

Отзыв

официального оппонента

на диссертационную работу Кормилицына Тимофея Михайловича

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

В диссертационной работе Кормилицына Т. М. главное место отведено нейтронной спектрометрии, как методу диагностики термоядерной плазмы. Диссертация содержит в себе обзор существующих методов, активно применяемых на действующих токамаках, показаны результаты разработки нового метода нейтронной диагностики на основе кристалла хлорида лантана, а также рассмотрены особенности решения прямой задачи для нейтронной диагностики в условиях разрядов плазмы на установках УТС со значительной вводимой мощностью нагрева. Недавние достижения в области физики высокотемпературной дейтериевой плазмы, а также последние результаты D-T кампании на установке JET, в т.ч. достижение рекордной термоядерной мощности лишь подчеркивают **актуальность** выбранной темы исследования.

Научная и практическая значимость не вызывает сомнений. Предложенные в работе методологии и результаты расчётов регулярно применяются при разработке диагностических систем для токамака-реактора ИТЭР и имеют потенциал для применения на других установках. Разработанный метод D-D нейтронной спектрометрии не ограничен задачами нейтронной диагностики плазмы, но также может быть применен для задач, связанных с использованием D-D нейтронных генераторов, например, для задач *in situ* калибровки нейтронных диагностик на проектируемых установках УТС. Результаты моделирования с использованием предложенных методик позволили определить существенные ограничения в классических методах нейтронной диагностики, и в месте с тем расширить потенциал её применения для анализа дополнительных параметров плазмы в целом и фракции надтепловых ионов в частности. Стоит отметить значительный потенциал применения предложенных методов для действующих токамаков EAST и KSTAR, и для проектируемого токамака TRT.

Научная новизна и достоверность результатов: Высокой степенью новизны обладают также результаты анализа измерительных характеристик диагностики «Нейтронный Спектрометр» при восстановлении ионной температуры и топливного отношения плазмы. Впервые рассчитаны с помощью ПО GEANT4 модельные функции отклика детекторов нейтронной диагностики, используемые для анализа влияния изменений параметров плазмы на показания диагностики. Отдельно хотелось бы подчеркнуть новизну предложенного метода нейтронной диагностики дейтериевой плазмы с использованием детектора на основе кристалла хлорида лантана. Программное обеспечение, использованное автором в работе, активно поддерживается и широко применяется научным сообществом для решения модельных задач в области высокотемпературной плазмы (ASTRA) и взаимодействия излучения с веществом, решаемых методом Монте-Карло. Результаты, представленные в диссертации, прошли апробацию в качестве докладов на международных и всероссийских конференциях, и в достаточной мере отражены в

рецензируемых публикациях, индексируемых системой Scopus (7 публикаций) и/или журналах, включенных в Перечень ВАК.

Основное содержание диссертации и замечания:

Диссертация включает в себя введение, 4 главы, заключение и список ссылок на 40 пунктов, общим объемом 84 страницы. Автореферат достаточно полно отражает основные результаты диссертации, тема диссертационной работы Кормилицына Т. М. соответствует паспорту специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Автор обосновывает актуальность темы диссертации для современной физики высокотемпературной плазмы последними результатами на действующих установках, что выглядит уместно. Во введении представлены цели и задачи работы, указаны избранные методы решения поставленных задач, сформулирована научная новизна и практическая значимость исследования, а также положения диссертации.

Выполнен обзор современных методов нейтронной спектроскопии, основанных на времяпролетных схемах, органических и неорганических сцинтилляторах, алмазных детекторах. Достаточно кратко по каждому из широко применяемых методов представлен принцип их работы, примеры применения и характерные особенности – преимущества и недостатки. Высокой информативностью обладает сравнительный анализ нескольких методов как с точки зрения измерительных характеристик, так и с точки зрения габаритов, автор хорошо представляет себе особенности интеграции диагностических систем на современной установке УТС. Результатом этого анализа и становится выбор нескольких методов нейтронной диагностики плазмы, вокруг которых разворачиваются дальнейшие изыскания.

В работе автором представлена методология решения прямой задачи моделирования сигнала детекторов на основе состояния плазмы. Каждый шаг этой методологии основан на апробированном расчётном коде, для моделирования плазмы используется ПО ASTRA, методы Монте-Карло моделирования – для расчёта транспорта быстрых нейтронов и для анализа взаимодействия быстрых нейтронов с чувствительным объемом детектора. Наблюдаемый спектр быстрых нейтронов разделён на 2 условные компоненты – максвелловскую и «надтепловую». Используемые для их расчёта соотношения используются автором для расчёта «синтетического» наблюдаемого спектра быстрых нейтронов, который при его свертке с функцией отклика детектора нейтронной диагностики позволяет анализировать ожидаемый амплитудный спектр детектора. Автор применяет представленную методологию для анализа наблюдаемого спектра быстрых нейтронов и указывает на целый ряд параметров плазмы, поддающиеся восстановлению при использовании такой методологии. В следующих главах с помощью представленной методологии автор явно продемонстрирует ограничения существующих методов анализа отклика нейтронных детекторов, которые необходимо принимать во внимание при восстановлении параметров плазмы по показаниям нейтронной диагностики.

