

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук

Немцева Григория Евгеньевича

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 работы:

Диссертация Пинженина Егора Игоревича посвящена развитию методов регистрации различных корпускулярных частиц (протонов и нейтронов, рождающихся в термоядерной реакции, нейтральных частиц с энергиями ~ 10 кэВ и фотонов с энергиями 10-100 кэВ) в установке Газодинамическая ловушка (ГДЛ).

Применение данных методов в эксперименте на осесимметричной открытой ловушке ГДЛ позволило исследовать фундаментальные вопросы физики плазмы (изучение МГД и кинетических мод плазменных колебаний, изучение материального и энергетического баланса, вопросы удержания и накопления быстрой ионной плазменной компоненты, развитие дополнительных методов нагрева и др.).

Данная работа актуальна как для развития проекта открытой ловушки следующего поколения, так и в целом для исследований по управляемому термоядерному синтезу.

Научная новизна и основные результаты:

Впервые на установке ГДЛ реализована диагностика 3.02 МэВ протонов, регистрирующая абсолютные значения интенсивности реакции термоядерного синтеза с пространственным и временным разрешением. Впервые зарегистрированы перестроения профиля эмиссии 3.02 МэВ протонов в результате неустойчивости в эксперименте на ГДЛ. Приведены данные по выходу 2.45 МэВ нейтронов в экспериментах с дополнительным СВЧ нагревом и в экспериментах по изучению влияния газовых условий в расширителе открытой ловушки на удержание быстрых ионов в центральном пробкотроне ГДЛ.

Впервые на ГДЛ реализована диагностика атомов с энергией 1-25 кэВ покидающих плазму. Такая диагностика позволяет изучать МГД колебания и потерю быстрых частиц в результате микронеустойчивостей. Подтверждена картина вихревого удержания плазмы.

Реализованный на ГДЛ спектрометр нейтронов и гамма квантов на основе сцинтиллятора позволил впервые получить данные о спектре рентгеновского излучения в экспериментах с дополнительным нагревом на ГДЛ, отделить вклад такого излучения в работу штатных нейтронных диагностик установки.

Достоверность полученных данных:

Достоверность полученных данных обеспечивается их согласованностью с проведенными ранее на установке ГДЛ исследованиями, экспериментальными данными, приведенными в работе, сравнением их с результатами расчетов. Результаты, приведенные в диссертации, прошли апробацию в качестве докладов и обсуждений на международных и российских конференциях, семинарах ИЯФ СО РАН. Полученные в работе данные представлены в четырех публикациях в реферируемых журналах.

Практическая значимость полученных автором результатов:

Работа Пинженина Егора Игоревича имеет практическую ценность для эксперимента на установке ГДЛ: разработанные соискателем диагностики штатно используются в экспериментальных кампаниях, результаты этих работ широко представлены Пинжениным и соавторами на научных конференциях и в рецензируемых журналах.

Диагностика 3.02 МэВ протонов — продуктов реакции синтеза при участии Пинженина Егора Игоревича реализована на сферическом токамаке Глобус-М2 и дополняет штатные нейтронные диагностики.

Спектрометр нейтронов и гамма квантов в режиме реального времени может регистрировать спектры 2.45 МэВ и 14 МэВ нейтроны, что важно для дейтерий-третиевых плазменных экспериментов.

Анализ содержания диссертации и ее завершенность:

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Полный объем диссертации составляет 150 страниц, включая 86 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 112 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, обсуждается степень разработанности темы исследований. Сформулированы цели и задачи работы, приведены положения, выносимые на защиту. Сформулирована научная и практическая ценность исследований. Приведены сведения о публикациях и выступлениях Пинженина Егора Игоревича на всероссийских и международных конференциях.

В первой главе приведено краткое описание установки Газодинамическая ловушка, приведены сведения об удержании быстрой ионной плазменной компоненты в ГДЛ.

Вторая глава посвящена созданию диагностики быстрых атомов на основе диодов с тонким мертвым слоем. Показано, что разработанная диагностика чувствительна к атомам с энергией от 1 кэВ. Приведены данные по наблюдению МГД активности и кинетической неустойчивости плазмы в ГДЛ. Моделируются сигналы детекторов, возникающие в следствие дифференциального вращения плазмы и перезарядки быстрых ионов.

В третьей главе приведены данные по разработке диагностики реакции синтеза на установке ГДЛ. Автором была разработана многоканальная диагностика 3.02 МэВ протонов и 2.45 МэВ нейтронов. Показана возможность измерения абсолютного значения интенсивности реакции синтеза на установке ГДЛ. Приведены данные по измерению потока нейтронов в экспериментальных кампаниях по дополнительному нагреву плазмы в ГДЛ гиротронами и по изучению влияния газовых условий в расширителе открытой ловушки на удержание горячей плазмы в центре. Показано перестроение пространственного профиля эмиссии термоядерных протонов при развитии микронеустойчивостей в установке ГДЛ.

