

“УТВЕРЖДАЮ”

Заместитель директора Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт общей
физики им. А.М. Прохорова Российской
академии наук,

д.ф.-м.н. _____ В.В. Глушков

“ ___ ” мая 2019 г

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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**

Диссертационная работа Александра Евгеньевича Шевелева посвящена разработке и созданию гамма-спектрометрических систем диагностики убегающих электронов (УЭ) на токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М для изучения УЭ в этих установках, их роли в различных физических явлениях.

Целью диссертационной работы является развитие и практическое применение методов гамма-спектрометрии для исследования характеристик убегающих электронов в плазме токамаков.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, содержащего 110 ссылок. Диссертация содержит 158 страниц текста, включающего 6 таблиц и 72 рисунка.

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.

В первой главе рассмотрены теоретические вопросы генерации убегающих электронов в плазме токамаков. Приведены факторы, ограничивающие рост энергии электронов при их ускорении в вихревом электрическом поле.

Во второй главе рассматриваются основные типы детекторов гамма-излучения, которые могут быть задействованы в измерениях жесткого рентгеновского излучения из плазмы токамаков. Проводится анализ характеристик детекторов.

В третьей главе представлена история разработки систем сбора и обработки информации спектрометрических систем гамма-диагностики, реализованных на компактных токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Рассматривается проблема цифровой обработки сигнала сцинтилляционных детекторов. Приводятся конструкция и основные характеристики установок, разработанных для диагностики УЭ на компактных токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Четвертая глава посвящена решению проблемы восстановления энергетического распределения УЭ по рентгеновскому излучению, регистрируемому из камеры токамака. Рассматриваются основные принципы моделирования процессов генерации тормозного излучения и взаимодействия его с веществом детекторов при расчете функций отклика детекторов. Описываются алгоритмы восстановления распределений УЭ. Приводятся

примеры восстановленных распределений из спектров жесткого рентгеновского излучения, зарегистрированных в экспериментах на токамаках.

Пятая глава посвящена результатам применения методов гамма-спектроскопии для диагностики УЭ в компактных токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Рассматриваются результаты наблюдения влияния магнитогидродинамической активности на удержание УЭ в компактных токамаках. Приводятся результаты исследований генерации и поведения убегающих электронов в экспериментах по увеличению тока с помощью нижнегибридных волн, а также генерации и потерь УЭ в разрядах с омическим нагревом плазмы в токамаке ТУМАН-3М. Рассматриваются результаты исследований предельной энергии УЭ в токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2.

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

Актуальность диссертационной работы А.Е. Шевелева обусловлена тем, что для работы современных и проектируемых токамаков, включая экспериментальный реактор ITER, требуются индукционные токи, создаваемые продольными электрическими полями. Если эти поля достаточно велики, то наиболее энергичные электроны переходят в режим непрерывного ускорения, то есть образуются так называемые убегающие электроны. Кроме того, на стадии гашения разряда в токамаке так же индуцируются сильные продольные электрические поля, переводящие электроны в режим убегания. Таким образом, работа токамаков неизбежно сопряжена с образованием пучков убегающих электронов, обладающих большой энергией, создающих серьезные проблемы для безопасного функционирования таких установок магнитного удержания плазмы. Взаимодействие интенсивных пучков убегающих электронов с вакуумной стенкой может приводить к недопустимым тепловым нагрузкам, оплавлению и разрушению последней. Таким образом, для больших токамаков и строящегося реактора ITER актуальной является задача контроля убегающих электронов, в частности задача оценки максимальной энергии убегающих

электронов и величины тока, переносимого убегающими электронами. Эти задачи и призвана решать гамма-спектроскопия.

Наиболее значимыми научными результатами диссертационной работы А. Е. Шевелева, представляющими практический и научный интерес, являются следующие:

1. На токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе в результате разработки систем детектирования и методик обработки сигналов сцинтилляционных детекторов осуществлен переход от потоковых измерений жесткого рентгеновского излучения к непрерывной регистрации его спектров с временным разрешением $1 \div 5$ мс;
2. Разработана мульти-детекторная гамма-спектрометрическая система на токамаке ТУМАН-3М, состоящая из 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 10^7 с^{-1} ;
3. Проведено численное моделирование методом Монте-Карло спектра тормозного излучения, генерируемого убегающими электронами в токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М, а также функций отклика гамма-детекторов, используемых в измерениях спектров убегающих электронов на данных токамаках;
4. Получены результаты исследования эволюции максимальной энергии УЭ (E_{max}) в различных режимах работы токамаков. Приведены результаты анализа механизмов, ограничивающих E_{max} на токамаках ФТ-2 и ТУМАН-3М.
5. Получены результаты исследования влияния пилообразных колебаний на функцию распределения убегающих электронов. Сделан вывод о превышении E_{max} убегающих электронов в фазе срыва пилы над ее величиной в фазе роста на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М. Оценен коэффициент диффузии убегающих электронов в разрядах с пилообразными колебаниями на токамаке ТУМАН-3М.

