

Кормилицын Тимофей Михайлович

Развитие методов нейтронной диагностики термоядерной плазмы
токамака в условиях интенсивного дополнительного нагрева

1.3.9 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Частном учреждении Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" "Проектный центр ИТЭР" (Частное учреждение «ИТЭР-Центр»)

Научный руководитель: Кащук Юрий Анатольевич

Кандидат физико-математических наук, Частное учреждение «ИТЭР-Центр», начальник отдела Нейтронной и Спектроскопической Диагностики

Официальные оппоненты: Бурдаков Александр Владимирович

Доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории №10

Романников Александр Николаевич

Доктор физико-математических наук АО «ГНЦ РФ «Троицкий Институт Инновационных и Термоядерных Исследований», научный руководитель по плазменным технологиям и управляемому термоядерному синтезу

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится «__» декабря 2022 г., в «__» часов на заседании диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) при ФГБУН Объединенный Институт Высоких Температур РАН, расположенном по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОИВТ РАН <https://jiht.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

К.ф.-м.н.

Тимофеев А.В.

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования.

В настоящее время наибольший прогресс в области управляемого термоядерного синтеза (УТС) достигнут в экспериментах с магнитным удержанием плазмы. Значительные успехи в нагреве плазмы достигнуты на токамаке JET, когда в ходе D-T экспериментов DTE1 (2019 г.) получено рекордное значение $Q = 0,67$ при рекордно высокой термоядерной мощности 16 МВт. В эксперименте DTE2 (2022 г.) [1] в течение 5 секунд произведено 59 МДж энергии (достигнутая мощность составила 11 МВт) (рис.1).

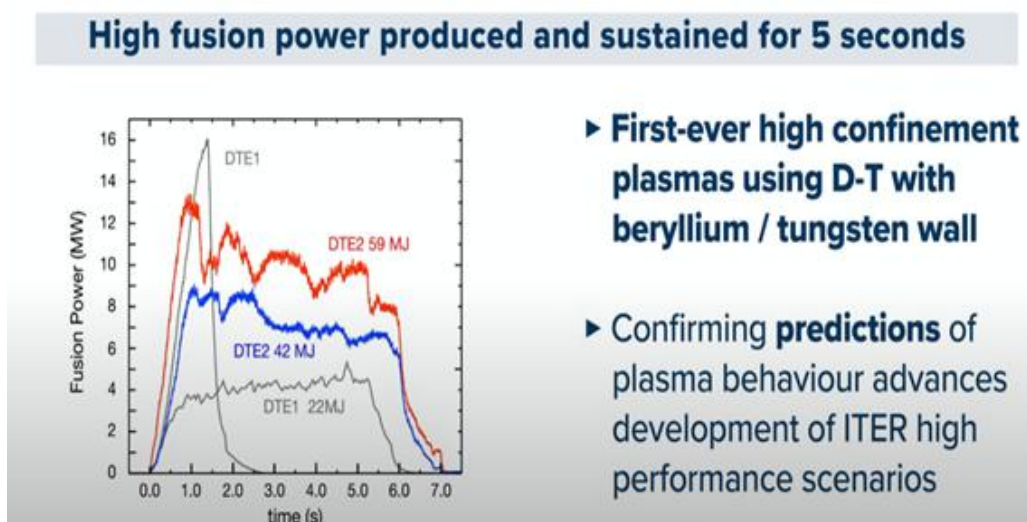


Рис. 1 Эксперименты с D-T плазмой на токамаке JET с рекордной термоядерной мощностью (16 МВт) и рекордной произведенной энергией (59 МДж).

Новые рекорды по удержанию плазмы недавно получены в экспериментах на токамаке EAST [2]. Дейтериевая плазма, нагретая до температуры ~ 10 кэВ (120 миллионов $^{\circ}\text{C}$) удерживалась в течение более 100 секунд (2021 г.). В 2022 г. плазменный разряд при температуре ~ 6 кэВ (70 миллионов $^{\circ}\text{C}$) стабильно удерживался более 1000 секунд.

Сегодня во всем мире разрабатываются новые проекты токамаков с реакторными параметрами на основе ВТСП магнитных систем – SPARC (США), DTT (Италия), TRT (Россия) и др.. Создание термоядерных установок с более сильными магнитными полями и мощными системами дополнительного нагрева позволяет открыть новую страницу в УТС исследованиях – изучение зажигания и

поддержания горения высокотемпературной термоядерной плазмы. В этих экспериментах будут образовываться фракции высокоэнергетических частиц, возникающих при дополнительном нагреве плазмы, а также за счет удержания α -частиц, образовавшихся в реакциях синтеза, их поведение необходимо исследовать. Увеличение мощности и длительности дополнительного нагрева плазмы, в частности – инъекции пучка нейтральных атомов и ВЧ нагрева на частоте ионно-циклотронного резонанса (ИЦР), приводит к появлению и значительному росту количества быстрых ионов в плазме. В свою очередь это увеличивает опасность выхода высокоэнергетических частиц из объема плазмы на первую стенку установки, попутно снижая эффективность нагрева самой плазмы, вследствие чего задача удержания и контроль поведения быстрых частиц становится одной из основных задач физики плазмы современных установок УТС с магнитным удержанием. Таким образом, разработка и построение специализированных ядерных диагностических приборов, в частности нейтронных спектрометров, является актуальной задачей для исследования D-D и D-T плазмы реакторного масштаба в новых термоядерных экспериментах.

На действующих токамаках энергия инжектируемых нейтралов может достигать 500 кэВ [3]. В экспериментах на токамак-реакторе ИТЭР планируют использовать инъекцию нейтралов с максимальной энергией, достигающей 1 МэВ [4]. Вкупе с систематическим ростом мощности инъекции и ИЦР, такая высокая энергии, в силу кинематики реакции синтеза, приведет к значительному уширению наблюдаемого энергетического распределения нейтронов, рожденных в реакции синтеза. Термоядерные нейтроны традиционно используются для исследования полного нейтронного выхода плазмы, мощности реакций синтеза и ионной температуры. В условиях значительной плотности и высокой энергии фракции быстрых ионов в плазме нейтронная диагностика также позволяет получать информацию о топливном отношении (соотношении плотности трития и дейтерия в плазме), времени замедления пучковых частиц и об эффективности дополнительного нагрева плазмы.

