

ОТЗЫВ

официального оппонента

кандидата физико-математических наук Кашука Юрия Анатольевича
на диссертацию **МЕЛЬНИКА АНДРЕЯ ДМИТРИЕВИЧА**
**«Исследование ионного компонента плазмы в токамаках при нейтральной
инжекции методом корпускулярной диагностики»,**

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - «Физика плазмы» в диссертационный совет Д 002.205.03 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

Актуальность избранной темы

Диагностический метод по потокам нейтральных атомов из плазмы, широко применяется в современных исследованиях высокотемпературной плазмы с магнитным удержанием. Диагностика основана на регистрации атомов, возникающих при захвате ионами плазмы электронов в результате перезарядки или фоторекомбинации, создавая уникальную возможность анализировать функции распределения ионов плазмы, являющихся топливом термоядерного реактора. Корпускулярная диагностика позволяют измерять температуру ионов плазмы и её изотопный состав – соотношение дейтерия и трития. Оба эти параметра необходимы для контроля процессами зажигания и горения термоядерной плазмы в будущем термоядерном реакторе.

Принцип работы термоядерного реактора основан на зажигании плазмы за счет дополнительного нагрева (СВЧ, инжекция пучков нейтралов) и поддержании горения за счет образующихся альфа-частиц. Одним из критических моментов работы реактора является контроль топлива и удержание быстрых частиц.

Для исследования эффективности дополнительного нагрева плазмы и удержания быстрых частиц необходимо создание и применение современных комплексов корпускулярной диагностики в экспериментах на токамаках. Такие комплексы должны обеспечить одновременную регистрацию потоков атомов водорода и дейтерия, испускаемых плазмой, одновременные измерения спектров быстрых частиц и температуры ионов плазмы, улучшенное энергетическое и временное разрешения, возможность проводить измерения в условиях нейтронного фона и сопутствующего гамма-излучения.

Исследования поведения ионного компонента плазмы при нагреве нейтральной инжекцией в настоящее время проводятся практически на всех современных токамаках. Цель этих экспериментов – изучение физики быстрых ионов в плазме токамака, определение механизмов и оптимизация эффективности дополнительного нагрева термоядерной плазмы нейтральной инжекцией, развитие и совершенствование методик измерений и др..

С учетом вышеизложенного, создание современного комплекса корпускулярной диагностики и проведение исследований ионного компонента плазмы токамаков при нагреве нейтральной инжекцией, безусловно, является сложной и актуальной научно-технической задачей.

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

Научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации представляются научно обоснованными.

Разработанный анализатор атомов перезарядки АКОРД-24М оптимизирован для задач изучения поведения быстрых ионов плазмы токамака. Анализатор АКОРД-24М обладает

эквидистантным шагом каналов по энергии и обеспечивает регистрацию более детальных спектров быстрых частиц, что обеспечивает энергетическое разрешение 10%. Это позволяет регистрировать распределение ионов за один плазменный разряд с хорошей статистикой и повысить временное разрешение до 100 мкс.

Проведена модернизация и введены в действие комплексы корпускулярной диагностики на токамаках Глобус-М, ТУМАН-3М и COMPASS. Созданные комплексы корпускулярной диагностики обеспечивают измерение ионной температуры и исследование поведения быстрых надтепловых ионов. Применение комплексов корпускулярной диагностики на установках ТУМАН-3М и COMPASS позволило провести изучение основных особенностей поведения быстрых и тепловых ионов в экспериментах по нагреву плазмы методом инжекции нейтралов. Показано, что исследование поведения ионного компонента плазмы в экспериментах с инжекцией нейтралов эффективнее проводить с использованием двух анализаторов нейтральных атомов с перпендикулярной и тангенциальной линией наблюдения.

Экспериментально показано, что на токамаке Глобус-М в режиме с дополнительным нагревом плазмы нейтральным пучком дейтерия с энергией 24–30 кэВ форма энергетического распределения быстрых ионов отличается от формы распределений при низкой энергии инжекции (18 кэВ). Показано, что на форму энергетического спектра быстрых ионов оказывают влияния пилообразные колебания плазмы, а также наличия компонента с энергией $2/3$ от энергии нагревного пучка нейтралов. Показано, что пилообразные колебания приводят к перераспределению быстрых ионов в объеме плазмы и по питч углам, вследствие чего увеличиваются их потери. Выявлены зависимости величины потерь быстрых ионов от периода пилообразных колебаний и от смещения плазменного шнура к центральной колонне токамака Глобус-М.

