

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Шевелева Александра Евгеньевича

«Развитие методов гамма-спектроскопии для диагностики убегающих электронов в компактных токамаках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы

Диссертация Шевелева Александра Евгеньевича посвящена разработке методов измерений спектров гамма-излучения в высокотемпературной плазме токамака и исследованию условий формирования пучков ускоренных электронов в токамаках с различным аспектным отношением. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 158 страниц текста, включающего 6 таблиц и 72 рисунка.

Актуальность темы:

Формирование пучков ускоренных электронов с энергиями до 10-20 МэВ в высокотемпературной плазме представляет собой одну из основных проблем при развитии неустойчивости срыва в токамаке. В первую очередь это связано с возможными повреждениями внутрикамерных элементов при взаимодействии ускоренных электронов с элементами конструкции токамака. Измерение спектров гамма-излучения обеспечивает возможность восстановления энергетических спектров ускоренных электронов и позволяет повысить надежность разработки методов подавления ускоренных электронов для безопасного гашения плазменного разряда. Развитие методов гамма-спектроскопии представляет также интерес для диагностики продуктов ядерных реакций в экспериментах с высокотемпературной плазмой.

Достоверность результатов не вызывает сомнений, так как автор приводит результаты измерений в различных режимах плазменных разрядов на нескольких токамаках и сравнивает энергетические распределения ускоренных электронов, восстановленных по измеренным спектрам жесткого рентгеновского и гамма излучения, с результатами численного моделирования. В диссертации приводится подробное описание используемых диагностических систем и методик обработки данных. Калибровка детекторов проводится с использованием эталонных радиоактивных источников, а также с использованием гамма-излучения, возникающего в результате ядерных реакций при

облучении пучком альфа-частиц тестовых мишеней. Основные результаты представленной работы опубликованы в монографии и в пятнадцати реферируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты неоднократно докладывались на международных конференциях, включая конференции МАГАТЭ, и обсуждались на семинарах в ведущих международных термоядерных лабораториях.

Научная новизна диссертации заключается в развитии методик спектрометрии гамма-излучения в экспериментах на токамаках, включая, в первую очередь, диагностические системы измерения гамма-излучения при помощи детекторов со сцинтилляторами $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$. По сравнению с предыдущими экспериментами на токамаках, использование сцинтилляторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ с новыми системами сбора данных с высокой частотой дискретизации и цифровой обработкой сигналов позволило значительно повысить скорость счета в спектрометрическом режиме (до 10^7 c^{-1}). Разработанные новые цифровые методы амплитудного анализа сигналов детектора на основе специального комплекса программ значительно повышают точность измерения спектров гамма-излучения в режимах с наложением импульсов. Разработаны и протестированы программы восстановления энергетических распределений ускоренных электронов по измеренным спектрам жесткого рентгеновского и гамма излучения с учетом взаимодействия ускоренных электронов с компонентами плазмы и материалами камеры токамака, а также с учетом функции отклика детекторов и геометрии экспериментов. Разработанные диагностические методики впервые позволили исследовать характеристики пучков ускоренных электронов с повышенным энергетическим разрешением в токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М. В частности, получены новые экспериментальные данные о влиянии МГД возмущений и неустойчивости внутреннего срыва («пилообразной» активности плазмы) на формирование и удержание ускоренных электронов в разрядах с омическим нагревом плазмы в компактных токамаках (Глобус-М). Впервые в токамаке с пониженным аспектным отношением (Глобус-М) подробно исследовано развитие пучков ускоренных электронов в режимах с нижнегибридным поддержанием тока на начальной стадии разряда.

Практическая значимость работы определяется в первую очередь использованием разработанных спектрометров гамма-излучения в экспериментальных исследованиях характеристик ускоренных электронов на токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М. Результаты диссертации важны при проектировании диагностических систем гамма-излучения в установках токамак. В частности, разработанные методики цифровой

обработки и амплитудного анализа сигналов сцинтилляционных детекторов применяются в экспериментах с термоядерной плазмой на токамаках JET и ASDEX Upgrade. Разработанные системы регистрации гамма-излучения и методика восстановления энергетического распределения ускоренных электронов применяются при проектировании комплекса диагностик гамма-спектроскопии плазмы в термоядерном реакторе ИТЭР.

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения:

Во **Введении** автором обосновывается актуальность выбранной темы работы, рассматриваются цели и задачи исследований, показана научная новизна и практическая ценность работы, представлены положения, выносимые на защиту, описаны результаты обсуждения работы, приведен перечень публикаций, а также представлен личный вклад автора в решение поставленных задач.

В **первой главе** рассмотрены теоретические основы эффекта генерации убегающих электронов в высокотемпературной плазме токамаков. Приведены основные факторы, ограничивающие рост энергии электронов при их ускорении в вихревом электрическом поле. Наряду с традиционными механизмами ускорения электронов, рассматриваемыми ранее в многочисленных работах, автором проанализированы также возможные дополнительные механизмы появления ускоренных электронов в высокотемпературной плазме термоядерного реактора, связанные с радиоактивным распадом трития и ускорением электронов в результате комптоновского рассеяния гамма-квантов, испускаемых при нейтронной активации элементов конструкции токамака в режимах с DT плазмой.