Цели и задачи диссертационной работы:

Целью работы является развитие современных методов нейтронной спектроскопии для изучения термоядерной плазмы в широком диапазоне ионной температуры и топливного отношения, а также анализа эффективности ее дополнительного нагрева в токамаке.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- Проведен анализ характеристик спектров термоядерных нейтронов, образующихся в условиях интенсивного дополнительного нагрева термоядерной плазмы. Продемонстрирован потенциал и ограничения современных методов нейтронной спектроскопии для получения информации о характеристиках плазмы в условиях интенсивного дополнительного нагрева, о фракции надтепловых ионов термоядерной плазмы, а также об ионной температуре, топливном отношении;
- Разработан новый сцинтилляционный спектрометр D-D нейтронов на основе кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$. Образцы спектрометров испытаны в потоках D-D нейтронов и подготовлены для измерений на токамаках Туман-3М, Глобус-M2, EAST и других установках УТС;
- Разработан проект диагностики «Нейтронный спектрометр» для токамака-реактора ИТЭР на основе алмазного и стильбенового спектрометров нейтронов в составе диагностического комплекса «Анализатор атомов перезарядки».

Методология и методы исследования:

Исследование характеристик разрабатываемых нейтронных спектрометров требует решения задачи прямого моделирования сигналов детекторов в различных режимах плазмы токамака. Для моделирования спектра быстрых нейтронов, регистрируемого детектором использовались сценарии ИТЭР, полученные в программном пакете ASTRA, позволяющим решать ряд уравнение переноса для

высокотемпературной плазмы в тороидальной геометрии и широко применяемом для моделирования параметров плазмы на действующих токамаках.

Плазменный шнур, являясь объёмным источником, испускает нейтроны в определенном энергетическом спектре. В детекторе зарегистрированные нейтроны генерируют сигналы, образующие амплитудный спектр. Такое преобразование описывается функцией отклика нейтронного спектрометра. Для решения поставленных задач проводилось моделирование функции отклика нейтронных спектрометров с помощью программного пакета GEANT4. Этот программный пакет широко используется научным сообществом для моделирования транспорта ионизирующего излучения (нейтронов и гамма-квантов) в веществе, и был неоднократно апробирован организацией CERN, в том числе в экспериментах на Большом Адронном Коллайдере. Созданные модели функций отклика нейтронных спектрометров были валидированы в экспериментах с термоядерными нейтронами в поле излучения D-D и D-T нейтронных генераторов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Созданы и валидированы в экспериментах с термоядерными нейтронами модели функции отклика нейтронных спектрометров (стильбен, хлорид лантана, монокристалл алмаза), обеспечивающие глубокое понимание процессов, происходящих при регистрации нейтронного излучения плазмы;
- Результаты используемого алгоритма расчётов позволяют утверждать, что наблюдаемый нейтронной диагностикой край распределения быстрых нейтронов по энергии позволяет получить данные о присутствии и количестве быстрых ионов с энергиями более 500 кэВ в плазме в условиях сценария с высокой температурой (25 кэВ) максвелловской составляющей плазмы токамака ИТЭР.
- Методом прямого моделирования сигналов диагностики «Нейтронный Спектрометр» определены диапазоны измерения ионной температуры и топливного отношения в различных сценариях плазмы токамака ИТЭР, в которых статистическая погрешность измерений не превышает 5%;

- Впервые создан и экспериментально апробирован в потоках D-D нейтронов спектрометр на основе кристалла хлорида лантана. Опытные образцы нейтронного спектрометра впервые в мире подготовлены к установке и измерениям на токамаках Туман-3М, Глобус-М2, EAST и других установках УТС.

Практическая и научная значимость работы заключается в следующем:

- Разработаны модели функций откликов нейтронных спектрометров, которые применяются при анализе характеристик создаваемых и поставляемых комплексов нейтронных диагностик в виде вклада РФ в натуральной форме (*in-kind*) в проект ИТЭР;
- Создан нейтронный спектрометр на основе кристалла хлорида лантана и применен для исследования излучения генераторов термоядерных нейтронов, используемых в испытаниях нейтронных диагностик для токамака-реактора ИТЭР. Спектрометр подготовлен к исследованиям фракции быстрых частиц на основе анализа спектра быстрых нейтронов токамаков Туман-3М, Глобус-М2, EAST и других установок УТС.
- Оптимизирован метод разделения сигналов нейтронов и гамма-квантов по форме импульса и предложен метод калибровки нейтронного спектрометра на основе кристалла хлорида лантана по собственному фоновому излучению с целью контроля и анализа результатов измерений в экспериментах с регистрацией термоядерных нейтронов на установках УТС;
- Разработаны методики анализа спектров нейтронов, образующихся в режимах плазмы с интенсивным дополнительным нагревом, применяемые при проектировании и анализе характеристик нейтронной диагностики плазмы токамака-реактора ИТЭР.

Положения, выносимые на защиту:

- Обоснование с помощью прямого моделирования потенциала использования нейтронной диагностики для анализа параметров плазмы в том числе для разрядов с интенсивным дополнительным нагревом.
- Созданные модели функций отклика спектрометров термоядерных нейтронов (стильбен, алмаз, хлорид лантана), используемые для прямого моделирования сигналов детекторов в условиях различных режимов работы токамака. Проведенная верификация моделей функции отклика детекторов в экспериментах с быстрыми D-D и D-T нейтронами.
- Результаты исследования характеристик алмазного и стильбенового детекторов диагностики «Нейтронный Спектрометр» в составе диагностического комплекса «Анализатор атомов перезарядки» токамака-реактора ИТЭР в условиях различных сценариев экспериментов с D-D и D-T плазмой. Результаты детального моделирование транспорта нейтронного излучения из плазмы к месту размещения детекторов Нейтронного Спектрометра. Полученные диапазоны значений ионной температуры и топливного отношения, в которых статистическая погрешность показаний нейтронной диагностики Нейтронный Спектрометр не превышают 5% для временного разрешения от 100 мс до 30 с.
- Апробированная методика использования собственного фонового α -излучения кристалла LaCl_3 для калибровки спектрометра. Определенные по результатам эксперимента с нейтронным излучением отношения световых выходов α/β и p/β , составившие 0,3 и 0,8 соответственно.
- Разработанный сцинтилляционный детектор на основе кристалла хлорида лантана для измерения потоков и спектров D-D нейтронов. Разработанный оптимальный метод n/γ разделения сигналов спектрометра в условиях интенсивного сопутствующего гамма-излучения. Подтвержденные в эксперименте характеристики спектрометра на основе кристалла LaCl_3 - энергетическое разрешение $\Delta E/E = 8\%$, чувствительность к D-D нейтронам $\varepsilon = 0,04 \text{ см}^2$

Степень достоверности и апробация результатов:

Выводы и результаты исследования обоснованы аналитическими расчётами и моделированием с использованием апробированных кодов для расчета транспорта нейтронного излучения методами Монте-Карло. Результаты моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментов с термоядерными нейтронами, проведенных для анализа характеристик разрабатываемых нейтронных спектрометров.

