

Отзыв

официального оппонента на диссертацию

Шевелева Александра Евгеньевича

«Развитие методов гамма-спектроскопии для диагностики убегающих электронов в компактных токамаках»,

представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы

Диссертация А.Е. Шевелева посвящена развитию и практическому применению методов гамма-спектрометрии для исследования «убегающих» электронов, возникающих в плазме токамаков. Основной акцент в работе сделан на разработке и применении гамма-спектрометрических систем на токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также на создании методов анализа спектров жесткого рентгеновского излучения, генерируемого ускоренными электронами.

Актуальность диссертационной работы А.Е. Шевелева обусловлена перспективами решения задачи управляемого термоядерного синтеза. Важной вехой на пути решения этой задачи является строительство и ввод в эксплуатацию Международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР, сооружение которого происходит в настоящее время во Франции при активном участии России. Одним из необходимых условий безопасной эксплуатации токамаков является контроль над генерацией убегающих электронов. Спектрометрия гамма-излучения является одним из наиболее действенных методов диагностики ускоренных электронов, т.к. в крупных установках, таких как JET и ИТЭР, позволяет обнаружить пучок ускоренных электронов на стадии его зарождения и удержания в плазме. Регистрация и анализ гамма-излучения, вызванного быстрыми электронами, в условиях

плазменного эксперимента является технически сложной задачей, так как измерения проводят в присутствии магнитного поля токамака, а также в условиях интенсивного и нейтронного и гамма-излучения. Небольшие токамаки предоставляют возможность для отработки методик регистрации и спектроскопического анализа гамма-излучения из плазмы. Следует отметить важную роль гамма-диагностики в изучении процессов генерации и удержания убегающих электронов на действующих токамаках. Понимание физики этих процессов будет способствовать выбору оптимальных режимов эксплуатации термоядерного реактора, а также разработке способов обеспечения безопасности установки за счет ослабления развивающихся пучков «убегающих» электронов.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обусловлена созданием методик измерений с использованием спектрометров гамма-излучения, калиброванных при помощи стандартных источников, а также сравнением с результатами других диагностик. Валидация результатов диссертации выполнена сравнением экспериментальных данных полученных в измерениях, выполненных при наблюдении плазменного источник под разными углами. Моделирование транспорта гамма-излучения проведено с использованием кода MCNP, который принят референтным в проекте ИТЭР.

Научная новизна диссертации состоит в разработки методов спектрометрии гамма-излучения в условиях плазменного эксперимента, включая разработку алгоритмов амплитудного анализа сигналов сцинтилляционного детектора и алгоритмов восстановления энергетического распределения электронов по измеренным энергетическим спектрам жесткого рентгеновского излучения. Получены новые экспериментальные данные о влиянии неустойчивостей на формирование и удержание пучка «убегающих» электронов в плазме компактных токамаков, об эволюции энергетического распределения электронов в разрядах с омическим нагревом в токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М и о влиянии нижнегибридного увлечения тока на поведение «убегающих» электронов в токамаке ФТ-2.

Практическая значимость работы заключается в разработке современных спектрометров гамма-излучения и ввод их в действие в составе диагностических комплексов на токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М; использование развитых методов гамма-спектроскопии в экспериментах на токамаках JET и ASDEX Upgrade, а также в перспективе весь приобретённый опыт и наработанные методики могут быть применены на Международном экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР и других термоядерных установках нового поколения.

Диссертация Шевелева А.Е. состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Во введении обосновывается актуальность выбранной темы работы, сформулированы ее цель и задачи, определен объект исследования, показаны научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, представлены научные положения, выносимые на защиту, описаны апробация работы на семинарах и конференциях различного уровня, личный вклад автора в разработку проблемы, раскрыта структура диссертации, дана характеристика каждой главы.

В первой главе рассмотрены теоретические вопросы генерации «убегающих электронов» в плазме токамаков, а также факторы, влияющие на их энергетическое распределение.

Во второй главе рассмотрены основные типы детекторов гамма-излучения, которые могут быть задействованы в измерениях жесткого рентгеновского излучения из плазмы токамаков, проведен анализ и сравнение характеристик детекторов. Особое внимание уделяется использованию современных сцинтилляционных детекторов на основе кристалла бромида лантана. Рассмотрены приемники света, которые могут быть использованы в плазменном эксперименте в условиях наличия сильного магнитного поля.

