэВ и формы линий гамма-пере-

В заключении приводятся результаты проведенных исследований:

1. Разработана и применена на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе методика калибровки и обработки сигналов детекторов нейтронного излучения на основе органических сцинтилляторов. Методика калибровки основана на методе нейтрон-гамма совпадений в комбинации с времяпролетной методикой. Была проведена экспериментальная кампания по калибровке двух нейтронных спектрометров на основе сцинтиллятора BC-501A. Метод нейтрон-гамма совпадений позволил выделить моноэнергетические нейтроны из ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ реакции в широком диапазоне энергий от 1,9 до 10,4 МэВ. В результате применения этого метода были получены функции отклика двух нейтронных спектрометров на основе сцинтиллятора BC-501A на моноэнергетическое нейтронное излучение в указанном энергетическом диапазоне. Была определена зависимость эффективности детекторов от энергии регистрируемых нейтронов.
2. На токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе ТУМАН-3М и Глобус-М2 были разработаны спектрометрические системы нейтронной диагностики. Системы позволяют проводить спектрометрические измерения нейтронных потоков из плазмы токамака со скоростью счета до 10^6 c^{-1} . В экспериментах с инжекцией пучка дейтерия в дейтериевую плазму, с помощью спектрометров BC-501A были измерены экспериментальные спектры нейтронного излучения. С помощью кода DeGaSum было восстановлено энергетическое распределение нейтронов, рожденных в DD-реакции в разрядах плазмы токамаков Глобус-М2 и ТУМАН-3М. На основе нейтронных измерений была получена временная эволюция нейтронного выхода в течение разряда плазмы. Из полученных данных была оценена интенсивность DD реакции, которая достигала порядка 10^{10} - 10^{11} c^{-1} на токамаке ТУМАН-3М и порядка 10^{11} c^{-1} на токамаке Глобус-М2. В нейтронных измерениях на Глобус-М2 наблюдалось влияние пилообразных осцилляций на выход нейтронов и удержание быстрых ионов в плазме.
3. Развита методика анализа спектров гамма-излучения, генерируемого в плазме, для изучения быстрых ионов, включая удерживаемые α -частицы, рожденные в процессе реакций синтеза. Из анализа интенсивности гамма-излучения получены оценки скорости реакции синтеза в разрядах с инжекцией дейтериевых пучков и ИЦР-нагревом. Интенсивность генерации α -частиц была оценена в видимом для детектора объеме плазмы из измерений гамма-излучения реакции ${}^3\text{He}(d, \gamma){}^5\text{Li}$ с энергией 16,7 МэВ. С учетом области локализации источника α -частиц была оценена общая скорость протекания ${}^3\text{He}$ -D реакции синтеза $\langle R_\alpha \rangle \approx (1,45 \pm 0,4) \times 10^{16} \text{ c}^{-1}$. Анализ уширенной за счет эффекта Доплера формы линии 4,44 МэВ из реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ позволил восстановить энергетическое и угловое распределение удерживаемых α -частиц, рожденных в реакции D- ${}^3\text{He}$ синтеза. Было обнаружено, что в видимом для детектора объеме плазмы

удерживаемые α -частицы обладают сильной угловой анизотропией и содержат большую долю высокоэнергетических частиц.

4. На циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе разработана экспериментальная установка для измерения функций возбуждения гамма-переходов в ядрах, рожденных в реакциях между изотопами водорода и гелия и ядрами Ве, В и С. Подготовлен эксперимент по измерению функций возбуждения гамма-переходов ядер ^{11}B и ^{11}C , являющихся продуктами ядерных реакций между легкими ядрами плазменного топлива и ядрами примесей в плазме токамака. Проведены предварительные измерения спектров гамма и нейтронного излучения при облучении бериллиевой мишени пучком ^3He . Восстановлено угловое распределение вылета протонов относительно направления движения ядра ^3He .

