

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Будаева Вячеслава Петровича

на диссертационную работу

Пинженина Егора Игоревича

**«Применение методов ядерной физики для диагностики быстрых частиц
на установке ГДЛ»,**

представленную в диссертационный совет 24.1.162.02 на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института ядерной физики им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук,

на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.9. Физика плазмы

Актуальность темы диссертации:

Развитие и усовершенствование диагностических методов необходимо для исследований плазмы в современных термоядерных и плазменных установках. Особо востребованы измерения с высоким пространственным и временным разрешением с целью дальнейшего развития фундаментальных основ физики плазмы на основе новых экспериментальных данных.

Диссертация Пинженина Егора Игоревича посвящена развитию и применению методов диагностики нейтронов, протонов – продуктов реакции синтеза, а также быстрых атомов и гамма-квантов в экспериментах на плазменной установке Газодинамическая Ловушка (ГДЛ). Основное внимание уделено созданию многоканальных детекторов на основе полупроводниковых диодов и сцинтилляционных детекторов, позволяющих с высоким временным и пространственным разрешением изучать динамику быстрых частиц, эволюцию интенсивности реакции синтеза дейтерия, плазменные неустойчивости. Проведённый анализ влияния неустойчивостей плазмы на распределение быстрых частиц, результаты анализа регистрации нейтронов и гамма-квантов, разработка методов применения электронного пучка для создания мишенной плазмы в ГДЛ являются актуальными для развития физики горячей плазмы в открытых ловушках, что востребовано для проекта открытой ловушки следующего поколения ГДМЛ. Развитые в работе методы могут найти применение в экспериментах на токамаках с термоядерной плазмой при анализе

продуктов дейтерий-тритиевой реакции синтеза, оценке энергобаланса в плазме, исследовании неустойчивостей плазмы, вызванных быстрыми ионами.

Новизна подхода и основные результаты:

Впервые на установке ГДЛ реализованы методы многоканальной диодной диагностики быстрых нейтральных атомов, позволяющие регистрировать параметры процессов удержания и потери быстрых ионов в ГДЛ. Показана возможность изучать эволюцию популяции быстрых ионов плазмы при развитии неустойчивостей плазмы, включая МГД неустойчивости.

Впервые на ГДЛ разработана многоканальная диагностическая система детекторов протонов и нейтронов - продуктов реакции ядерного синтеза. Диагностика позволяет вести измерения абсолютных значений интенсивности реакции ядерного синтеза на ГДЛ во всем диапазоне рабочих параметров плазмы с высоким временным и пространственным разрешением. С использованием разработанной диагностики впервые показано изменение функции распределения быстрых частиц при развитии альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости. Проведено моделирование функции распределения быстрых ионов и интенсивности реакции синтеза дейтерия в открытой ловушке кодом ДОЛ для разрядов с СВЧ нагревом, разрядов, в которых развивается альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость.

Спектрометр нейтронов и гамма квантов на основе стильбенового сцинтиллятора позволил в условиях ГДЛ разделить при измерениях вклады рентгеновских квантов и нейтронов, а также получить данные об энергии перегретых электронов, возникающих в ГДЛ в процессе электронного циклотронного нагрева плазмы и в экспериментах по инжекции электронного пучка. Проведены калибровки спектрометра, приведены данные о максимальной скорости счета прибора в режиме реального времени, энергетическое разрешение, показана возможность одновременной регистрации 2,45 МэВ и 14 МэВ нейтронов.

Достоверность полученных результатов:

Достоверность приведенных в работе результатов подтверждается большим количеством экспериментальных данных приведенных в работе и публикациях. Приведенные автором экспериментальные данные не противоречат результатам моделирования, теоретическим представлениям и оценкам, приведенным в работе.

Результаты работы докладывались на 17-ти Российских и международных конференциях Пинжениным Егором Игоревичем с соавторами. Основные результаты приведены в 4 статьях в журналах из перечня ВАК.

Личный вклад автора обоснован в диссертации с подробным описанием по каждому разделу диссертации и опубликованным работам, изложенные в работе результаты получены автором лично, либо при его определяющем участии.

Содержание диссертации и ее завершенность:

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения, Списка цитируемой литературы и трех приложений. Работа изложена на 150 страницах, содержит 86 рисунков, 8 таблиц. Список литературы содержит 112 наименований.

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, обсуждается степень разработанности темы исследований. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

В первой главе приведено описание плазменной установки Газодинамическая ловушка (ГДЛ) и приведены результаты по изучению быстрой ионной компоненты в экспериментах на ГДЛ. Полученные ранее результаты на ГДЛ показывают необходимость измерения характеристик быстрых ионов с высоким пространственным и временным разрешением, что обусловило необходимость создания новых диагностик.