Материалы и результаты исследования представлены на нескольких семинарах Международной Организации ИТЭР, на международных совещаниях экспертной группы ITPA (International Tokamak Physics Activity) по диагностике плазмы (ITPA Diagnostics Topical Group) и на нескольких международных и Всероссийских конференциях:

- 45th EPS Conference on Plasma Physics, Prague, Czech Republic, 2018 г.
- 3rd European Conference on Plasma Diagnostics, Lisbon, Portugal, 2019 г.
- 23rd Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, Santa Fe, New Mexico, United States, 2020 г.
- 59, 61 и 62 Всероссийская научная конференция Московского Физико-Технического Института, 2016-2019 гг.
- 46, 47 и 48 Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 2019-2021 гг.
- 18 и 19 Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», 2019-2021 гг.

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в 15 печатных работах, из них 7 статей по теме диссертации, представленных в списке источников [A1-A7], и 8 тезисов докладов.

Личный вклад автора.

Все представленные в диссертации результаты получены лично автором. Постановка задач, вошедших в диссертационную работы, выполнена под руководством Ю.А. Кашука. Выводы и положения, выносимые на защиту, сформулированы лично автором.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, а также библиографии. Объем диссертации 86 страниц, включая 65 рисунков. Библиография включает 40 наименований.

Основное содержание диссертации

Введение

Во введении приводится обоснование актуальности темы исследования, сформулирована основная цель проведенного исследования, а также обозначены задачи, решенные на пути к этой цели. В этом разделе также приведена научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту. Раздел завершается перечнем конференций и публикаций автора по теме диссертации.

1. Современные методы спектрометрии быстрых нейтронов

В первой главе приведен обзор современных методов анализа распределения быстрых нейтронов по энергиям, применяемых на действующих установках УТС по всему миру. Каждый метод обладает своими характерными параметрами – чувствительностью, энергетическим разрешением, объемом, инженерной сложностью. Обзор включает в себя органические сцинтилляторы, комплексные времяпролетные системы, используемые, в частности, на токамаке JET, спектрометры протонов отдачи, утилизирующие также достаточно простую кинематику упругого рассеяния нейтрона на водороде, а также наиболее современные методы нейтронной спектрометрии, основанные на ядерных реакциях в веществе детектора – хлорсодержащие материалы для спектрометрии D-D нейтронов и CVD-алмазные детекторы для спектрометрии D-T нейтронов.

Сравнительный анализ методов нейтронной спектрометрии служит иллюстрацией направлений развития нейтронных диагностических комплексов на современных установках УТС.

2. Высокотемпературная плазма, как источник быстрых нейтронов

Во второй главе высокотемпературная плазма рассматривается, как источник быстрых нейтронов. Обозначены ключевые аспекты, влияющие на форму распределения быстрых нейтронов по энергиям в экспериментах с дейтериевой и дейтерий-тритиевой плазмой. Целевая реакция в таких экспериментах D-T, сопровождающаяся рождением нейтрона и альфа-частицы, где на нейтрон

приходится 14.1 МэВ энергии в приближении холодной плазмы. Высокий выход энергии, достаточно высокое сечение и низкая пороговая энергия делают данную реакцию крайне привлекательной с точки зрения термоядерной мощности. Однако, особенности работы с тритием, требующие полноценного комплекса по обращению трития при научной установке, а также более значительная, чем в случае D-D реакции, активация конструкций установки, делают дейтериевую плазму более предпочтительной для исследовательских институтов по всему миру. В D-D реакции в 50% случаев рождается нейтрон с энергией 2.45 МэВ.

Рассмотрены особенности распределения нейтронов по энергиям на примере интенсивно нагреваемой плазмы основного разряда токамака-реактора ИТЭР ($T_i = 25$ кэВ, $n_T/n_D = 1$, $I_p = 15$ МА, $B = 5.3$ Т, $Y_n \sim 1.7 \times 10^{20}$ н/с с инжекцией быстрых нейтронов $P_{DNBI} = 33$ МВт, $E_{DNBI} = 1$ МэВ). Анализ сконцентрирован на двух ключевых компонентах наблюдаемого распределения нейтронов – «максвелловской» или «тепловой», характеризующей реакции ионов основной плазмы и «пучковой», характеризующей взаимодействие надтепловой фракции ионов с ионами основной плазмы [7]. Для прямой задачи применён метод [A1,A2,A3] моделирования наблюдаемого детектором энергетического распределения быстрых нейтронов в рамках такого анализа на основе данных режима плазмы токамака, полученных с помощью программного пакета ASTRA.

Показано, что для режима дейтерий-тритиевой плазмы с интенсивным дополнительным нагревом, отношение «максвелловской» и «пучковой» компонент может быть использовано для оценки топливного отношения плазмы исключительно по наблюдаемому распределению быстрых D-T нейтронов.

$$\frac{n_T}{n_D} \approx \frac{(S_{BT})^2 \langle \sigma v \rangle_{TH}}{S_{TH} (\langle \sigma v \rangle_{BT})^2 \left(\int_0^L \frac{\partial n_{db}}{\partial l} dl \right)^2}$$

, где n_{db} – оцененная плотность быстрых ионов дейтерия вдоль линии наблюдения детектора, L – полная длина линии наблюдения внутри объема плазмы. В сценариях с более низкой температурой плазмы,

Пример детекторного узла нейтронной диагностики, расположенного на расстоянии 5 метров от центра плазменного шнура с апертурой площадью диаметром 4 см² и коллиматором длиной 0.5 м в радиальной плоскости установки, позволяет сделать следующую оценку наблюдаемого энергетического распределения нейтронов, представленную на рисунке 2. Выполнено несколько итераций такого расчёта для различных значений максимальной энергии инжекции в диапазоне от 200 кэВ до 1 МэВ.

