

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

Физтех-школа физики и исследований им. Ландау
Кафедра «Плазменной энергетики»

На правах рукописи
УДК 533.9

Кормилицын Тимофей Михайлович

**Исследование термоядерной плазмы токамака методами нейтронной диагностики
в условиях интенсивного дополнительного нагрева**

1.3.9 - Физика плазмы

Автореферат

Диссертации на соискание учёной степени
Кандидата физико-математических наук

Москва
2022 г.

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	2
<i>Общая характеристика работы</i>	<i>3</i>
<i>Актуальность.....</i>	<i>3</i>
<i>Цели и задачи работы</i>	<i>6</i>
<i>Методы исследования</i>	<i>7</i>
<i>Научная новизна работы.....</i>	<i>7</i>
<i>Практическая значимость работы.....</i>	<i>8</i>
<i>Положения, выносимые на публичное представление.....</i>	<i>9</i>
<i>Степень достоверности и апробация результатов работы</i>	<i>10</i>
<i>Основное содержание научного доклада.....</i>	<i>11</i>
<i>Введение.....</i>	<i>11</i>
1. <i>Высокотемпературная плазма, как источник быстрых нейтронов</i>	<i>11</i>
2. <i>Современные методы нейтронной диагностики термоядерной плазмы.....</i>	<i>13</i>
3. <i>Спектрометр D-D нейтронов на основе сцинтилляционного кристалла LaCl₃.....</i>	<i>14</i>
4. <i>Спектрометры термоядерных нейтронов в составе диагностического комплекса ААП</i> <i>ИТЭР</i> 17	
<i>Заключение</i>	<i>19</i>
<i>Перечень публикаций по теме диссертации</i>	<i>20</i>
<i>Список литературы</i>	<i>21</i>

Общая характеристика работы

Актуальность

В настоящее время наибольший прогресс в области 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).

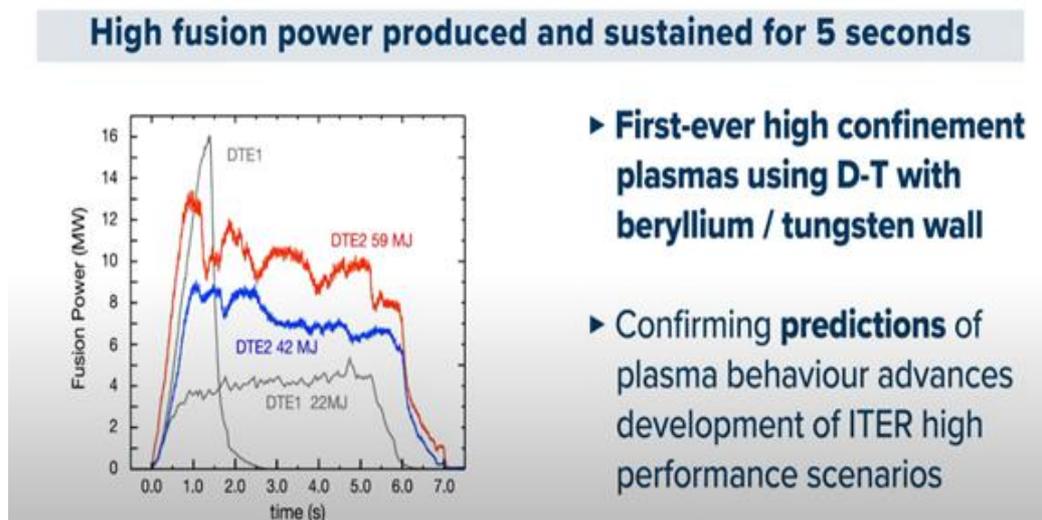


Рис. 1 Эксперименты с D-T плазмой на токамаке JET с рекордной термоядерной мощностью (16 МВт) и рекордной произведенной энергией (59 МДж).