Направления развития темы исследований:

- Разработанная методика калибровки и обработки сигналов детекторов нейтронного излучения может быть применена к детекторам на основе любого органического сцинтиллятора. В будущем разработанная методика может быть применена при калибровке нейтронного спектрометра, разрабатываемого для токамака ИТЭР;
- На токамаке Глобус-М2 недавно был введен в работу второй инжектор пучка нейтральных частиц и ожидается получение новых данных о нейтронных потоках в разрядах плазмы с применением двух инжекторов. Для уменьшения доли рассеянных нейтронов и числа наложенных импульсов будет проведена модернизации системы радиационной защиты нейтронных спектрометров;
- Методы анализа интенсивности гамма-излучения, генерируемого в плазме, позволяют получить оценки скорости DT реакции синтеза. Данный метод планируется применить в диагностике DT плазмы реактора ИТЭР. Анализ уширенной за счет эффекта Доплера формы линии 4,44 МэВ из реакции $^9\text{Be}(\alpha, n\gamma)^{12}\text{C}$ также будет применяться для анализа распределений удерживаемых α -частиц, рожденных в реакциях синтеза, в том числе в экспериментах на ИТЭР;
- Разработанная на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе экспериментальная установка для измерения функций возбуждения гамма-переходов в ядрах будет применена в экспериментах по уточнению сечений реакций между изотопами водорода и гелия и ядрами Ве, В и С. Будет закончена обработка и проведен анализ данных, полученных в экспериментах на циклотроне по облучению ^9Be мишени пучком ^3He с энергией в диапазоне 1,52-10 МэВ;
- Накопленный опыт и разработанные методики изучения распределений быстрых ионов в плазме токамака будут использованы при проектировании гамма-спектрометрической системы токамака ТРТ (Россия).

Список литературы

- [1] King-Lap Wong 1999 Plasma Phys. Control. Fusion 41 R1
- [2] S D Pinches et al 2004 Plasma Phys. Control. Fusion 46 B187
- [3] B N Breizman and S E Sharapov 2011 Plasma Phys. Control. Fusion 53 054001
- [4] ITER Physics Expert Group on Energetic Particles, Heating and Current Drive and ITER Physics Basis Editors 1999 Nucl. Fusion 39 2495.
- [5] V I Afanasyev et al 2013 Plasma Phys. Control. Fusion 55 045008
- [6] G. Ericsson, J Fusion Energy 38, 330–355 (2019).
- [7] G.Tardini, F.Gagnon-Moisan, A. Zimbal, Rev. Sci. Instrum. 87, 103504 (2016);
- [8] H. W. Broek and C. E. Anderson, Rev. Sci. Instrum. 31, 1063 (1960)
- [9] VG Kiptily, FE Cecil, SS Medley Plasma Phys. Control. Fusion 48 (2006) R59–R82
- [10] N. N. Bakharev et al Nucl. Fusion 59 (2019) 112022
- [11] V. A. Kornev et al Nucl. Fusion 57 (2017) 126005.
- [12] A.E. Shevelev, et al Nucl. Fusion 53 (2013) 123004.
- [13] W.W. Heidbrink, G.J. Sadler Nucl. Fusion 34 (1994) 535.
- [14] J. D. Strachan et al Nucl. Fusion 21, 67 (1981).
- [15] V. A. Kornev et al Tech. Phys. Lett. 39, 290–293 (2013).
- [16] Б.Б. Кадомцев Физика плазмы. 1975. Т. 1. В. 5. С. 710–715.
- [17] Ф.С. Зайцев и др. Доклады академии наук 2017 477 291-294.
- [18] M. Salewski, et al., Nucl. Fusion 56 (2016) 046009.
- [19] F.E. Cecil, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 10/11 (1985) 411–414
- [20] W. Buss, W. Del Bianco, H. Waffler, B. Ziegler, Nucl. Phys. A112 (1968) 47
- [21] F.E. Cecil et al, Phys. Review C 32 (1985) 690
- [22] В.Г. Киптильный и др., ВААНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. Спец. Вып. ТИЯС-ХI, 1997, стр. 223-233
- [23] S.E. Sharapov et al 2005 Nucl. Fusion 45 1168
- [24] М.В. Ильясова и др., тезис доклада на конференции ЯДРО-2021 (Санкт-Петербург, 20-25 сентября 2021)