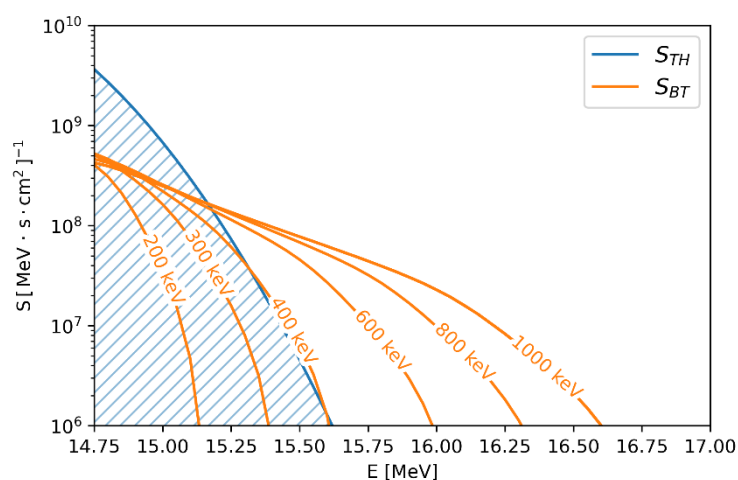


Рис. 2: Результат прямого моделирования наблюдаемого детекторным узлом спектра нейтронов для случая нескольких максимальных энергий инжекции пучка [А3].

Используемый в данной работе алгоритм для расчёта спектра быстрых нейтронов, принимающий во внимание профили параметров плазмы, а также распределение быстрых ионов в фазовом пространстве скоростей, позволяет проводить детальный анализ результатов измерений детекторами нейтронов в условиях разрядов с высокой мощностью средств дополнительного нагрева. Результаты используемого алгоритма расчётов позволяют утверждать, что, с учётом энергетического разрешения детектора в 2%, что консервативно соответствует, например, спектрометру на основе монокристалла алмаза (типичное энергетическое разрешение алмаза достигает 1% в эксперименте), наблюдаемый край распределения быстрых нейтронов по энергии позволяет получить данные о

присутствии и количестве быстрых ионов с энергиями более 500 кэВ в плазме в условиях сценария с высокой температурой максвелловской составляющей плазмы.

3. Спектрометр D-D нейтронов на основе кристалла LaCl_3

В рамках задачи спектрометрии D-D нейтронов, детекторы на основе хлорсодержащих сцинтилляторов занимают уникальную нишу компактных, надежных и в то же время производительных детекторов. Хлорсодержащие сцинтилляционные детекторы нейтронов вышли на сцену нейтронной спектрометрии с развитием группы эльпасолитов – характерным представителем которой является сцинтилляционный кристалл $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6(\text{Ce})$ или CLYC [8], зарекомендовавший себя с точки зрения энергетического разрешения, чувствительности, и качестве разделения частиц по форме импульса.

В главе представлены результаты разработки, калибровки и испытаний прямого конкурента семейству эльпасолитов, впервые использованного для целей DD-нейтронной спектрометрии, сцинтилляционного детектора из семейства галогенидов лантана – $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$. Высокий световой выход ($\sim 4 \times 10^4$ фотонов/МэВ) и малое время высвечивания (~ 28 нсек) обеспечивает данному кристаллу преимущество в условиях интенсивных потоков нейтронного и гамма-излучения, характерных для установок управляемого термоядерного синтеза. Созданный детектор на основе хлорида лантана включает в себя чувствительный элемент размерами $\varnothing 1 \times 1''$, фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R6231-100, для записи сигнала используется АЦП Spectrum Instrumentation M4I.4450-X8, с разрешением 14 бит и частотой 500 МГц.

Наличие в кристалле примесного изотопа актиния-227 позволило, используя сегментированную запись формы импульсов, оптимизировать алгоритм разделения частиц по форме импульса [A5], и обеспечить figure-of-merit при разделении α - $\gamma \sim 1.85$, при разделении n - $\gamma \sim 0.95$. Таким образом, в эксперименте с прототипом спектрометра в поле излучения нейтронного генератора ИНГ-07Д была получена картина распределения частиц по параметру разделения $\text{PSD} = (Q_L - Q_S)/Q_L$ и гамма-эквивалентной энергии, представленная на рисунке 3.

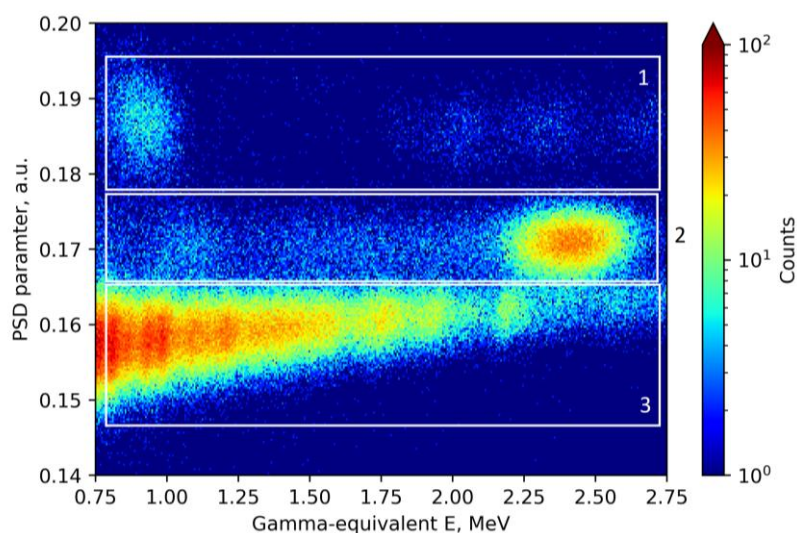


Рис. 3: Распределение отсчётов детектора на основе кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ в поле излучения ИНГ-07Д по гамма-эквивалентной энергии и параметру разделения. Группы отсчётов: 1 – α -частицы, 2 – протоны, рожденные в (n,p)-реакциях на ядре хлора-35, 3 – γ -кванты [A5].