Обнаруженные эффекты насыщения ионной температуры и увеличение потерь быстрых частиц при увеличении мощности нейтральной инжекции свыше 250 кВт в экспериментах на токамаке ТУМАН-3М указывают на прямые потери частиц, а также взаимодействие нагревного пучка со стенками переходного патрубка. При исследовании смещения плазмы по большому радиусу к центру обнаружено увеличение популяции быстрых ионов и рост ионной температуры за счет улучшения удержания быстрых частиц и возрастания времени их торможения в плазме.

Анализатором атомов перезарядки АКОРД-24 измерена ионная температура в центре плазменного шнура токамака COMPASS в омическом режиме. Величина ионной температуры достигает 400 эВ. В экспериментах с пучковым нагревом зарегистрировано увеличение ионной температуры до 470 эВ, что позволяет исследовать влияние и эффективность дополнительного нагрева плазмы.

Достоверность и новизна полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается апробированностью методик измерений и воспроизводимостью экспериментальных данных, полученных с помощью анализаторов атомов серии АКОРД на малых токамаках Глобус-М, ТУМАН-3М и COMPASS. Полученные экспериментальные результаты согласуются с аналитическими оценками и результатами численных расчетов. Результаты работ были представлены на российских и международных конференциях. Все результаты, представленные к защите, опубликованы в реферируемых журналах.

Практическая значимость полученных автором результатов

Практическая значимость работы А.Д. Мельника состоит в разработке нового многоканального атомного анализатора АКОРД-24М с эквидистантным шагом каналов по

энергии, улучшенным энергетическим и временным разрешением и возможностью одновременной регистрации потоков атомов водорода и дейтерия.

Исследования методами корпускулярной диагностики характеристик и поведения ионного компонента плазмы токамаков Глобус-М, ТУМАН-3М и COMPASS при нагреве нейтральной инжекцией показали:

- 1) эффективность применения двух анализаторов с перпендикулярной и тангенциальной линией наблюдения;
- 2) необходимость переделки переходного патрубка токамака ТУМАН-3М с целью снизить взаимодействие нагревного пучка со стенками переходного патрубка, приводящее к потерям частиц пучка на реионизацию и загрязнению плазмы примесями;
- 3) корректность работы нейтральной инжекции в экспериментах на токамаке COMPASS подтверждена формой энергетического спектра и отсутствием потерь быстрых частиц.

Оценка содержания диссертации, её завершённость

Диссертационная работа А.Д. Мельника представлена на 168 страницах, содержит 56 рисунков, 3 таблицы и 108 наименования использованной литературы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении автор обосновывает актуальность темы диссертации, формулирует цели исследований и приводит положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы по теме диссертации. Рассмотрено устройство и особенности установках Глобус-М, ТУМАН-3М и COMPASS, представлен анализ современного состояния методов дополнительного нагрева ионов плазмы при помощи инжекции нейтральных атомов, описаны диагностические методы исследования поведения ионного компонента высокотемпературной плазмы.

Во второй главе проведен анализ применимости анализаторов с регистрацией вторичных ионов в параллельных электрическом и магнитном полях для исследования характеристик быстрых частиц в экспериментах на токамаках Глобус-М, ТУМАН-3М и COMPASS. Показаны существующие ограничения в измерениях для анализаторов типа АКОРД-12 и АКОРД-24. Представлено описание модернизированного анализатора АКОРД-24М с эквидистантным шагом каналов по энергии и улучшенным энергетическим разрешением.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований поведения ионов на токамаке Глобус-М в условиях инжекции нейтральных атомов с энергией до 30 кэВ. Созданный комплекс корпускулярной диагностики обеспечил возможность измерения энергетических распределений надтепловых частиц. Объяснены особенности измеренных спектров и проведен анализ возможных механизмов формирования энергетических распределений надтепловых ионов плазмы при нейтральной инжекции. Анализ аппаратных спектров показал наличие компонента с энергией $\frac{2}{3}E_{NB1}$, появляющегося вследствие диссоциации иона HD^+ в нейтрализаторе инжектора. Показано влияние пилообразных колебаний на спектры надтепловых ионов плазмы токамака Глобус-М, заключающееся в том, что смещение плазмы к центру уменьшает воздействие пилообразных колебаний на надтепловые ионы, а так же, что период пилообразных колебаний является одним из факторов, определяющих потери надтепловых ионов в режимах с нагревом плазмы нейтральной инжекцией.

