

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу

Мельника Андрея Дмитриевича

"Исследование ионного компонента плазмы в токамаках при нейтральной инжекции методом корпускулярной диагностики",  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - физика плазмы

### **Актуальность темы**

Исследование особенностей поведения ионов и, в частности, надтепловых ионов представляет особый интерес в плазменных экспериментах на токамаках. Данные о функции распределения этих частиц дают, например, возможность проанализировать насколько хорошо мощность инжекционного нагрева передается плазме. Эти данные также крайне важны при анализе условий возбуждения собственных альфвеновских мод, порождаемых нагревными высокоэнергетичными ионами. Корпускулярная диагностика является одним из немногих методов, позволяющих подробно измерить функцию распределения ионов. Диссертационная работа Мельника А.Д. направлена на адаптацию и применение метода корпускулярной диагностики для условий нейтральной инжекции. Таким образом, тема диссертации, а также основные задачи, поставленные и решаемые в ней, представляются весьма актуальными.

Следует отметить, что методика исследования ионного компонента при помощи корпускулярной диагностики применяется уже достаточно давно. Более того, на ряде плазменных установок (например, MAST Великобритания, TJ-II Испания и др.) при помощи корпускулярной диагностики уже исследовалась функция распределения ионов во время нейтральной инжекции. Однако это не снижает важности и актуальности данной диссертационной работы, поскольку она также вносит весомый вклад в представление о поведении быстрых ионов. При этом важно отметить, что

эксперименты, результаты которых представлены в работе, были проведены на нескольких токамаках, отличающихся как величиной, так и конфигурацией удерживающего магнитного поля, придает данной работе дополнительную актуальность и значимость.

### **Оценка полученных результатов**

Основные результаты, полученные автором в ходе выполнения работы, сформулированы в заключительной части диссертации. Они вытекают из анализа экспериментальных результатов и теоретических расчетов представленных в диссертации.

Первый результат заключается в разработке и создании новой модификации атомных анализаторов АКОРД-24М. В главе 2 на основании данных, полученных в ходе калибровки, показано, что этот новый прибор обладает существенно улучшенными характеристиками по сравнению со стандартным прибором АКОРД-24. В конце пятой главы проведено сравнение спектров, полученных в экспериментах при помощи анализаторов АКОРД-24 и АКОРД-24М, которое демонстрирует преимущества нового прибора. Таким образом, обоснованность и достоверность этого результата не вызывает сомнения.

Второй результат заключается в том, что на трех токамаках – Глобус-М, ТУМАН-3М, COMPASS – модернизированы и введены в действие комплексы корпускулярной диагностики, позволяющие проводить исследования тепловых и надтепловых ионов плазмы. Обоснованность и достоверность этого результата подкреплена результатами измерений ионной функции распределения на всех трех токамаках, представленными в главах 3-5.

Третий результат заключается в обнаружении особенностей функции распределения быстрых ионов на токамаке Глобус-М в режиме с максимальной энергией инжекционного пучка. В главе 3 представлены измеренные автором работы спектры ионов, обладающие специфической

формой, а также результаты проведенного им подробного анализа причин, приводящих к необычному виду спектров. Основной вывод автора о том, что причинами указанных особенностей являются пилообразные колебания и дополнительный энергетический компонент в нейтральном пучке представляется достоверным и обоснованным.

Четвертый результат отражает обнаруженные особенности поведения ионного компонента в условиях нейтральной инжекции на токамаке ТУМАН-3М. Представленные экспериментальные данные (спектры быстрых частиц, температура ионов, спектры оптического излучения в области линии  $D_{\alpha}$ , а также фотоизображение свечения пучка и переходного патрубка) убедительно свидетельствуют о наличии потерь мощности нейтрального пучка. При этом также обнаружен эффект от смещения плазмы, приводящий к снижению некоторых видов потерь мощности пучка.

Пятый результат состоит в измерениях параметров ионного компонента плазмы на токамаке COMPASS. Получены значения ионной температуры в режимах с омическим и дополнительным инжекционным нагревом, получены энергетические спектры быстрых частиц. Результаты измерений не противоречат теоретическим оценкам, что говорит в пользу их достоверности, а также обоснованности результата.