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 – ST40 (Англия), 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 будет исследовано поведение фракции высокоэнергетических частиц, возникающих при дополнительном нагреве плазмы, а также за счет удержания α -частиц, образовавшихся в реакциях синтеза. 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 к 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 строящемся токамак-реактор 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 трития и дейтерия в плазме), времени замедления пучковых частиц и об эффективности дополнительного нагрева плазмы.

Представленная работа направлена на разработку методов нейтронной спектрометрии для исследования фракции быстрых частиц в плазме на установках с магнитным удержанием (токамаки, стеллараторы). Значительный прогресс в развитии методов нейтронной спектрометрии в последнее время позволил решать научную задачу исследования особенностей энергетического распределения быстрых нейтронов в современных экспериментах. Одним из ключевых результатов данной работы стала разработка нового нейтронного спектрометра быстрых D-D нейтронов на основе кристалла хлорида лантана, легированного церием, а также подготовка к его применению на действующих термоядерных установках Туман-3М, Глобус-М2 и EAST.

Результаты работы также позволили провести детальную разработку диагностики Нейтронный Спектрометр для токамака-реактора ИТЭР. В составе диагностического комплекса ИТЭР данная диагностика позволит проводить независимые измерения таких параметров плазмы, как ионная температура, нейтронных выход, термоядерная мощность, топливное отношение, время замедления пучковых частиц.

В данной работе представлены результаты, полученные в ходе разработки современных нейтронных спектрометров для регистрации термоядерных нейтронов, образующихся в D-D плазме ($E_n=2,45$ МэВ) и D-T плазме ($E_n=14,1$ МэВ). Проведено моделирование сигналов диагностики, разработаны методики настройки и калибровки нейтронных спектрометров для работы на действующих токамаках. Полученный опыт использован при разработке диагностик «Нейтронный спектрометр» для токамака-реактора ИТЭР и для российского проекта «Токамак с реакторными технологиями» (TRT). Основываясь на обширном экспериментальном опыте регистрации нейтронов стильбеновыми и хлорсодержащими сцинтилляционными, а также алмазными детекторами, проведено детальное исследование измерительных характеристик диагностики в условиях ряда сценариев работы токамака-реактора ИТЭР и токамака с реакторными технологиями TRT.

Впервые в мире сцинтилляционный спектрометр на основе кристалла хлорида лантана был применен для исследования характеристик потоков быстрых D-D нейтронов. Проведено моделирование и выполнено детальное экспериментальное исследование отклика детектора в поле излучения быстрых нейтронов в диапазоне энергий, соответствующем нейтронам, рожденным в дейтериевой плазме. Анализ нейтронных потоков на токамаках Туман-3М, Глобус-М2, EAST показал, что разработанный нейтронный спектрометр будет полезным и надежным инструментом исследования эффективности методов нагрева плазмы. Показан значительный потенциал применения такого типа детектора на установках УТС в экспериментах с дейтериевой плазмой.

Цели и задачи работы

Основной целью данной работы является:

Изучение термоядерной плазмы в широком диапазоне параметров, а также анализ эффективности ее дополнительного нагрева в токамаке современными методами спектрометрии быстрых нейтронов

Для достижения цели решены следующие задачи:

- Исследованы характеристики спектров термоядерных нейтронов, образующихся в условиях различных способов интенсивного дополнительного нагрева плазмы. Предложен метод оценки эффективности дополнительного нагрева плазмы по результатам измерений нейтронной диагностики;
- Создан новый сцинтилляционный спектрометр D-D нейтронов на основе кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$. Образцы спектрометров подготовлены для измерений на действующих токамаках Туман-3М, Глобус-М2, EAST;
- Разработаны проекты диагностик «Нейтронный спектрометр» для токамака-реактора ИТЭР на основе алмазного и стильбенового спектрометров нейтронов.