Во **второй главе** рассматриваются основные типы детекторов гамма-излучения, которые могут быть задействованы в измерениях жесткого рентгеновского излучения из плазмы токамаков. Рассматриваются основные требования к детекторам и приводится сравнительный анализ характеристик полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов. На основе приведенного анализа автором делается вывод об оптимальном использовании тяжелых неорганических сцинтилляторов, включая кристаллы $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, для регистрации жесткого рентгеновского и гамма излучения, генерируемого убегающими электронами с энергией выше 100 кэВ.

В **третьей главе** приводятся результаты разработки спектрометрических систем диагностики жесткого рентгеновского и гамма излучения на токамаках в ФТИ им. А.Ф. Иоффе: ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М. Рассматриваются различные схемы систем сбора информации спектрометрических систем диагностики гамма-излучения. Приводится подробное описание методики цифровой обработки сигналов сцинтилляционных детекторов. Приводится конструкция и основные технические характеристики диагностических систем, разработанных для диагностики убегающих электронов на компактных токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М.

Четвертая глава посвящена решению проблемы восстановления энергетического распределения убегающих электронов по регистрируемому рентгеновскому и гамма излучению. Рассматриваются основные принципы моделирования процессов генерации тормозного излучения и взаимодействия его с веществом детекторов при расчете функций отклика детекторов. Описываются алгоритмы восстановления энергетических распределений ускоренных электронов. Приводятся примеры восстановленных энергетических распределений ускоренных электронов из спектров рентгеновского и гамма излучения, зарегистрированных в экспериментах на токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М.

Пятая глава посвящена анализу развития ускоренных электронов в различных плазменных режимах в токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М. Рассматриваются результаты исследований влияния магнитогидродинамической активности на удержание убегающих электронов. Приводятся результаты исследований генерации и поведения убегающих электронов в экспериментах по поддержанию тока плазмы с помощью нижнегибридных волн в токамаках ФТ-2 и Глобус-М, а также генерации и потерь убегающих электронов в разрядах с омическим нагревом плазмы в токамаке ТУМАН-3М. Рассматриваются результаты исследований предельной энергии убегающих электронов в токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2. Важным результатом исследований является впервые обнаруженное в экспериментах на токамаках увеличение максимальной энергии ускоренных электронов во время внутренних срывов на 0,13-1,45 МэВ.

В **Заключении** подводятся итоги проведенных исследований. Делаются выводы о степени успешности решения поставленных задач и достижения цели исследований.

Оценивая работу в целом можно отметить высокую степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Диссертационная работа является завершенным трудом, показывающим высокую эрудицию соискателя в решении нестандартных задач, а также в исследовании вопросов физики плазмы, требующих широкого спектра знаний и навыков.

Автореферат диссертации в полном объеме отражает содержание диссертации.

По работе можно сделать следующие замечания:

- В диссертации указано, что проведенные исследования продемонстрировали возможность использования разработанной методики диагностики убегающих электронов на токамаках различных размеров, от небольших экспериментальных установок, таких как ФТ-2 и ТУМАН-3М, до больших реакторов, таких как JET или ИТЭР. К сожалению, в работе не приводятся результаты измерений на токамаке JET с использованием указанной методики, хотя такие измерения успешно проводились при активном участии автора. Это замечание относится также и к описанию работ автора по подготовке диагностики ускоренных электронов для проекта ИТЭР, к сожалению не вошедших в данную диссертацию.

- Измерения на токамаках проводились с использованием $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ детектора с фотоэлектронными умножителями. В то же время автором указывается, что в месте планируемой установки гамма-спектрометров на сооружаемом токамаке ИТЭР величина напряженности магнитного поля составит $2,5 \div 4$ Тл. Вопросы экранировки фотоэлектронными умножителями от внешних электромагнитных полей требуют дальнейших исследований. В частности, в диссертации автором рассматривается возможность использования полупроводниковых фотоприемников, обеспечивающих измерения гамма-излучения в магнитном поле до 1,7 Тл. В дальнейшей работе желательно более подробно рассмотреть вопросы экранировки гамма-спектрометров от внешних электромагнитных полей.

- В диссертации подробно описываются результаты исследований условий генерации убегающих электронов в различных условиях экспериментов на токамаках ФТ-2, Глобус-М и ТУМАН-3М. Результаты исследований представляют несомненный интерес. К сожалению, в диссертации не приводятся результаты исследований ускоренных

электронов при развитии большого срыва плазмы, представляющих наибольший интерес при разработке систем подавления пучков ускоренных электронов в токамаках.

Данные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы и полученных в её рамках новых научных результатов.

Заключение.

Диссертационная работа А.Е. Шевелева соответствует паспорту специальности 01.04.08 Физика плазмы по физико-математическим наукам. Диссертация и автореферат А.Е. Шевелева полностью удовлетворяет требованиям пп. 9-11,13,14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 01 октября 2018 г. №1168), предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор А.Е. Шевелев заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

Саврухин Петр Всеволодович

Доктор физико-математических наук,

Ведущий научный сотрудник отдела токамаков

Курчатовский комплекс термоядерной энергетики и плазменных технологий

Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"

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

Тел. 8 499 1967808 E-mail: p.savrukhin@iterrf.ru

«13» мая 2019 г.

Подпись Саврухина Петра Всеволодовича заверяю:

Ученый секретарь НИЦ «Курчатовский институт»

П.А.Форш

« » 2019 г.