

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

*Кормилицына Тимофея Михайловича*

На тему: «Развитие методов нейтронной диагностики термоядерной плазмы токамака в условиях интенсивного дополнительного нагрева»  
по специальности 1.3.9 - «Физика плазмы»  
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

### Актуальность избранной темы.

Актуальность избранной темы диссертации связана в первую очередь с растущей ролью методов нейтронной диагностики плазмы для действующих и строящихся установок управляемого термоядерного синтеза. Рост мощности дополнительного нагрева и длительности разрядов в дейтериевой и дейтерий-третиевой плазмах приводят к дальнейшему увеличению актуальности исследований в области современных методов нейтронной диагностики, являющихся темой диссертации.

### Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Выдвинутые автором научные положения, выводы и рекомендации четко сформулированы и надежно обоснованы в тексте диссертации. Полученные результаты хорошо известны научной общественности, опубликованы в рецензируемых журналах, докладывались на многочисленных конференциях.

### Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность результатов диссертации подтверждены публикациями в журналах из списка ВАК, индексируемых WoS и Scopus (7 шт.), выступлениями на международных и всероссийских конференциях, а также совещаниях International Tokamak Physics Activity по диагностике плазмы (ITPA Diagnostics TG), к работе в которых диссертант приглашен в качестве одного из экспертов. В работе использованы апробированные мировым научным сообществом

методы моделирования высокотемпературной плазмы (ASTRA), нейтронного транспорта (MCNP) и взаимодействия излучения с веществом (GEANT4).

В диссертации однозначно и убедительно отмечена новизна полученных результатов. Особо следует отметить, что в качестве метода нейтронной диагностики высокотемпературной дейтериевой плазмы впервые создан и экспериментально апробирован в потоках D-D нейтронов и при интенсивном фотонном излучении спектрометр на основе кристалла хлорида лантана. Образцы нейтронного спектрометра подготовлены к установке и измерениям на токамаках Туман-3М, Глобус-М2, EAST и других установках УТС.

#### Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Научная и практическая значимость подкреплена активным применением предложенных методик и решений в ходе деятельности по разработке нейтронных диагностических комплексов токамака ИТЭР.

#### Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты работы могут быть использованы на целом ряде действующих токамаков, таких как Глобус-М2, EAST, KSTAR, для программы проектируемого Токамака с Реакторными Технологиями (TRT), а также в смежных исследовательских областях.

#### Содержание диссертации, ее завершенность.

Диссертация Кормилицына Тимофея Михайловича представляет собой завершенный научный труд, она посвящена современным методам нейтронной диагностики высокотемпературной плазмы, находящих все большее применение на действующих установках управляемого термоядерного синтеза. В работе приводится анализ текущего состояния диагностики высокотемпературной плазмы на основе спектрометрии термоядерных нейтронов, представлены результаты разработки новейшего метода нейтронной диагностики дейтериевой плазмы, рассмотрены особенности энергетического распределения быстрых нейтронов в сценариях разрядов с высокой мощностью дополнительного нагрева и предложен метод интерпретации показаний нейтронной диагностики с использованием моделирования транспорта покидающего плазму потока быстрых нейтронов.

Диссертация объемом 84 страницы содержит следующие разделы: введение, четыре главы, заключение и список литературы, включающей 40 позиций.

*Во введении* с точки зрения актуальности и научной новизны обосновывается тема исследования. Обозначена цель и задачи исследований, представлены положения, выносимые на

защиту. Сформулирована научная и практическая ценность работы, сведения о публикациях и выступлениях Кормилицына Т.М. на всероссийских и международных конференциях.

*В первой главе* приводится обзор широко применяемых на установках УТС с дейтериевой и дейтерий-третиевой плазмой комплексов нейтронной диагностики. В главе проанализированы преимущества и недостатки каждого из методов нейтронной диагностики, обоснована фокусировка работы на нескольких конкретных методах – сцинтилляционных и алмазных детекторах. Глава завершена кратким, но ёмким анализом ключевых типовых параметров нейтронных диагностических комплексов.

*Во второй главе* основное место отведено алгоритму решения прямой задачи для нейтронной диагностики, основанный на пошаговом моделировании источника быстрых нейтронов, нейтронного транспорта и взаимодействия нейтронного потока с детектором нейтронной диагностики. Автор приводит интересный пример использования такого метода для анализа компонент, входящих в наблюдаемый спектр термоядерных нейтронов, позволяющий сделать выводы о присутствии в плазме «немаксвелловских» ионов. Методология основывается на апробированных расчётных кодах и методах, что определенно подтверждает достоверность представленных результатов.