Методы исследования

Исследование характеристик разрабатываемых нейтронных спектрометров требует решения задачи прямого моделирования сигналов детекторов в различных режимах плазмы токамака. Для моделирования наблюдаемого детектором спектра быстрых нейтронов использовались данные сценариев, полученные в программном пакете ASTRA [5], широко применяемом для моделирования параметров плазмы на действующих токамаках. Переход от наблюдаемого спектра нейтронов к амплитудному спектру детектора осуществлялся функцией отклика нейтронного спектрометра, разработанной с помощью программного пакета GEANT4 [6], широко используемого научным сообществом для моделирования транспорта излучения в веществе, и апробированного организацией CERN, в том числе в экспериментах на Большом Адронном Коллайдере. Созданные модели функций отклика были верифицированы результатами экспериментов с термоядерными нейтронами в поле излучения D-D и D-T нейтронных генераторов.

Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Развита методика нейтронной спектрометрии в экспериментах с высокотемпературной плазмой токамака. Предложены новые методы анализа наблюдаемого спектра нейтронов в режимах плазмы с интенсивным дополнительным нагревом для восстановления таких характеристик плазмы, как ионная температура, топливное отношение и время замедления на электронах.
- Созданы и верифицированы 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;

- Методом прямого моделирования сигналов диагностики Нейтронный Спектрометр определены диапазоны ионной температуры и топливного отношения плазмы токамака ИТЭР, в сценариях с которыми статистическая погрешность измерений не превышает 5%;
- Создан и апробирован в условиях близких, к условиям на действующих токамаках, новый нейтронный спектрометр на основе кристалла хлорида лантана. Опытные образцы спектрометра подготовлены к установке на действующих токамаках Туман-3М, Глобус-М2 и EAST.

Практическая значимость работы

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

- Предложенные модели функций откликов нейтронных спектрометров применяются при анализе характеристик разрабатываемых Российским Домашним Агентством ИТЭР для Международной Организации ИТЭР комплексов нейтронных диагностик;
- Созданный нейтронный спектрометр на основе кристалла хлорида лантана применен для исследования излучения нейтронных генераторов, используемых в испытаниях нейтронных диагностик для токамака-реактора ИТЭР и готов к применению для анализа распределения быстрых нейтронов по энергиям на действующих токамаках, таких как Туман-3М, Глобус-М2 и EAST;
- Оптимизированный метод разделения частиц по форме импульса вкупе с методом калибровки нейтронного спектрометра на основе кристалла хлорида лантана по собственному фоновому излучению используются для контроля и интерпретации данных нового нейтронного спектрометра, полученных в экспериментах с термоядерными нейтронами;
- Разработанные методики анализа спектра нейтронов, наблюдаемого в режимах плазмы с интенсивным дополнительным нагревом,

применяются при проектировании и анализе характеристик нейтронной диагностики плазмы токамака-реактора ИТЭР.

Положения, выносимые на публичную защиту

- Представленная аналитическая модель энергетического распределения термоядерных нейтронов позволяет исследовать ключевые характеристики плазмы токамака в экспериментах с интенсивным дополнительным нагревом. Полученные результаты позволили определить пороговую энергию быстрых ионов, информацию о которых дает анализ спектра термоядерных нейтронов в сценариях с большим содержанием трития, для основного сценария работы токамака реактора ИТЭР при топливном отношении 50:50 и ионной температуре 25 кэВ это значение составило 500 кэВ. Разработанная модель также позволила предложить независимый метод оценки топливного отношения по показаниям нейтронной диагностики.
- Созданы модели функций отклика нейтронных спектрометров (стильбен, алмаз, хлорид лантана), используемые для прямого моделирования сигналов детекторов в условиях различных режимов работы токамака. Проведена верификация моделей функции отклика детекторов в экспериментах с быстрыми нейтронами.
- Исследованы характеристики алмазного и стильбенового детекторов Нейтронного Спектрометра в составе диагностики «Анализатор атомов перезарядки» токамака-реактора ИТЭР в условиях различных сценариев экспериментов как с D-D и D-T плазмой. Проведено детальное моделирование транспорта нейтронного излучения из плазмы к месту размещения детекторов Нейтронного Спектрометра. Определены диапазоны значений ионной температуры и топливного отношения, в которых статистическая погрешность показаний диагностики Нейтронный Спектрометр не превышает 5% для временного разрешения от 100 мс до 30 с.

