

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу

Ильясовой Маргариты Вадимовны

«ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЙТРОННОЙ И ГАММА СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ  
ИЗУЧЕНИЯ ПОВЕДЕНИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по  
специальности 1.3.9 – физика плазмы

### **Актуальность темы работы**

Удержания быстрых альфа-частиц является одной из ключевых проблем, решение которой необходимо для обеспечения поддержания режима горения в термоядерном реакторе будущего. В настоящее время основным предполагаемым сценарием работы токамака-реактора является осуществление самоподдерживающейся реакции синтеза в дейтериево-тритиевой плазме. Этот сценарий самоподдерживающегося горения может быть реализован за счет передачи энергии быстрых альфа-частиц – продуктов ядерного синтеза – основной плазме. Необходимым условием осуществления такого сценария является обеспечения режима наилучшего удержания альфа-частиц, что требует всестороннего изучения поведения быстрых ионов в плазме токамака.

Необходимо отметить, что большинство современных диагностических систем, используемых в настоящее время для исследования быстрых ионов, столкнется в плазме токамака-реактора с рядом технических ограничений. Эти ограничения вызваны прежде всего тем, что в термоядерном реакторе с горячей дейтерий-тритиевой плазмой ожидается высокий уровень нейтронного и гамма-излучения. В то же время методы диагностики, представленные в настоящей работе, как раз и основаны на анализе потоков нейтронного и гамма-излучения, испускаемых плазмой. Кроме того, они способны преодолеть большую часть технических и принципиальных ограничений, присущих другим диагностическим методам.

Поэтому актуальность представленной работы, которая посвящена развитию экспериментальной техники нейтронной и гамма спектрометрии, а также применению этой техники для изучения поведения быстрых ионов в плазме токамаков, не вызывает сомнений.

## **Научная новизна работы**

Научная новизна работы также не вызывает сомнений.

В результате выполнения диссертационной работы развиты методы спектрометрии нейтронного излучения при помощи детекторов на основе жидкого органического сцинтиллятора BC-501A. Разработаны методы цифровой обработки сигналов. Разработана оригинальная методика измерения функций отклика сцинтилляционного спектрометра на моноэнергетические нейтроны.

В экспериментах на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2 (ФТИ) с помощью нейтронных спектрометров получен ряд результатов, часть из которых является новыми для этих установок. В частности, получены данные о выходе нейтронного излучения из дейтериевой плазмы в разрядах с инъекцией пучка атомов дейтерия. На основе анализа спектров нейтронного излучения получена информация об удержании быстрых ионов.

В экспериментах на токамаке JET (Калемский центр термоядерной энергии) получены важные результаты с помощью развитых в работе алгоритмов обработки спектров гамма-излучения, рождаемого в ядерных реакциях. В частности, получены данные об энергетическом и угловом распределениях удерживаемых альфа-частиц. Получена экспериментальная оценка скорости реакции синтеза между дейтерием и ионами изотопа гелия 3 в опытах по трех-ионному радиочастотного нагреву плазмы.

## **Оценка основных результатов и выводов**

Обоснованность основных результатов и выводов подтверждается использованием адекватных экспериментальных и математических методов. Для определения рабочих параметров приборов тщательно проведены калибровочные эксперименты. Достоверность работы также подтверждается путем сравнения результатов расчетов и экспериментов, а также сравнением с результатами, полученными другими методиками.

## **Научная и практическая значимость результатов**

Созданные в ходе выполнения диссертационной работы спектрометры нейтронного излучения, а также разработанные методики измерения, обработки и анализа сигналов нашли применение в экспериментальных исследованиях характеристик плазмы на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2.

Разработанные методики изучения распределений быстрых ионов по анализу спектров гамма-излучения нашли применение в экспериментальных исследованиях плазмы на токамаке JET.

Представленные в диссертационной работе результаты могут быть использованы и в значительной степени уже используются при разработке гамма спектрометрической диагностики для строящегося термоядерного реактора ИТЭР.