Наблюдаемый по результатам разделения аппаратурный спектр детектора представлен на рисунке 4. Перемещение детектора в пространстве вокруг мишени нейтронного генератора позволило исследовать отклик детектора и достоверность его модели, разработанной с помощью программного пакета GEANT4 в диапазоне энергий нейтронов от 2.45 до 2.8 МэВ. Сравнение прямого моделирования и результатов эксперимента представлено на рисунке 5. Дополнительный этап испытаний проведен на Циклотроне ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе, продемонстрировавший значительный потенциал нейтронного спектрометра на основе кристалла хлорида лантана в условиях интенсивного сопутствующего гамма-излучения.

По результатам испытаний характеристики созданного нейтронного спектрометра на основе кристалла LaCl_3 составили $\Delta E/E = 8\%$, $\varepsilon = 0,04 \text{ см}^2$. В завершении главы представлен краткий анализ аппаратурного спектра разработанного детектора при условии его размещения в месте расположения штатной нейтронной диагностики токамака Туман-3М.

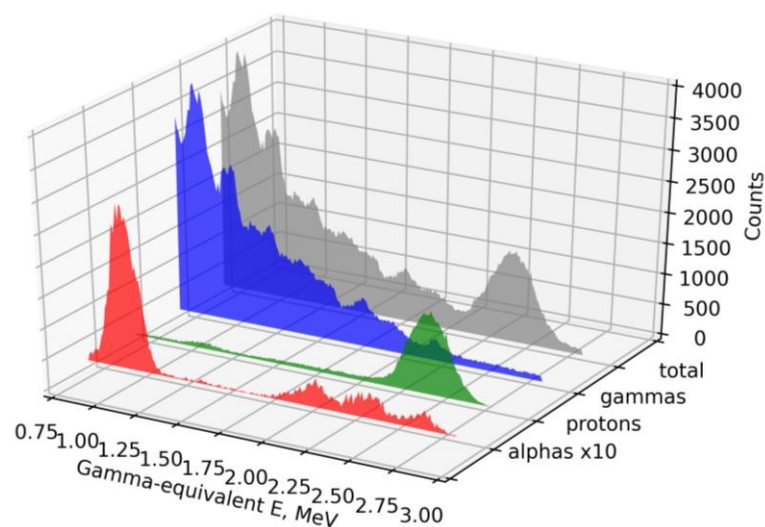


Рис. 4: Декомпозированный амплитудный спектр $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ -детектора. Красным – отсчёты, ассоциируемые с α -частицами ($\times 10$ для иллюстрации), зеленым – с протонами, синим – с γ -квантами [A5].

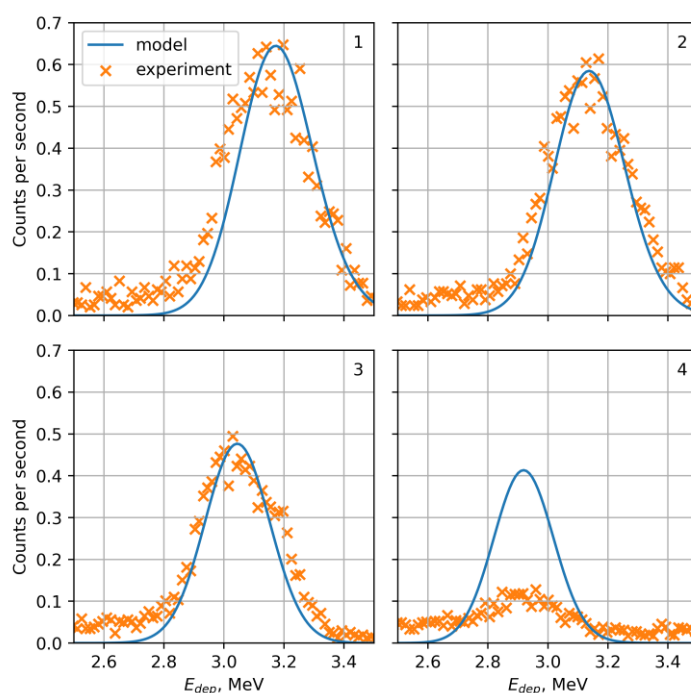


Рис. 5: Сравнение амплитудного спектра детектора в поле излучения ИНГ-07Д (оранжевым) с результатами моделирования (синим) для различных углов относительно оси нейтронного генератора: 1 – на оси, 2 – 30 градусов, 3 – 60 градусов, 4 – 90 градусов [A4,A5].

4. Нейтронный спектрометр в составе диагностики ААП ИТЭР

Данная глава посвящена разработке и анализу измерительных характеристик детекторов диагностики Нейтронный Спектрометр, входящей в диагностический комплекс Анализатор Атомов Перезарядки (ААП) ИТЭР. Основные задачи, стоящие перед этой диагностикой:

- Обеспечение интегрированных вдоль линии наблюдения измерений нейтронного потока и распределения по энергии вблизи детекторов Анализатора Атомов Перезарядки. Эти данные позволят подтвердить отсутствие или оценить влияние нейтронного потока, являющегося для детекторов ААП шумовым сигналом;
- Предоставление независимой от ААП оценки ионной температуры $T_{i,core}$ и – в сценариях с низким содержанием трития - топливного отношения n_T/n_D плазмы для верификации данных ААП, поступающих в систему контроля плазмы ИТЭР.

Для анализа наблюдаемого диагностикой спектра быстрых нейтронов проведен Монте-Карло расчёт транспорта быстрых нейтронов с использованием ITER C-Model для компонентов экваториального порта №11 из плазмы до точки размещения детекторов.

Созданная и верифицированная в эксперименте с нейтронными генераторами модель функций отклика алмазного и стильбенового детекторов (рисунок 6) позволила рассчитать аппаратный спектр детекторов нейтронного спектрометра в условиях нескольких режимов работы токамака-реактора ИТЭР. Рассчитанный аппаратный спектр алмазного спектрометра быстрых нейтронов представлен на рисунке 7.

Аппаратурные спектры детекторов Нейтронного Спектрометра позволили провести анализ статистической погрешности при восстановлении параметров плазмы – ионной температуры и топливного отношения. В заключении этой главы представлен анализ диапазонов этих параметров и временного разрешения, при

которых статистическая ошибка показаний диагностики Нейтронный Спектрометр оказывается в пределах 5%.