- Предложена и апробирована методика использования собственного фонового α -излучения кристалла LaCl_3 для калибровки нейтронного спектрометра. В экспериментах с нейтронным излучением определены соотношений световых выходов α/β и p/β , составившие $0,35 \pm 0,03$ и $0,75 \pm 0,06$ соответственно.
- Создан, изготовлен и испытан сцинтилляционный детектор на основе кристалла хлорида лантана для измерения потоков и спектров D-D нейтронов. Разработан оптимальный метод n/γ разделения сигналов спектрометра в условиях интенсивного сопутствующего гамма-излучения. По результатам испытаний получены характеристики спектрометра на основе кристалла LaCl_3 - $\Delta E/E = 8\%$, $\varepsilon = 0,04 \text{ см}^2$, $F_0 M_{n/\gamma} = 0,95$.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Выводы и результаты исследования обоснованы аналитическими расчётами и апробированными методами Монте-Карло моделирования. Результаты моделирования согласуются с данными, представленными другими исследовательскими группами, и подтверждены данными экспериментов с термоядерными нейтронами, проведенных для анализа характеристик разрабатываемых нейтронных спектрометров.

Материалы, вошедшие в диссертацию, представлены на нескольких семинарах Международной Организации ИТЭР, а также на международных совещаниях экспертной группы ИТРА (International Tokamak Physics Activity) по диагностике плазмы (ИТРА Diagnostics Topical Group), в которой автор является одним из экспертов по нейтронной диагностике со стороны России.

Результаты и материалы по теме исследования опубликованы в следующих изданиях «Review of Scientific Instruments», «Journal of Instrumentation», «Письма в журнал Элементарных Частиц и Атомного Ядра», «Вопросы Атомной Науки и Техники: Серия Термоядерный Синтез».

Результаты исследования представлены на нескольких международных и Всероссийских конференциях согласно списку:

- 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.
- Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 2019-2021 гг.
- Всероссийская конференция «Диагностика Высокотемпературной Плазмы», 2019-2021 гг.

Основное содержание научного доклада

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. Высокотемпературная плазма, как источник быстрых нейтронов

В первой 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 нейтралов $P_{DNBI} = 33$ 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]. Предложен метод [А1,А2,А3] 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-третиевой 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.

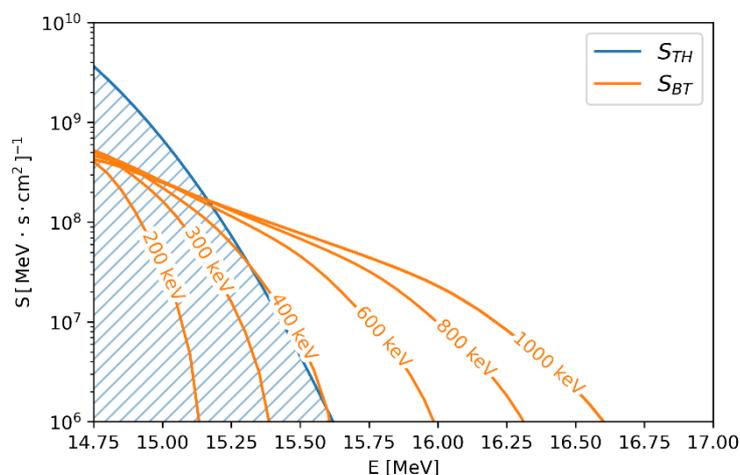


Рис. 2: Результат прямого моделирования наблюдаемого детекторным узлом спектра нейтронов для случая нескольких максимальных энергий инжекции пучка [А3].