Достоверность результатов работы подтверждена их успешной апробацией: обсуждением на 5 конференциях и публикацией 5 статей в рецензируемых журналах.

Несомненно, все разработки и результаты исследований, представленные автором в данной диссертационной работе, обладают новизной.

### **Значимость работы**

Научная и практическая значимость данной диссертационной работы определяется следующим.

Во-первых, создан и введен в экспериментальную практику новый анализатор потоков атомов, а также запущены диагностические комплексы для исследования ионного компонента плазмы на трех токамаках, что, безусловно, представляет собой практическую ценность – расширение диагностических возможностей этих установок.

Во-вторых, получены новые данные об ионном компоненте плазмы на трех токамаках. Особой ценностью обладают измерения ионной температуры и спектров быстрых ионов на токамаке COMPASS во время нейтральной инжекции, где это было сделано впервые. Наряду с этим, значимыми являются результаты исследования поведения ионов на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М.

### **Оценка содержания работы**

Работа изложена на 168 страницах, ее объем соответствует требованиям к диссертации на соискание степени кандидата физико-математических наук. Материал хорошо структурирован. Текст диссертации содержит введение, обзор литературы, содержательную часть и заключение. Во введении аргументируется актуальность работы, а также сформулированы положения, выносимые на защиту. Обзор литературы посвящен анализу поведения ионов при нейтральной инжекции, а также диагностических методов, позволяющих проводить исследование ионного компонента. Содержательная часть включает описание работ по созданию анализатора АКОРД-24М и сравнению его с ранней модификацией АКОРД-24, а также три главы, посвященные результатам экспериментальных исследований ионного компонента плазмы, проведенные автором на токамаках Глобус-М, ТУМАН-3М и COMPASS. В заключении сформулированы основные результаты работы. В конце работы представлен список литературы из 108 наименований.

Результаты работы соответствуют положениям, выносимым на защиту. Поставленные перед автором цели достигнуты, а задачи решены.

Диссертационную работу, несомненно, можно считать завершенным научным исследованием.

### **Замечания**

К диссертационной работе Мельника А.Д. имеются следующие замечания и вопросы:

1. В главе 2 рассматривается возможность применения анализатора АКОРД-12 для измерений распределения быстрых частиц и отмечается, что одно из его ограничений – это малое число каналов (6 водородных и 6 дейтериевых). Этот факт, в частности, послужил мотивацией для модернизации и разработки анализаторов на установках Глобус-М и COMPASS. При этом в главе 4 представлены спектры быстрых ионов, зарегистрированные при помощи АКОРД-12 на токамаке ТУМАН-3М, которые состоят более чем из 6 экспериментальных точек. По-видимому, эти спектры были получены за несколько идентичных плазменных разрядов. Можно ли аналогичным образом было обойтись двенадцатиканальными приборами для измерений быстрых ионов на токамаках Глобус-М и COMPASS?

2. Проводилось ли сравнение ионной температуры, полученной на основании данных анализаторов, с результатами с других диагностик?

3. В главе 5 автором отмечается, что в нейтральном пучке на токамаке COMPASS не было обнаружено компонента с энергией  $2/3E_{NBI}$  (в отличие от пучка на токамаке Глобус-М). В чем могут быть причины этого различия?

Сделанные замечания, а также поставленные вопросы не снижают значимости и общей положительной оценки работы.

### **Заключение**

Диссертационная работа "Исследование ионного компонента плазмы в токамаках при нейтральной инжекции методом корпускулярной диагностики" соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к

кандидатским диссертациям (п. 9 "Положений о порядке присуждения ученых степеней"), а ее автор – Мельник Андрей Дмитриевич – достоин присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент

д.ф.-м.н. с.н.с.,

Мельников А.В.

заместитель руководителя Отделения Токамаков

Блока термоядерных исследований

Курчатовского ядерно-технологического комплекса

НИЦ «Курчатовский институт»,

Адрес: 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

Телефон: 7 499 191-18-93, E-mail: Melnikov\_AV@nrcki.ru

Подпись Мельникова А.В. удостоверяю,

Главный ученый секретарь

НИЦ «Курчатовский институт», к.ф.-м.н.

Стремоухов С.Ю.