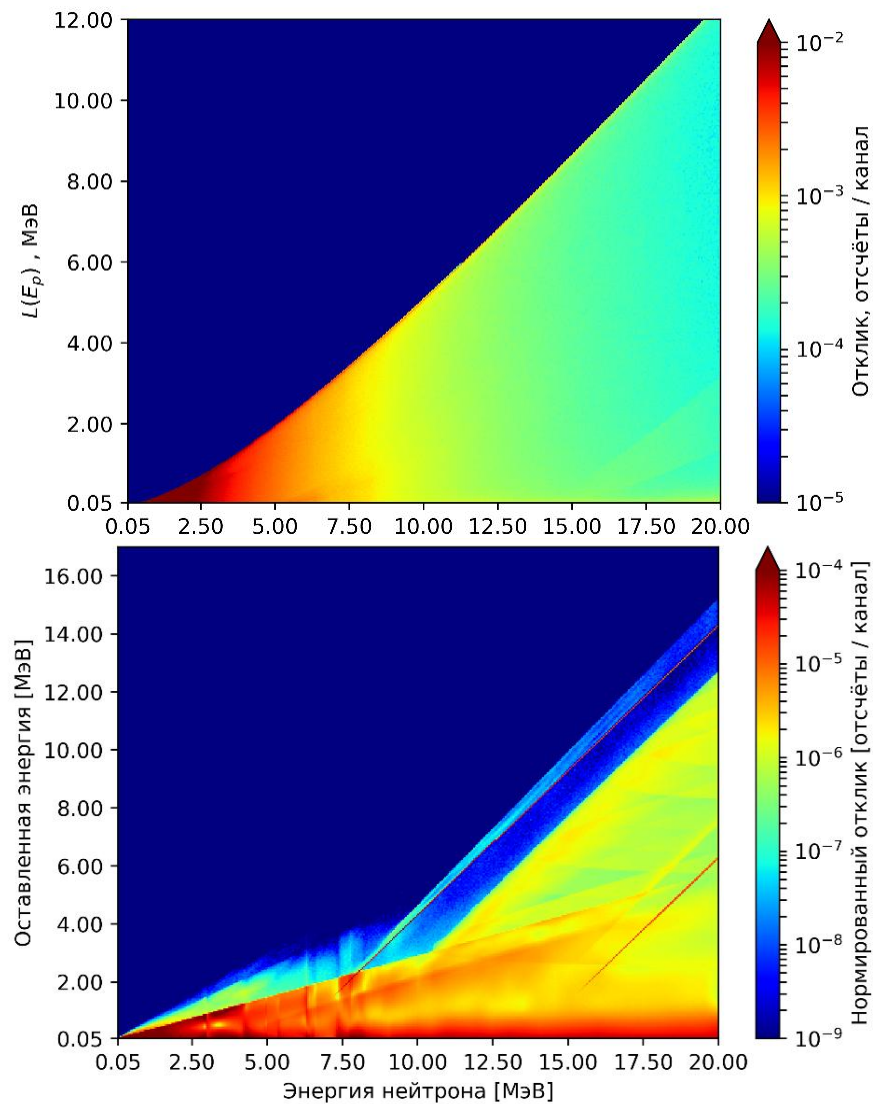


Рис. 6: Модели функций отклика стильбенового (вверху) и алмазного (внизу) детекторов диагностики Нейтронный Спектрометр для энергии нейтронов от 50 кэВ до 20 МэВ, рассчитанные с помощью библиотеки сечений ENDF-B/VIII.0 [9].

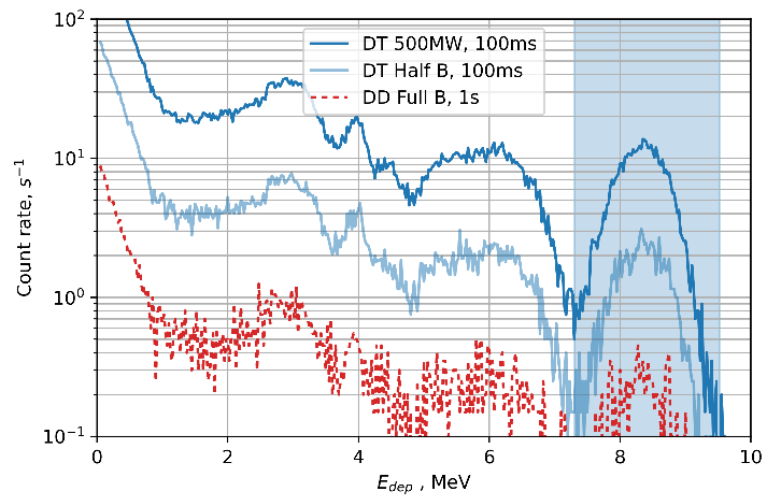


Рис. 7: Аппаратурный спектр алмазного детектора диагностики Нейтронный Спектрометр для нескольких режимов работы токамака-реактора ИТЭР: синим – основной 500 МВт сценарий, голубым – сценарий с половинным полем, красным – сценарий дейтериевого разряда с низким содержанием трития. Окрашенная область в районе 8 МэВ ограничивает диапазон энергий, соответствующий $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$ реакции [А6].

В данной главе представлены результаты разработки диагностики Нейтронный Спектрометр в составе диагностического комплекса ААП ИТЭР. Представлен детальный проект размещения детекторных узлов Нейтронного Спектрометра в экваториальном порту №11 токамака-реактора ИТЭР. Проведены исследования отклика детекторов в поле излучения D-D и D-T нейтронных генераторов, а также сравнительный анализ разработанных моделей функций отклика с результатами эксперимента.

Получены результаты детального Монте-Карло моделирования транспорта быстрых нейтронов из плазмы до места размещения детекторных узлов Нейтронного Спектрометра, на их основании проведен анализ статистической погрешности при восстановлении параметров плазмы – ионной температуры и топливного отношения. Показаны диапазоны этих параметров и временного разрешения, при которых статистическая ошибка показаний диагностики Нейтронный Спектрометр оказывается в пределах 5%.