Разработанная аналитическая модель, таким образом, позволит корректно интерпретировать показания детекторов нейтронной диагностики ИТЭР в реальных условиях работы установки, а также получать дополнительную информацию о надтепловой фракции быстрых ионов в этих условиях.

2. Современные методы нейтронной диагностики термоядерной плазмы

Во второй 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.

Показано, что комбинация алмазного детектора и двух типов сцинтилляторов – органического и хлорсодержащего, может обеспечить измерение плотности потока и распределения нейтронов по энергиям как в дейтериевых, так и в дейтерий-тритиевых разрядах при помощи крайне компактного оборудования, без прибегания к сложным, менее надежным и более дорогостоящим диагностическим комплексам, линейные размеры детекторных узлов не превышают 50 см. Этим фактом объясняется фокусировка данного исследования на такой комбинации нейтронных детекторов.

3. Спектрометр D-D нейтронов на основе сцинтилляционного 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 $Cs_2LiYCl_6(Ce)$ 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 – $LaCl_3(Ce)$. Высокий световыход ($\sim 4 \times 10^4$ 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 $\phi 1 \times 1''$, 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 $PSD = (Q_L - Q_S)/Q_L$ и гамма-эквивалентной энергии, представленная на рисунке 3.

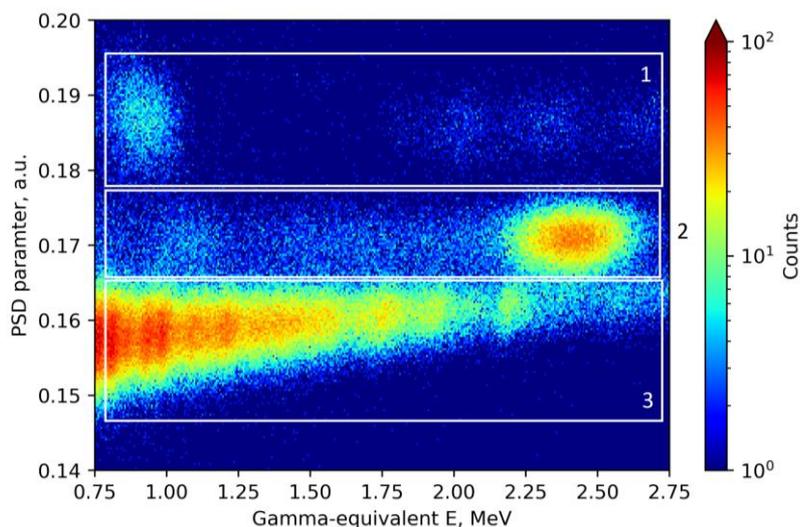


Рис. 3: Распределение отсчётов детектора на основе кристалла $LaCl_3(Ce)$ в поле излучения ИНГ-07Д по гамма-эквивалентной энергии и параметру разделения. Группы отсчётов: 1 – α -частицы, 2 – протоны, рожденные в (n,p) -реакциях на ядре хлора-35, 3 – γ -кванты [A5].

Наблюдаемый по результатам разделения аппаратный 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 удовлетворительное поведение 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 $\Delta E/E = 8\%$, $\varepsilon = 0,04 \text{ см}^2$, $FoM_{n/\gamma}$

= 0,95. В завершении главы представлен краткий анализ аппаратного спектра разработанного детектора при условии его размещения в месте расположения штатной нейтронной диагностики токамака Туман-3М.