Основные публикации автора по теме диссертации в журналах, индексируемых в БД “Web of Science” и “Scopus”

Общее число статей, опубликованных в журналах, индексируемых в БД “Web of Science”: 11

- A1. Nocente M., Dal Molin A., Eidiets N., Giacomelli L., Gorini G., Kazakov Y., Khilkevitch E., Kiptily V., **Iliasova M.**, Lvovskiy A., Mantsinen M., Mariani A., Panontin E., Papp G., Pautasso G., Paz-Soldan C., Rigamonti D., Salewski M., Shevelev A., Tardocchi M., JET and MST1 contributors, MeV range particle physics studies in tokamak plasmas using gamma-ray spectroscopy // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020. - Vol. 62. 014015
- A2. Kiptily V.G., Kazakov Y., Fitzgerald M., Nocente M., **Iliasova M.**, Khilkevitch E., Mantsinen M., Nave M.F.F., Ongena J., Sharapov S.E, Shevelev A.E., Stancar Z., Szepesi G., Taylor D.M.A. and Yakovenko Y.V., Excitation of elliptical and toroidal Alfvén Eigenmodes by 3He-ions of the MeV-energy range in hydrogen-rich JET plasmas // Nuclear Fusion. 2020. - Vol. 60. 112003
- A3. Khilkevitch E.M., Shevelev A.E., Chugunov I.N., **Iliasova M.V.**, Doinikov D.N., Gin D.B., Naidenov V.O., Polunovsky I.A., Advanced algorithms for signal processing scintillation gamma ray detectors at high counting rates // Nuclear

Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2020. - Vol. 977. 164309

- A4. **Iliasova M.V.**, Shevelev A.E., Khilkevitch E.M., Chugunov I.N., Minaev V.B., Gin D.B., Doinikov D.N., Polunovsky I.A., Naidenov V.O., Kozlovskiy M.A., Kudoyarov M.F., Calibration of neutron spectrometers based on a BC-501A liquid scintillator using the neutron-gamma coincidence method // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2020. - Vol. 983. 164590
- A5. Nocente M., Kazakov Ye.O., Garcia J., Kiptily V.G., Ongena J., Dreval M., Fitzgerald M., Sharapov S.E., Stancar Z., Weisen H., Baranov Y., Bierwage A., Craciunescu T., Dal Molin A., de la Luna E., Dumonti R., Dumortier P., Eriksson J., Giacomelli L., Giroud C., Goloborodko V., Gorini G., Khilkevitch E., Kirov K.K., **Iliasova M.**, Jacquet P., Lauber P., Lerche E., Mantsinen M.J., Mariani A., Mazzi S., Nabais F., Nave M.F.F., Oliver J., Panontin E., Rigamonti D., Sahlberg A., Salewski M., Shevelev A., Shinohara K., Siren P., Sumida S., Tardocchi M., Van Eester D., Varje J., Zohar A., JET Contributors, Generation and observation of fast deuterium ions and fusion-born alpha particles in JET D-He-3 plasmas with the 3-ion radio-frequency heating scenario // Nuclear Fusion. 2020. - Vol. 60. 124006
- A6. **Ильясова М.В.**, Шевелев А.Е., Хилькевич Е.М., Чугунов И.Н., Дойников Д.Н., Кудояров М.Ф., Найденов В.О., Полуновский И.А., Измерения спектров гамма- и нейтронного излучения в ядерных реакциях с ионами ^3He и ^9Be // Письма в Журнал Технической Физики. 2021. - Том 47. №3. Стр. 3-6
Iliasova M.V., Shevelev A.E., Khilkevitch E.M., Chugunov I.N., Doinikov D.N., Kudoyarov M.F., Naidenov V.O., Polunovsky I.A., Measurements of gamma- and neutron-radiation spectra in nuclear reactions with He-3 and Be-9 ions // Technical Physics Letters. 2021. - Vol. 47. No. 2. pp. 103-106
- A7. Nocente M., Craciunescu T., Gorini G., Kiptily V., Tardocchi M., Braic V., Curuia M., Dal Molin A., Figueiredo J., Giacomelli L., **Iliasova M.**, Kazakov Y., Khilkevitch E., Marcer G., Panontin E., Rigamonti D., Salewski M., Shevelev A., Soare S., Zoita V., Zychor I., A new tangential gamma-ray spectrometer for fast ion measurements in deuterium and deuterium-tritium plasmas of the Joint European Torus // Review of Scientific Instruments. 2021. - Vol. 92. No. 4. 043537
- A8. **Iliasova M.**, Shevelev A., Khilkevitch E., Lebedev S., Askinazi L., Kornev V., Minaev V., Tukachinsky A., Doinikov D., Polunovsky I., Naidenov V., Gin D., Measurements of neutron fluxes from tokamak plasmas using a compact neutron spectrometer // Review of Scientific Instruments. 2021. - Vol. 92. No. 4. 043560
- A9. Скрекель О.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., **Ильясова М.В.**, Тельнова А.Ю., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е., Калибровка нейтронных счетчиков токамака Глобус-М2 // Журнал Технической Физики. 2022. - Т. 92. №1. Стр. 32-35