Во второй главе описана созданная диагностика быстрых атомов на основе многоканальных диодов. Использовались специальные диоды (AXUV) и экспериментальные лавинные диоды, разработанные для регистрации атомов перезарядки и оптического излучения и плазмы ГДЛ. Проведено исследования свойств лавинных диодов, включая лавинное усиление сигнала частиц и фотонов, созданы две камеры-обскуры на основе линек диодов для изучения пространственного разрешения эмиссии быстрых атомов из ловушки, что продемонстрировало новизну и перспективность применения созданной диагностики для применения в установках с горячей плазмой. Наблюдалась МГД активность плазмы, которая сопровождается модуляцией потока атомов, проведено моделирование, которое подтверждает, что соответствующая модуляция вызвана дифференциальным вращением плазмы. Созданная диагностика применима также для регистрации характеристик альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости, что было продемонстрировано в экспериментах путем анализа потоков атомов перезарядки. Проведенные эксперименты показали возможность использования созданной диагностики

для регистрации параметров удержания быстрых ионов, их динамики, пространственного распределения и МГД активность плазмы в ГДЛ. Новая диагностика была испытана в длительной годовой кампании в плазменных экспериментах на установке ГДЛ, что подтвердило ее надежность и возможность применимости для других термоядерных и плазменных установок.

В третьей главе описана диагностика продуктов термоядерной реакции, которая была реализована на установке ГДЛ. Приведен обзор существующих методов регистрации нейтронов — продуктов реакции синтеза. Создан комплекс детекторов термоядерных протонов (3,02 МэВ) на основе и полупроводниковых диодов с тонким мертвым слоем и детекторов 2,45 МэВ нейтронов на основе сцинтилляторов и ФЭУ. Методы калибровки детекторов обеспечивают измерение абсолютных значений измерений интенсивности реакции синтеза (в том числе в экспериментах со вспышками рентгеновского излучения). В экспериментах на ГДЛ с помощью созданной диагностики впервые наблюдалось изменение функции распределения быстрых частиц в результате развития плазменных неустойчивостей. Новизна и ценность диагностики состоит в возможности изучать эволюцию выхода реакции термоядерного синтеза с временным разрешением до 100 мс, обеспечивая возможность оценки интенсивности термоядерной реакции, такие свойства диагностики востребованы для будущего применения в термоядерных плазменных реакторах.

Четвертая глава посвящена калибровкам и применению в эксперименте на ГДЛ спектрометра нейтронов и гамма квантов на основе стильбенового сцинтиллятора. В работе приведена энергетическая калибровка спектрометра с использованием радионуклидных и ускорительных источников нейтронов и гамма-квантов, измерено энергетическое разрешение при регистрации 2,45 МэВ и 14 МэВ нейтронов. Показано, что спектрометр нейтронов и гамма квантов обеспечивает работу в режиме реального времени до скорости счета $\sim 5 \cdot 10^5$ событий/сек. Применение спектрометра в плазменных экспериментах позволяет отделить вклад гамма излучения в штатные нейтронные диагностики на ГДЛ. Созданная и испытанная диагностика может применяться в других термоядерных плазменных установках для анализа характеристик термоядерной дейтерий-тритиевой реакции, что имеет важное значения для диагностического обеспечения термоядерного реактора. Диагностика была использована для регистрации рентгеновского излучения в экспериментах на ГДЛ с дополнительным СВЧ нагревом

плазмы, что позволило зарегистрировать популяцию электронов с энергией более 100 кэВ. Этот результат является важным для технологии генерации мишенной плазмы электронным пучком на ГДЛ.

В **Заключении** приведены основные результаты работы.

Замечания:

1. В главе 2 приведены данные о пространственных распределениях потока атомов в относительных единицах. Следовало бы приводить абсолютные значения, что позволит исследовать энергобаланс в плазменном разряде в ГДЛ.
2. Автор не обосновывает в главе 3 выбор PIN диодов для диагностики 3,02 МэВ протонов, в том числе, в сравнении с аналогичными диагностиками на основе поперечно-барьерных диодов, используемых на токамаках.
3. В главе 4 описан метод частотно-градиентного анализа для идентификации нейтронов и гамма квантов по форме световой вспышки, однако не приведены аргументы, почему выбран такой алгоритм.
4. Работа содержит некоторое количество жаргонных терминов и небольшое количество опечаток.

Указанные замечания не снижают высокий уровень выполненной работы и не влияют на общее положительное впечатление от нее.

Оценка автореферата диссертации:

Автореферат полностью раскрывает содержание и основные положения диссертации. Замечаний к автореферату нет.

Заключение оппонента на диссертацию Пинженина Егора Игоревича

на соискание ученой степени кандидата наук:

Диссертация Пинженина Егора Игоревича «Применение методов ядерной физики для диагностики быстрых частиц на установке ГДЛ», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы является научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение важных научных проблем, связанных с развитием диагностик продуктов реакции ядерного синтеза и быстрой ионной плазменной компоненты на установке ГДЛ.