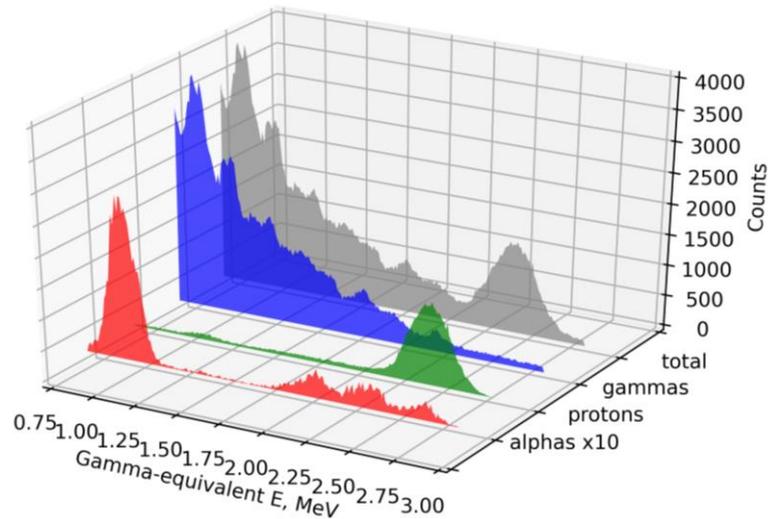


Рис. 4: Декомпозированный амплитудный спектр $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ -детектора. Красным – отсчёты, ассоциируемые с α -частицами ($\times 10$ для иллюстрации), зеленым – с протонами, синим – с γ -квантами [A5].

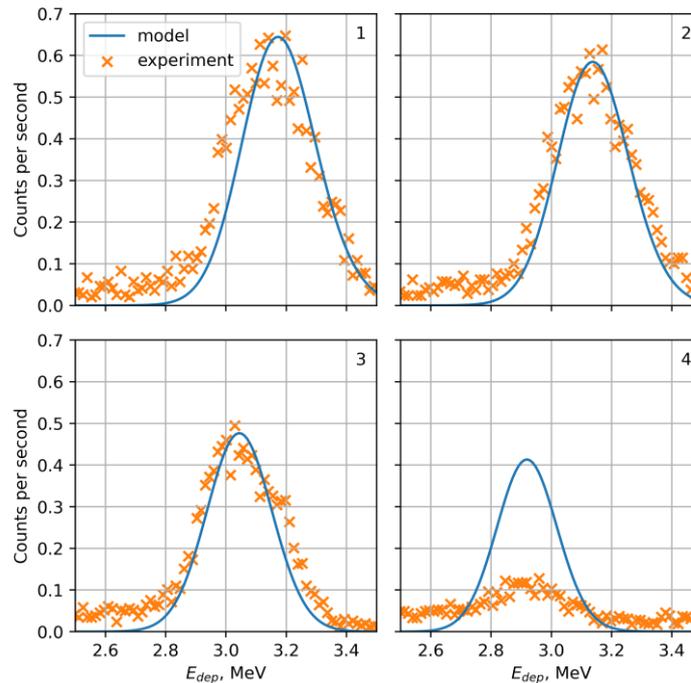


Рис. 5: Сравнение амплитудного спектра детектора в поле излучения ИНГ-07Д (оранжевым) с результатами моделирования (синим) для различных углов относительно оси нейтронного генератора: 1 – на оси, 2 – 30 градусов, 3 – 60 градусов, 4 – 90 градусов [A4,A5].

4. Спектрометры термоядерных нейтронов в составе диагностического комплекса ААП ИТЭР

Данная глава посвящена разработке и анализу измерительных характеристики 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%.