Основные результаты и выводы работы

Для решения задачи прямого моделирования сигналов нейтронных спектрометров применена двухкомпонентная аналитическая модель энергетического распределения быстрых нейтронов высокотемпературной плазмы токамака при интенсивном дополнительном нагреве плазмы. Проведен анализ параметров плазмы, измерение которых позволяют проводить современные методы нейтронной спектрометрии, приведены свидетельства ограничений существующих методов при исследовании высокотемпературной плазмы с интенсивным дополнительным нагревом.

Применение этой модели также позволило, для основного сценария работы токамака реактора ИТЭР при $n_T/n_D \sim 1$ и $T_{i,core} = 25$ кэВ определить пороговое значение энергии надтепловых ионов - 500 кэВ, информацию о которых дает изучение наблюдаемого детектором распределения нейтронов по энергиям.

Созданные и верифицированные функции отклика для алмазного, органического и хлорсодержащего детекторов нейтронов позволяют детально анализировать показания нейтронных спектрометров в режимах плазмы с интенсивным дополнительным нагревом плазмы.

Моделирование показаний алмазного и стильбенового детекторов диагностики Нейтронный Спектрометр позволило определить диапазоны n_T/n_D и T_i , в которых статистическая погрешность показаний диагностики Нейтронный Спектрометр не превышают 5% при временном разрешении, варьируемом от 100 мс до 30 с. Перспективы данной работы включают в себя разработку алгоритма, позволяющего в режиме реального времени обеспечивать оценку требуемых параметров для целей передачи этих оценок в систему контроля плазмы токамака-реактора ИТЭР.

Созданный в рамках исследования сцинтилляционный детектор на основе кристалла хлорида лантана оказался перспективным для целей D-D-нейтронной спектрометрии. Характеристики разработанного детекторного узла составили $LaCl_3$ - $\Delta E/E = 8\%$, $\varepsilon = 0,04$ см² и $FoM_{n/\gamma} = 0,9$, что позволяет говорить о целесообразности

включения такого детектора в диагностический комплекс токамаков, имеющих опыт работы с дейтериевой плазмой, таких как Туман-3М, Глобус-М2 и EAST.

Список источников

1. J. Mailloux et al., “Overview of JET results for optimising ITER operation,” *Nucl. Fusion*, vol. 62, no. 4, p. 042026, Apr. 2022, doi: 10.1088/1741-4326/ac47b4.
2. X. Gong et al., “Integrated operation of steady-state long-pulse H-mode in Experimental Advanced Superconducting Tokamak,” *Nucl. Fusion*, vol. 59, no. 8, p. 086030, Aug. 2019, doi: 10.1088/1741-4326/ab1c7b.
3. Y. Ikeda et al., “Technical design of NBI system for JT-60SA,” *Fusion Eng. Des.*, vol. 82, no. 5–14, pp. 791–797, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.fusengdes.2007.05.077.
4. R. S. Hemsworth et al., “Overview of the design of the ITER heating neutral beam injectors,” *New J. Phys.*, vol. 19, no. 2, p. 025005, Feb. 2017, doi: 10.1088/1367-2630/19/2/025005.
5. G. Tardini, F. Gagnon-Moisan, and A. Zimbal, “Characterisation of a BC501A compact neutron spectrometer for fusion research,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 87, no. 10, Oct. 2016, doi: 10.1063/1.4964375.
6. M. Gatu Johnson et al., “The 2.5-MeV neutron time-of-flight spectrometer TOFOR for experiments at JET,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 591, no. 2, pp. 417–430, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.nima.2008.03.010.
7. A. V. Krasilnikov, “Natural Diamond Neutron Spectrometer,” in *Diagnostics for Experimental Thermonuclear Fusion Reactors 2*, Boston, MA: Springer US, 1998, pp. 439–448.
8. A. V. Krasilnikov, V. N. Amosov, P. Van Belle, O. N. Jarvis, and G. J. Sadler, “Study of d-t neutron energy spectra at JET using natural diamond detectors,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 476, no. 1–2, pp. 500–505, Jan. 2002, doi: 10.1016/S0168-9002(01)01497-8.
9. A. V. Krasilnikov, V. N. Amosov, and Y. A. Kaschuck, “Natural diamond detector as high energy particles spectrometer,” in *IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference*, 1997, vol. 1, pp. 525–529, doi: 10.1109/nssmic.1997.672638.

10. C. Cazzaniga et al., “Single crystal diamond detector measurements of deuterium-deuterium and deuterium-tritium neutrons in Joint European Torus fusion plasmas,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 85, no. 4, p. 043506, Apr. 2014, doi: 10.1063/1.4870584.
11. A. Giaz et al., “Fast neutron measurements with ^7Li and ^6Li enriched CLYC scintillators,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2016, doi: 10.1016/j.nima.2016.03.090.
12. D. Rigamonti et al., “First neutron spectroscopy measurements with a compact C7LYC based detector at EAST,” in *Journal of Instrumentation*, Sep. 2019, vol. 14, no. 9, p. C09025, doi: 10.1088/1748-0221/14/09/C09025.
13. P. P. Guss, T. G. Stampahar, S. Mukhopadhyay, A. Barzilov, and A. Guckes, “Scintillation properties of a $\text{Cs}_2\text{LiLa}(\text{Br}_6)_{90\%}(\text{Cl}_6)_{10\%}:\text{Ce}$ (CLLBC) crystal,” in *Proceedings Volume 9215, Radiation Detectors: Systems and Applications XV*, Sep. 2014, p. 921505, doi: 10.1117/12.2060204.
14. D. A. Brown et al., “ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data,” *Nucl. Data Sheets*, vol. 148, pp. 1–142, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.nds.2018.02.001.
15. H. S. Bosch and G. M. Hale, “Improved formulas for fusion cross-sections and thermal reactivities,” *Nucl. Fusion*, vol. 32, no. 4, pp. 611–631, Apr. 1992, doi: 10.1088/0029-5515/32/4/I07.
16. H. Brysk, “Fusion neutron energies and spectra,” *Plasma Phys.*, vol. 15, no. 7, pp. 611–617, Jul. 1973, doi: 10.1088/0032-1028/15/7/001.
17. L. Bertalot, S. Conroy, A. Murari, M. Reginatto, H. Schuhmacher, and A. Zimbal, “Neutron energy measurements of trace tritium plasmas with NE213 compact spectrometer at JET,” in *32nd EPS Conference on Plasma Physics 2005, EPS 2005, Held with the 8th International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets - Europhysics Conference Abstracts*, 2005, vol. 1, pp. 594–597.
18. G. Ericsson, “Advanced Neutron Spectroscopy in Fusion Research,” *J. Fusion Energy*, vol. 38, no. 3–4, pp. 330–355, Feb. 2019, doi: 10.1007/s10894-019-00213-9.