- A10. Балаченков И.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., **Ильясова М.В.**, Курский Г.С., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Тельнова А.Ю., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е., Щеголев П.Б., Анализ потерь быстрых ионов, вызванных распространением тороидальных альфвеновских мод в плазме сферического токамака Глобус-М2 // Журнал Технической Физики. 2022. - Том 92. № 1. Стр. 45-51
- A11. **Ильясова М.В.**, Shevelev A.E., Khilkevitch E.M., Bakharev N.N., Skrekel O.M., Minaev V.B., Doinikov D.N., Gin D.B., Gusev V.K., Kornev V.A., Naidenov V.O., Novokhatskii A.N., Petrov Yu.V., Polunovsky I.A., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Telnova A.Yu., Varfolomeev V.I., Neutron diagnostic system at the Globus-M2 tokamak // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2022. - Vol. 1029. 166425
- A12. Kiptily V.G., Kazakov Ye.O., Nocente M., Ongena J., Belli F., Dreval M., Craciunescu T., Eriksson J., Fitzgerald M., Giacomelli L., Goloborodko V., **Ильясова М.В.**, Khilkevitch E.M., Rigamonti D., Sahlberg A., Salewski M., Shevelev A.E., Garcia J., Oliver H.J.C., Sharapov S.E., Stancar Z., Weisen H. and JET Contributors, Excitation of Alfvén eigenmodes by fusion-born alpha-particles in D3He plasmas on JET // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2022. - Vol. 64. No. 6. 064001
- A13. **Ильясова М.**, Shevelev A., Khilkevitch E., Kazakov Ye., Kiptily V., Nocente M., Giacomelli L., Craciunescu T., Stancar Z., Dal Molin A., Rigamonti D., Tardocchi M., Doinikov D., Gorini G., Naidenov V., Polunovsky I., Gin D., JET Contributors, Gamma-ray measurements in D3He fusion plasma experiments on JET // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2022. - Vol. 1031. 166586

Патенты

Патент на полезную модель №209993, 24.03.2022.

Шевелев А.Е., Чугунов И.Н., Хилькевич Е.М., **Ильясова М.В.**, Полуновский И.А., Александров И.В., Булкин Р.С., Гриневиц К.А., Маринин Г.В., Терентьев Д.В., Гамма-спектрометр // Патент на полезную модель №209993.

Ильясова Маргарита Вадимовна

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЙТРОННОЙ И ГАММА СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ БЫСТРЫХ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА

Автореферат

Подписано в печать 04.07.2022. Формат 60x90 1/16. Печать офсетная.

Уч.-изд. л. 1,55. Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № 4722.

Бесплатно.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «СИНЭЛ»
194223, Санкт-Петербург, ул. Курчатова, 10.