### **Оценка содержания работы**

Работа изложена на 128 страницах, ее объем соответствует требованиям к диссертации на соискание степени кандидата физико-математических наук. Материал представлен структурировано. Она содержит введение, обзор литературы, а также содержательную часть и заключение. Во введении аргументируется актуальность, цель, научная новизна и практическая ценность работы, а также сформулированы положения, выносимые на защиту. В главах 1 и 2 представлен обзор литературы по теме работы. В главе 1 рассматриваются основные источники быстрых ионов в термоядерной плазме. Глава 2 содержит описание основных методов и подходов нейтронной и гамма-спектрометрии плазмы. Содержательная часть состоит из трех частей (главы 3-5). Она посвящена описанию работ по созданию и применению нейтронных спектрометрических систем на токамаках ФТИ, экспериментам по гамма-спектрометрии плазмы на токамаке JET и подготовке и проведению первых измерений энергетических и угловых зависимостей сечений гамма-переходов на циклотроне ФТИ.

Следует отметить, что результаты работы находятся в соответствии с положениями, выносимыми на защиту. Поставленные перед автором цели реализованы, а задачи решены. Диссертационную работу, несомненно, можно считать завершенным научным исследованием.

### **Замечания**

Представленная на рассмотрение работа, обладая перечисленными выше достоинствами, не свободна от недостатков. Ниже перечислен ряд замечаний и вопросов.

1) На стр. 16 раздела 1.1 при обсуждении орбитальных потерь говорится, что на удержание быстрых ионов сильное влияние оказывает величина их ларморовского радиуса. После чего в качестве средства уменьшения этих потерь предлагается использовать увеличение тока плазмы. Здесь необходимо дополнительное объяснение, т.к. увеличение тока само по себе не сильно влияет на уменьшение ларморовского радиуса, величина которого зависит, в основном, от тороидального поля.

2) На стр. 87 раздела 3.2.2 приводится оценка времени спада нейтронного потока в экспериментах по нейтральной инжекции на токамаке Глобус-М2. Возникает вопрос: почему не был сделан следующий шаг – оценка времени потерь быстрых ионов, как это было выполнено в данной работе в случае экспериментов на токамаке ТУМАН-3М?

3) На стр. 89 раздела 3.2.2 приводится рисунок, демонстрирующий корреляцию пилообразных осцилляций, измеренных с помощью рентгеновской диагностики и зарегистрированных нейтронными спектрометрами. Желательно было бы провести сравнение сигналов спектрометров с сигналами анализаторов атомов перезарядки, имеющихся на токамаке Глобус-М2, и сравнить амплитуду колебаний этих сигналов. Это значительно усилило бы данную работу, т.к. дало бы возможность более полно проанализировать механизм потерь быстрых ионов под действием этой неустойчивости.

4) На стр. 104 главы 5 говорится, что «энергетические распределения быстрых ионов могут быть получены из анализа соотношения интенсивностей гамма-линий, а также из анализа доплеровского уширения гамма-линий». Не совсем понятно, что здесь понимается под термином «получены»? Означает ли это возможность достаточно подробного восстановления энергетического распределения без каких-либо предварительных предположений о его форме? Или это подбор отдельных параметров (например, таких, как эффективная температура хвоста распределения), что требует некоторых изначальных предположений о виде распределения?

### **Заключение**

Несмотря на указанные замечания, которые не затрагивают суть, актуальность и практическую значимость выполненных исследований, работу можно оценить достаточно высоко. Она представляет значительный вклад в одно из ключевых направлений в области термоядерных исследований – физики и технике получения высоких термоядерных температур. Работа выполнена на высоком научном уровне. Достоверность научных результатов и личный вклад автора не вызывает сомнений.

Результаты исследований достаточно полно отражены в публикациях в ведущих российских и зарубежных журналах, посвященных физике плазмы, и многократно докладывались на международных и российских конференциях. Работа отличается ясным изложением материала, стройной логикой и написана на хорошем языке. Автореферат диссертации правильно отражает основное содержание работы.

По актуальности задач, новизне и практической значимости полученных результатов диссертационная работа Ильясовой М.В. удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Старший научный сотрудник  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Физико-технический институт им А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
доктор физ.-мат. наук

Ф.В. Чернышев

14.11.2022

Подпись Чернышева Федора Всеволодовича заверяю  
Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе, к.ф.-м.н.  
Патров М.И.