В третьей главе приведен обзор истории разработки систем сбора и обработки информации спектрометрических систем гамма-диагностики, реализованных на компактных токамаках в ФТИ им. А.Ф. Иоффе ФТ-2,

ТУМАН-3М и Глобус-М. Большое внимание уделено решению проблемы цифровой обработки сигнала сцинтилляционных детекторов при проведении измерений в условиях высокой загрузки. Приводится конструкция и основные характеристики установок, разработанных для диагностики убегающих электронов на компактных токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

В четвертой главе описаны разработанные методы восстановления энергетического распределения убегающих электронов по регистрируемому жесткому рентгеновскому излучению с использованием моделирования процессов генерации тормозного излучения и взаимодействия его с веществом детекторов. Приводятся примеры восстановленных распределений электронов в МэВ-диапазоне из спектров жесткого рентгеновского излучения, зарегистрированных в экспериментах на токамаках.

В пятой главе описаны результаты применения методов гамма-спектроскопии в экспериментах на токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Рассматриваются результаты наблюдения влияния МГД активности на удержание убегающих электронов, приводятся результаты исследований генерации и поведения убегающих электронов в экспериментах по увеличению тока с помощью нижнегибридных волн, а также генерации и потерь убегающих электронов в разрядах с омическим нагревом плазмы в токамаке ТУМАН-3М. Рассмотрены результаты исследований предельной энергии убегающих электронов в токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2.

В заключении подводятся итоги проведенных исследований и сделаны выводы о степени успешности решения поставленных задач и достижения цели исследований.

Полученные в диссертации результаты многократно докладывались на российских и международных конференциях и симпозиумах и были опубликованы в ведущих научных журналах.

В диссертации представлен большой объем исследовательских работ, выполненных на высоком научном уровне. Она характеризуется тщательным

анализом данных и последовательностью их представления. По диссертационной работе имеются следующие замечания:

- 1) Вторая глава, в которой рассмотрены основные типы детекторов гамма-излучения, которые могут быть задействованы в измерениях жесткого рентгеновского излучения из плазмы токамаков и выполнен анализ их характеристик, представляет собой обзор современного состояния спектрометрии гамма-излучения. Поскольку в других главах диссертации ссылок на эту главу нет, то представлялось целесообразным опубликовать эту информацию в виде обзорной статьи в журнале, соответствующей направленности.
- 2) В диссертации автор повсеместно использует термин «точность», в то время как по смыслу изложения речь идет о погрешности (неопределенности) измерений и/или моделирования.
- 3) Положение №2, выносимое на защиту гласит «Разработана мульти-детекторная гамма-спектрометрическая система на токамаке ТУМАН-3М в составе двух $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и одного $\text{NaI}(\text{Tl})$ спектрометров, позволяющая проводить анализ распределений жесткого рентгеновского излучения при скорости счета квантов до 10^7с^{-1} ». Вывод о возможности достижения такого высокого быстродействия в спектрометрии гамма-излучения (см. Выводы к главе 2 на стр. 52, Выводы к главе 3 на стр. 78) основан на факте быстрого высвечивания сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$. Однако здесь не учитывается, что при такой нагрузке средний ток ФЭУ будет достигать $\sim 0,5$ мА и выше, что приведет к деградации коэффициента усиления ФЭУ и спектрометрических свойств системы (энергетическое разрешение, линейность и др.).
- 4) Замечания к оформлению диссертации – часть иллюстративного материала (рисунки и графики) представлены на английском языке. В некоторых случаях отсутствует перевод и необходимые пояснения в тексте.

В целом, несмотря на отмеченные недостатки и замечания, представленная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли достаточную апробацию в выступлениях на семинарах и конференциях, опубликованы в 16 статьях в реферируемых журналах. Автореферат и публикации по теме исследований полностью отражают основное содержание диссертации.

Заключение

Учитывая актуальность выполненных исследований, научную новизну и практическую значимость полученных результатов считаю, что представленная диссертационная работа А.Е. Шевелева полностью удовлетворяет требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор - Александр Евгеньевич Шевелев, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Официальный оппонент:

Кащук Юрий Анатольевич

кандидат физико-математических наук,

начальник отдела нейтронной и спектроскопической диагностики,

Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии
«Росатом» «Проектный центр ИТЭР»

123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1 строение 3

Телефон +7 917 512 51 35

E-mail: Y.Kashchuk@iterrf.ru

«20» мая 2019 г.

Кашук Юрий Анатольевич

Подпись Кашука Юрия Анатольевича заверяю:

Директор Частного учреждения

Государственной корпорации по атомной энергии

«Росатом» «Проектный центр ИТЭР _____ Красильников А.В.

«20» мая 2019 г.