19. A. Polevoi, H. Shirai, and T. Takizuka, "BENCHMARKING OF THE NBI BLOCK IN ASTRA CODE, JAERI -Data/Code 97-014. March," 1997, vol. 2, Accessed: Jun. 28, 2018.
20. J. Wesson, Tokamaks, 4-ое издание, Oxford University Press, 2011.
21. Y. P. Zhang et al., "Measurements of the fast ion slowing-down times in the HL-2A tokamak and comparison to classical theory," *Phys. Plasmas*, vol. 19, no. 11, p. 112504, Nov. 2012, doi: 10.1063/1.4768425.
22. J. Allison et al., "Recent developments in GEANT4," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 835, pp. 186–225, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.nima.2016.06.125.
23. W. Wolszczak and P. Dorenbos, "Shape of intrinsic alpha pulse height spectra in lanthanide halide scintillators," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 857, pp. 66–74, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.nima.2017.02.041.
24. S. V. Syromukov et al., "NG-24 Neutron Generator for Nuclear Medicine and Thermonuclear Research," *At. Energy*, vol. 119, no. 1, pp. 68–71, Nov. 2015, doi: 10.1007/s10512-015-0031-5.
25. Р. Родионов и др, «Аналитическая модель энергетического и углового распределения нейтронов для нейтронного генератора НГ-24М», XVIII Всероссийская конференция Диагностика Высокотемпературной плазмы, 2019
26. M. V. Iliasova et al., "Measurements of neutron fluxes from tokamak plasmas using a compact neutron spectrometer," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 92, no. 4, p. 043560, Apr. 2021, doi: 10.1063/5.0040667.
27. R. S. Balmer et al., "Chemical vapour deposition synthetic diamond: Materials, technology and applications," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 21, no. 36, p. 364221, Sep. 2009, doi: 10.1088/0953-8984/21/36/364221.
28. B. Esposito, Y. Kaschuck, A. Rizzo, L. Bertalot, and A. Pensa, "Digital pulse shape discrimination in organic scintillators for fusion applications," in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators*,

- Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Feb. 2004, vol. 518, no. 1–2, pp. 626–628, doi: 10.1016/j.nima.2003.11.103.
29. Y. K. Kim, S. K. Lee, B. H. Kang, J. B. Son, and G. D. Kim, “Performance improvement of neutron flux monitor at KSTAR,” in *Journal of Instrumentation*, Dec. 2012, vol. 7, no. 6, doi: 10.1088/1748-0221/7/06/C06013.
30. L. Y. Liao et al., “A compact stilbene crystal neutron spectrometer for NBI-heated plasma neutron diagnostics at EAST,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 92, no. 4, Apr. 2021, doi: 10.1063/5.0043617.
31. Yu. Kashchuk, S. Popovichev, L. A. Trykov, L. Bertalot, A. A. Oleynikov, and A. Murari, “Neutron Measurements during Trace Tritium Experiments at JET using a Stilbene Detector,” *31st EPS Conf. Plasma Phys. Proc.*, vol. 28, no. 04, pp. 2–5, 2004, Accessed: Sep. 09, 2021.
32. J. T. Goorley et al., “Initial MCNP6 Release Overview - MCNP6 version 1.0,” Los Alamos, NM (United States), Jun. 2013. doi: 10.2172/1086758.
33. Кащук Ю. А., «Сцинтилляционные спектрометры нейтронного и гамма излучения для диагностики термоядерной плазмы», диссертация на соискание степени к.ф.-м.н., от 18.04.2007.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. **Kormilitsyn T.**, Polevoi A., Bertalot L., Mironov M., Krasilnikov V., Serikov A., Barnsley R., Kashchuk Yu., Loarte A., Pinches S., “Assessment of the Fast Particle Spectra for Tangential Spectrometer for H/He and DT ITER Operation”, *Proc. of the 45th EPS Conference on Plasma Physics*, 2018, P2.1005, 601-604.
- A2. **Кормилицын Т.М.**, Портнов Д.В., Кащук Ю.А., “Моделирование спектров быстрых частиц для Тангенциального Спектрометра ИТЭР”, *Вопросы Атомной Науки и Техники: Серия Термоядерный Синтез*, 2018, 41(4)
- A3. **Kormilitsyn, T.**, Nemtsev, G., Rodionov, R., Kashchuk, Y., Portnov, D., “Modelling of the NBI contribution to the neutron energy spectra for the ITER Vertical Neutron Camera”, *Journal of Instrumentation*, 2019, 14(10), C10019

- A4. **Kormilitsyn, T.**, Obudovsky, S., Kashchuk, Y., Rodionov R., Pankratenko, A., Dzhurik, A., “Application of the $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ Scintillator to Fast Neutron Measurements”, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2021, 18(1), p. 75–81
- A5. **Kormilitsyn T.M.**, Obudovsky S.Yu., Rodionov R.N., Pankratenko A.V., Dzhurik A.S., Kashchuk Yu.A. and Krasilnikov A. V., “Novel $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ -based spectrometer for deuterium plasma neutron diagnostics”, Review of Scientific Instruments 92, 043528 (2021)
- A6. Pankratenko A.V., **Kormilitsyn T.M.**, Obudovsky S.Yu., Dzhurik A.S., Kashchuk Yu.A., “Digital Pulse Shape Discrimination Method for D–D Neutron Spectrometry Using the $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ Scintillator”, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2022, 19, p. 66-76
- A7. Afanasyev V.I., ..., **Kormilitsyn T.M.**, et al. “Development of the NPA based diagnostic complex in ITER” –Journal of Instrumentation, 2022, vol. 17, no. 07, p. C07001

Кормилицын Тимофей Михайлович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук на тему:

Развитие методов нейтронной диагностики термоядерной плазмы токамака в
условиях интенсивного дополнительного нагрева