*Глава 3* является, на мой взгляд, ключевой частью диссертации. Представленные в главе результаты разработки новейшего метода нейтронной диагностики плазмы, основанного на  $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}_{g.s.}$ -реакции, обладают значительным потенциалом для использования в разрядах с высокотемпературной дейтериевой плазмой. Автором достаточно полно проведена как экспериментальная, так и расчётная работа, обосновывающая основные принципы этого метода диагностики плазмы на примере кристалла хлорида лантана. Диагностика на основе этого нейтронного спектрометра испытана в условиях облучения быстрыми D-D нейтронами, создаваемыми нейтронным генератором. В экспериментах на циклотроне ФТИ им. А. Ф. Иоффе продемонстрирована возможность регистрации нейтронов при высоком уровне фона гамма-излучения. Результаты главы 3 безусловно указывают на перспективность применения нового метода в экспериментах на многих установках УТС, ведущих исследования дейтериевой плазмы, включая токамаки EAST, KSTAR и др.

*В четвертой главе* обсуждается прогресс в разработке диагностики «Нейтронный спектрометр ИТЭР», являющейся частью диагностического комплекса «Анализатор атомов перезарядки». Проектируемая диагностика подкреплена представленной в главе 1 методологией решения прямой задачи для моделирования аппаратурных спектров нейтронных детекторов. Модели функций отклика детекторов диагностики «Нейтронный спектрометр ИТЭР» подкреплены результатами лабораторных экспериментов. Диссертантом показаны ограничения классических методов нейтронной диагностики в условиях сценариев с высокой мощностью дополнительного нагрева плазмы, в том числе методом инжекции быстрых нейтронов.

Информация об этих ограничениях имеет важное значение для других нейтронных диагностик ИТЭР и должна быть принята во внимание разработчиками этих систем.

Заключение кратко отражает ключевые результаты каждой главы диссертации.

#### Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации.

Диссертация Кормилицына Т.М. представляет собой подробный научный труд, имеющий несомненную ценность, как для научного сообщества, так и для широкого применения полученных результатов. Тем не менее, имеются замечания по тексту диссертации.

1. На стр.13 говорится, что изотропность процесса рассеяния нейтрона на водороде является предположением. Разве это не твердо установленный факт?
2. Рисунок 1.1(3) на стр.14 приведен на английском языке без ссылки на источник, шкала по энергии не обозначена, можно только догадываться нейтронам какой энергии соответствует этот спектр. И вообще, почему спектр, полученный в конкретном эксперименте, называется «аппаратный»?
3. В подписи к рис.1.4(1) сказано, что на рисунке приведена сумма сечений реакций для алмазного детектора, однако можно понять, что это не сумма сечений, а нечто другое. Требуется пояснения.
4. В работе опущена задача расчёта и анализа вклада от нейтронного источника, вызванного наработкой в плазме высокоэнергетических альфа-частиц, как продуктов D-T реакции. Данный процесс может приводить к еще большему уширению спектра термоядерных нейтронов, можно ли им пренебрегать при моделировании нейтронного источника?
5. В диссертации имеются опечатки. Много рисунков на английском языке, даже сделанные автором (рис.3.3(1)), на рис.1.1(1) не обозначена ось с величинами сечения и не приводится ссылка на источник, на рис1.5(2) не приведена ссылка на источник. Диссертация содержит англицизмы (типа «валидированы» на стр. 8), на стр. 36 приведена фраза «менее линейный режим работы», как это понимать? На стр.38 дается ссылка на рис. 3.2(4), хотя по смыслу это рис.3.3(1).

Следует отметить, что обозначенные в отзыве вопросы и замечания носят скорее рекомендательный характер и не снижают ценности диссертационной работы.

Автореферат в полной мере отражает основные результаты диссертации, а тема диссертации Кормилицына Т. М. соответствует паспорту специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Таким образом, диссертация Кормилицына Тимофея Михайловича «Развитие методов нейтронной диагностики термоядерной плазмы токамака в условиях интенсивного дополнительного нагрева» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную автором лично на высоком научном уровне, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Кормилицын Тимофей Михайлович заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник лаборатории 10  
ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН,  
Доктор физико-математических наук

  
Бурдаков А.В.

«31» ноября 2022 года

Подпись Бурдакова А.В. заверяю:  
Учёный секретарь ИЯФ СО РАН,  
к.ф.-м.н.

  
Резниченко А. В.  
«31» ноября 2022г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН)  
630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 11. +7(383)329-47-60, [inp.nsk.su/](http://inp.nsk.su/)  
Электронная почта оппонента: [A.V.Burdakov@inp.nsk.su](mailto:A.V.Burdakov@inp.nsk.su)