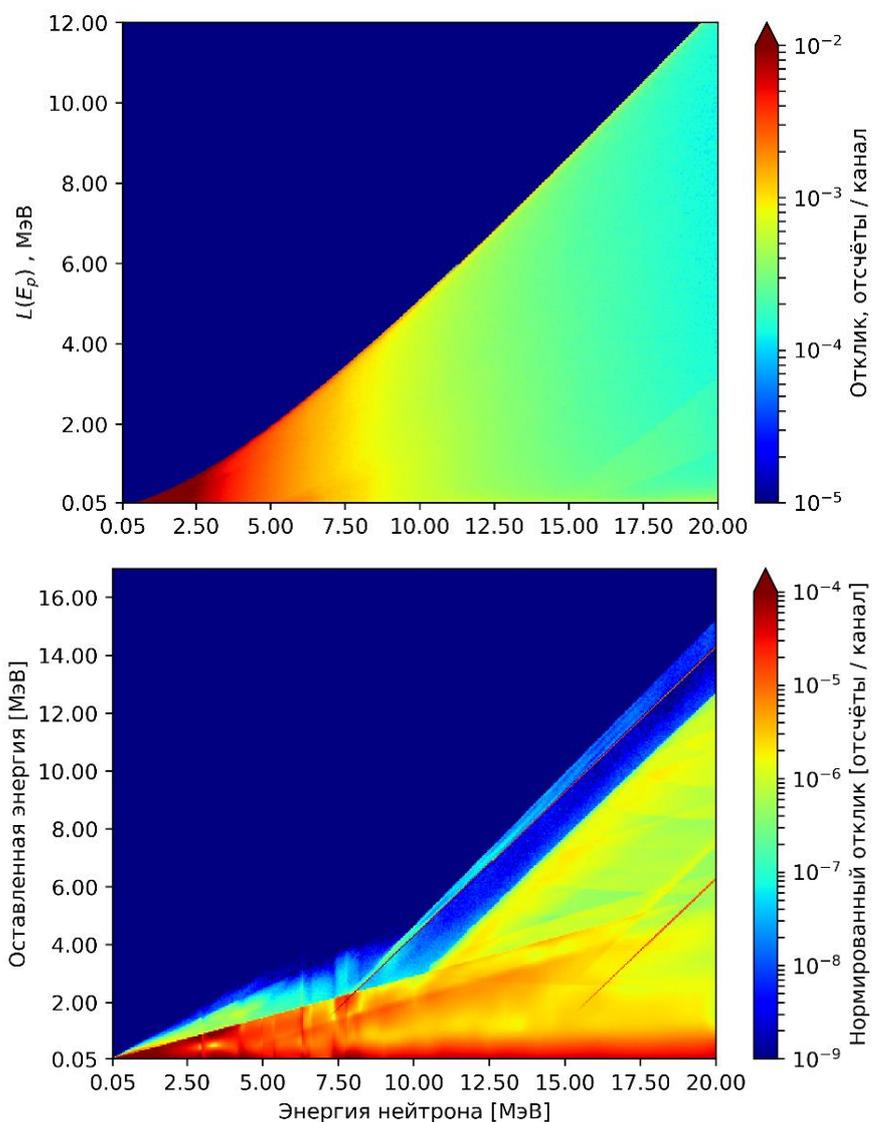


Рис. 6: Модели функций отклика стильбенового (вверху) и алмазного (внизу) детекторов диагностики Нейтронный Спектрометр для энергии нейтронов от 50 кэВ до 20 МэВ, рассчитанные с помощью библиотеки сечений ENDF-B/VIII.0 [9].

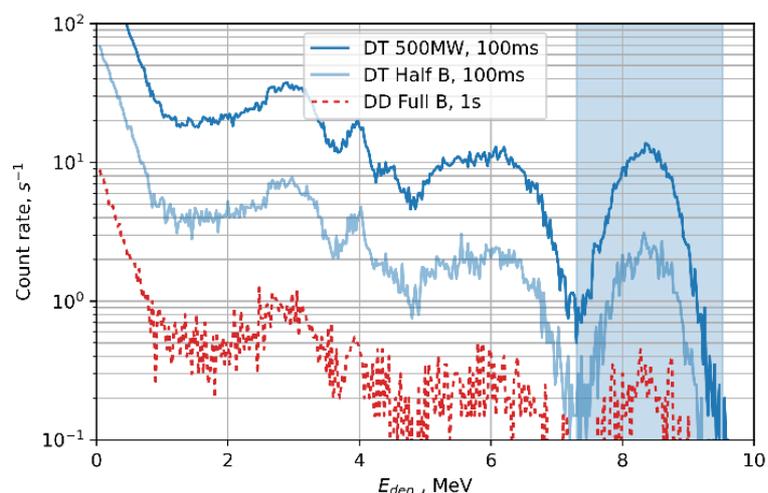


Рис. 7: Аппаратурный спектр алмазного детектора диагностики Нейтронный Спектрометр для нескольких режимов работы токамака-реактора ИТЭР: синим – основной 500 МВт сценарий, голубым – сценарий с половинным полем, красным – сценарий дейтериевого разряда с низким содержанием трития. Окрашенная область в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