В четвертой главе диссертации представлен анализ результатов исследований методами корпускулярной диагностики эффективности нагрева плазмы токамака ТУМАН-3М при нейтральной инжекции. Обнаружен эффект насыщения роста ионной температуры при увеличении мощности инжекции. В экспериментах при увеличении мощности инжекции зарегистрировано снижение уровня быстрых частиц. Сформулированы возможные причины этого явления: изменение плотности остаточных атомов, увеличение прямых

потерь и ослабление нейтрального пучка в переходном патрубке. Проведены экспериментальные исследования по проверке этих гипотез. Из представленных результатов следует, что взаимодействие нагревного пучка со стенками патрубка является наиболее вероятной причиной насыщения ионной температуры плазмы. По результатам экспериментальных исследований принято решение о модернизации переходного патрубка инжектора нейтралов на токамаке ТУМАН-3М.

Пятая глава диссертации посвящена введению в действие анализатора АКОРД-24 на установке COMPASS. Созданный комплекс корпускулярной диагностики позволяет изучать поведение как быстрых, так и тепловых ионов. Проведены измерения ионной температуры плазмы токамака COMPASS. В режимах с омическим нагревом ионная температура в центре плазмы составляет 400 эВ. В режимах с дополнительным нагревом инжекцией нейтралов корпускулярная диагностика показала увеличение ионной температуры на 70 эВ. Энергетический спектр быстрых частиц, измеренных при нейтральной инжекции, указывает, что торможение быстрых ионов в плазме происходит без существенных потерь.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы и положения, выносимые на защиту.

Личный вклад А.Д. Мельника в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Диссертация А.Д. Мельника производит хорошее впечатление высоким научным уровнем, объёмом проделанной экспериментальной работы и анализом полученных результатов.

Основные достоинства работы отмечены в предыдущих разделах. Тем не менее, следует отметить некоторые недостатки в представлении материала и оформлении диссертации.

1. Замечание к содержанию автореферата. Положения, вынесенные на защиту и представленные в автореферате, сформулированы в виде описания выполненных работ и не содержат указаний на конкретный полученный результат. Оппонировать положениям с такими формулировками сложно. В то же время, необходимо отметить, что в заключении диссертации основные результаты, вынесенные на защиту, сформулированы в виде четко обоснованных выводов, подтверждающих защищаемые положения в автореферате.
2. Замечание к содержанию диссертации. Ряд экспериментальных данных (измеренные спектры быстрых частиц на токамаке ТУМАН-3М рисунки 38, 41, 42 и 48) представлен в относительных единицах, что не позволяет провести сопоставление полученных результатов с результатами измерений на других установках.
3. При определении плазменных параметров (например, ионной температуры плазмы) не везде указан диапазон погрешности, что низводит уникальные прямые измерения до уровня оценки величины. Анализ погрешности измерений повысит обоснованность достоверности полученных результатов, а также согласованность экспериментальных данных корпускулярной диагностики с аналитическими и численными расчетами.

Сделанные замечания отнюдь не снижают высокой оценки диссертационной работы в целом, которую, безусловно, следует отнести к научному труду, выполненному на высоком научном уровне.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Автореферат А.Д. Мельника соответствует содержанию диссертационной работы и требованиям, предъявляемым к его оформлению.

Заключение

Результаты, представленные в диссертационной работе, прошли серьёзную научную апробацию на 5 российских и международных конференциях по физике плазмы и УТС, по диагностике плазмы. По теме диссертации опубликовано 5 научных статей в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Диссертация А.Д. Мельника представляет собой законченное научное исследование, в котором представлены результаты исследований методами корпускулярной диагностики поведения ионного компонента плазмы в токамаках при нагреве нейтральной инжекцией.

Работа полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.08 - «Физика плазмы», установленным в п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842. Автор диссертации, Андрей Дмитриевич Мельник, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент: Кашук Юрий Анатольевич, кандидат физико-математических наук, 01.04.08 – Физика плазмы, 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

142190, Россия, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, владение 12

Электронный адрес: kasch@triniti.ru, Тел. 8 495 841 50 58

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», начальник лаборатории

(подпись)

(инициалы, фамилия)

Подпись Ю.А. Кашука заверяю

Учёный секретарь
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»
кандидат физ.-мат. наук
Электронный адрес: ezbv@triniti.ru
29 декабря 2017 г.

А.А. Ежов