В достаточно детальной манере представлен метод нейтронной диагностики высокотемпературной дейтериевой плазмы, основанный на регистрации быстрых нейтронов кристаллом хлорида лантана. Автором проведено развернутое доказательство осуществимости концепции нейтронной диагностики дейтериевой плазмы хлорсодержащими сцинтилляторами. Проведен процесс калибровки детектора, оптимизирован алгоритм разделения частиц по форме

импульса, измерены спектры быстрых нейтронов в поле излучения нейтронного генератора и циклотрона ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Хорошая согласованность между наблюдаемым откликом и откликом детектора, полученным с помощью моделирования эксперимента на нейтронном генераторе, демонстрирует высокую степень проработки предлагаемого метода нейтронной диагностики плазмы. Показано, что несмотря на классическую форму отклика, детектор обладает меньшей чувствительностью к быстрым нейтронам по сравнению с органическими сцинтилляторами, что накладывает ограничения на минимальную длительность разряда токамака, которая может дать достаточную статистику на детекторе. Разработанный метод имеет значительный потенциал применения его на установках УТС с длительными разрядами в дейтериевой плазме – KSTAR, EAST, а также для разрабатываемого проекта Токамака с реакторными технологиями (TRT).

Масштабная работа проделана в рамках разработки диагностики «Нейтронный спектрометр ИТЭР». Данная диагностика является частью более крупного диагностического комплекса «Анализатор атомов перезарядки» и выполняет целый ряд функций. В рамках проекта ИТЭР данная диагностика выделяется высокой длиной коллиматора, что обеспечивает диагностике отличное отношение сигнал/шум – необходимое условие для спектрометрии покидающих плазму быстрых нейтронов. Для данной диагностики, вкуче с представленной в главе 2 методологией, автором решена задача моделирования функций отклика детекторов – алмазного и стильбенового. В главе 4 на примере этой диагностики продемонстрирован полный цикл решения прямой задачи моделирования показаний детектора на основе состояния плазмы. Проведён Монте-Карло расчёт транспорта быстрых нейтронов и проанализирован аппаратурный спектр детекторов с помощью моделей функции отклика. На примере нескольких сценариев диссертантом показано, что в некоторых разрядах, планируемых в рамках дейтерий-третиевой кампании ИТЭР, отличающихся высокой мощностью нагрева плазмы и небольшой ионной температурой, показания нейтронной диагностики должны быть интерпретированы исключительно вкуче с моделированием, так как значительная часть отклика детекторов обусловлена присутствием в плазме надтепловых ионов. Проведенный в данной главе анализ подчёркивает состоятельность предложенной методологии и важность нейтронной диагностики с точки зрения отклика, включающей в себя сопроводительное моделирование функции отклика детекторов.

Вопросы и замечания по содержанию диссертации представлены ниже:

1. Чем обусловлены требования, предъявляемые к нейтронным диагностикам, разрабатываемым для ИТЭР, в части измерительных характеристик? Чем «Нейтронный спектрометр» выделяется на фоне других разрабатываемых нейтронных диагностик, в частности, например, Радиальной Нейтронной Камеры?
2. В работе явно недостаточно освещен вопрос допущений, сделанных автором при переходе от выходных данных одного расчётного кода к входным данным другого в рамках предложенной методологии. Рассматриваются ли автором альтернативные варианты программного обеспечения, используемого в рамках решения прямой задачи, и если да, то какие?
3. Стиль изложения диссертации весьма сух и полон англицизмов, что усложняет восприятие материала. Значительная часть подписей к иллюстрациям приведена на английском.

Тем не менее, замечания и вопросы к диссертанту носят рекомендательный характер и не снижают ценности диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., (ред. 07.06.2021г.) а ее автор Кормилицын Тимофей Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Официальный оппонент:

Научный руководитель по плазменным технологиям и УТС, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,
Доктор физико-математических наук

 Романников А. Н.

«25» ноября 2022 года

Подпись Романникова А. Н. заверяю:

Учёный секретарь

АО «ГНЦ РФ «ТРИНИТИ», к.ф.-м.н.

 Ежов А. А.

М.П. «25» ноября 2022г.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНЦ РФ «ТРИНИТИ»)

108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, +7(495)841-50-85, triniti.ru

Электронная почта оппонента: romannikov@triniti.ru