Четвертая глава посвящена калибровкам, тестированию и применению в плазменном эксперименте на установке ГДЛ спектрометра нейтронов и гамма квантов на основе стильбенового сцинтиллятора, ФЭУ и FPGA. В работе показано, что спектрометр разделяет нейтроны и гамма кванты по форме световой вспышки в режиме реального времени, сравнивается реализованный в приборе метод частотно-градиентного анализа с традиционным PSD методом. Приведены данные по энергетическим калибровкам гамма канала и нейтронного канала спектрометра. Показаны примеры применения спектрометра в плазменном эксперименте с дополнительным нагревом, который сопровождается вспышками рентгеновского излучения. Показана возможность отделения вклада рентгеновского излучения в штатные нейтронные диагностики установки ГДЛ.

Заключение кратко отражает ключевые результаты каждой главы диссертации.

Замечания:

1. В главе 2 приведены поперечные распределения, зарегистрированные камерами. Не приведены оценки, какой вклад в сигнал дают атомы, покидающие плазму по сравнению с излучением для камеры, установленной вблизи точки остановки.
2. Также в главе 2 приведены исследования альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости с помощью сигналов камеры обскура. Автором сказано, что развитие данной неустойчивости приводит к уменьшению сигнала диамагнетизма на 10%, что ранее было исследовано на установке с помощью магнитных зондов. Однако здесь не

приведены ссылки на данные исследования. Альвфеновская ионно-циклотронная неустойчивость должна приводить к потерям быстрых частиц в конус потерь. На рисунке 2.23 показано, что падение сигнала с магнитного зонда сопровождается падением сигнала на камере-обскуре, находящейся в центре. Однако здесь также было бы уместно привести данные с камеры-обскуры, находящейся в точке остановки.

3. В главе 3 приведен обзор методов диагностики нейтронов в термоядерных экспериментах. Не вполне понятно, почему автор его свел к описанию нейтронно-активационного анализа, а также к регистрации нейтронов алмазными детекторами и ионизационными камерами деления. Во-первых, в термоядерных экспериментах используется значительно больше методов регистрации нейтронов. Во-вторых, здесь также уместнее привести результаты регистрации термоядерных протонов и нейтронов сцинтилляционными детекторами, полученные на других термоядерных установках. Кроме того, сделанный автором в главе 3.1.3. вывод, что времяпролетные спектрометры и спектрометры протонов отдачи не обладают необходимым временным разрешением для условий ГДЛ, не является верным.
4. В главе 4 на рисунке 4.31 приведены осциллограммы сигналов создания и нагрева плазмы и сигналы со стильбенового спектрометра и сцинтиллятора СПИМ-5. Не вполне понятно, чем обусловлено возникновение нейтронного сигнала до момента времени включения инжектирующего пучка. Здесь уместно кроме общей скорости счета привести интегральное число отчетов во временном окне, чтобы оценить статистическую погрешность измерений.
5. Диссертация содержит некоторое количество опечаток, в части графиков и рисунков используется как русский так и английский язык (рисунки 2.23, 3.6, 3.22).

Оценка автореферата диссертации:

Автореферат в полной мере отражает основные результаты диссертации, а тема диссертации Пинженина Егора Игоревича соответствует паспорту специальности 1.3.9. физика плазмы.

Заключение оппонента по диссертации Пинженина Егора Игоревича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук:

Диссертация Пинженина Егора Игоревича «Применение методов ядерной физики для диагностики быстрых частиц на установке ГДЛ» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную автором лично. Развитые в работе методы актуальны как для исследований на ГДЛ и открытых ловушек следующего поколения, так и

для экспериментов с термоядерной плазмой токамаков. Отмеченные недостатки не снижают ценности диссертационной работы.

Диссертация удовлетворяет всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Пинженин Егор Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Я, Немцев Григорий Евгеньевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Пинженина Егора Игоревича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
Немцев Григорий Евгеньевич
Кандидат физико-математических наук
Специальность 1.3.9. Физика плазмы,
адрес: 123060, г. Москва, ул. Расплетина, д. 11, к. 2
тел: +7(926) 364-45-91
эл. почта: g.nemtsev@iterrf.ru
Частное учреждение Государственной корпорации
по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР»
Начальник сектора, отдел нейтронной
и спектроскопической диагностики
« 5 » июня 202 6 г.



Г.Е. Немцев

Подпись Немцева Г. Е. заверяю

Заместитель директора по науке

Кащук Юрий Анатольевич

« 5 » июня 202 6 г.



/ 
(подпись, печать)