Заключение

- Предложена двухкомпонентная аналитическая модель энергетического распределения быстрых нейтронов высокотемпературной плазмы токамака при интенсивном дополнительном нагреве плазмы. Применение этой модели позволило, в частности, для основного сценария работы токамака реактора ИТЭР при $n_{\text{T}}/n_{\text{D}} \sim 1$ и $T_{i,\text{core}} = 25$ 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 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 $n_{\text{T}}/n_{\text{D}}$ и T_i , в которых статистическая погрешность

показаний диагностики Нейтронный Спектрометр не превышают 5% при временном разрешении, варьируемом от 100 мс до 30 с.

- 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 - $\Delta E/E = 8\%$, $\varepsilon = 0,04 \text{ см}^2$, $\text{FoM}_{n/\gamma} = 0,95$, $\alpha/\beta = 0,35 \pm 0,03$ и $p/\beta = 0,75 \pm 0,06$, что позволяет говорить о целесообразности включения такого детектора в диагностический комплекс токамаков, проводящих эксперименты с дейтериевой плазмой, таких как Туман-3М, Глобус-М2 и EAST.

Перечень публикаций по теме диссертации

- A1. “Assessment of the Fast Particle Spectra for Tangential Spectrometer for H/He and DT ITER Operation,”, **T. M. Kormilitsyn**, A. Polevoi, L. Bertalot, M. Mironov, V. Krasilnikov, A. Serikov, R. Barnsley, Yu. Kashchuk, A. Loarte, S. Pinches, M. Pinches., Proc. of the 45th EPS Conference on Plasma Physics, 2018, P2.1005, 601-604.
- A2. “Modelling of the fast particle spectra for ITER tangential spectrometer”, **Kormilitsyn, T.M.**, Portnov, D.V., Kashchuk, Y.A., Problems of Atomic Science and Technology, Series Thermonuclear Fusion, 2018, 41(4)
- A3. “Modelling of the NBI contribution to the neutron energy spectra for the ITER Vertical Neutron Camera”, **Kormilitsyn, T.**, Nemtsev, G., Rodionov, R., Kashchuk, Y., Portnov, D., Journal of Instrumentation, 2019, 14(10), C10019
- A4. “Application of the $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ Scintillator to Fast Neutron Measurements”, **Kormilitsyn, T.**, Obudovsky, S., Kashchuk, Y., Rodionov R., Pankratenko, A., Dzhurik, A., Physics of Particles and Nuclei Letters, 2021, 18(1), p. 75–81
- A5. “Novel $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ -based spectrometer for deuterium plasma neutron diagnostics”, **T.M. Kormilitsyn**, S.Yu. Obudovsky, R.N. Rodionov, A.V. Pankratenko, A.S. Dzhurik, Yu.A. Kashchuk and A. V. Krasilnikov, Review of Scientific Instruments 92, 043528 (2021)

- A6. “Digital Pulse Shape Discrimination Method for D–D Neutron Spectrometry Using the $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ Scintillator”, A.V. Pankratenko, **T.M. Kormilitsyn**, S.Yu. Obudovsky, A.S. Dzhurik, Yu.A. Kashchuk, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2022, 19, p. 66-76
- A7. “Development of the NPA based diagnostic complex in ITER”, V.I. Afanasyev, **T.M. Kormilitsyn**, et al. – *Journal of Instrumentation*, 2022 *JINST* **17** C07001.

Список литературы

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. Pereverzev, G. V., & Yushmanov, P. N.(2002). *ASTRA. Automated System for Transport Analysis in a Tokamak (IPP 5/98)*. Garching: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

9. 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.