Научная ценность работы обусловлена тем, что:

- для создания диагностических комплексов гамма спектрометрии для токамаков ФТ-2, ТУМАН-3М, Глобус-М были проанализированы основные типы детекторов гамма-излучения, которые могут быть применены при измерениях жесткого рентгеновского излучения из плазмы токамаков. Для создания спектрометров выбраны недавно разработанные кристаллы $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и CeBr_3 , которые позволяют проводить спектрометрические измерения при скорости счета детектора до 10^7 c^{-1} ;
- при создании диагностик использованы последние достижения цифровых технологий, что дало возможность использовать в системах устройства, оцифровывающие сигнал детекторов за все время разряда с высокой частотой дискретизации и записывающие осциллограмму в память персонального компьютера для последующей обработки. Применение новых устройств потребовало проведения разработок новых алгоритмов цифровой обработки сигнала и построения энергетических спектров;
- успешно решена достаточно сложная задача восстановления энергетического распределения убегающих электронов по регистрируемому рентгеновскому излучению из камеры токамака. Для этого был разработан код DeGaSum, использующий алгоритмы преобразования (деконволюции) спектров гамма-излучения. Алгоритм основан на применении метода максимально вероятной оценки с использованием ожидаемой максимизации (maximum likelihood estimation using expectation maximization, ML-EM), известного так же как метод Ричардсона-Луси. Код использует предварительно рассчитанные методом Монте-Карло функции генерации тормозного излучения, вызванного взаимодействием ускоренных электронов с компонентами плазмы или материалами камеры токамака и лимитера, а также функции отклика детектора на моноэнергетическое гамма-излучение. Моделирование производилось с помощью кода MCNP (Monte Carlo N-particle code);
- применение быстрых детекторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ позволило анализировать энергетическое распределение УЭ во время пилообразных колебаний. Проведенные измерения продемонстрировали присутствие более

высокоэнергичных электронов во вспышках жесткого рентгеновского излучения в фазах срывов «пилы» по сравнению с периодами между срывами (токамаки Глобус-М и ТУМАН-3М). Анализ энергетических распределений УЭ, полученных с помощью кода DeGaSum, позволил оценить время УЭ электронов в ТУМАНе-3М во время пилообразной активности ~ 10 мс, что соответствует среднему коэффициенту радиальной диффузии $D_{u\bar{e}} \sim 0,8$ м²/с.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

- были созданы спектрометры гамма-излучения, которые с успехом были использованы в экспериментальных исследованиях спектров убегающих электронов на токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М;
- были разработаны методики цифровой обработки и амплитудного анализа сигнала сцинтилляционных детекторов, которые применяются в экспериментах с термоядерной плазмой на токамаках JET и ASDEX Upgrade;
- были разработаны методики регистрации высокоэнергичного гамма-излучения и восстановления энергетического распределения УЭ, которые будут применены при проектировании гамма-спектрометрического комплекса для диагностики плазмы термоядерного реактора ИТЭР.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются тем, что:

- в экспериментах на токамаке Глобус-М были использованы два гамма спектрометра, а на токамаке ТУМАН-3М - использовались три спектрометра, что, несомненно, повышает достоверность полученных результатов.
- спектр УЭ получен благодаря использованию процедуры деконволюции (восстановления), для которой в частности была построена функция отклика детектора при помощи международного кода MCNP. Дополнительно эта функция отклика была экспериментально проверена при помощи источника гамма излучения, что гарантирует достоверность созданной модели отклика детектора;
- результаты исследований представлены в 15 научных статьях, которые опубликованы в рецензируемых зарубежных и отечественных журналах из

перечня ВАК, а также были доложены на многочисленных международных конференциях и российских конференциях с международным участием.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования в организациях, ведущих исследования по физике магнитного удержания высокотемпературной плазмы: НИЦ "Курчатовский институт", ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПбПУ, ТРИНИТИ, ИОФ РАН, ИПФ РАН, НИЯУ МИФИ, ИЯФ СО РАН.

Замечания к работе:

1. Замечания к оформлению работы: в печатном варианте, с которым ознакомился рецензент, присутствует нечеткое изображение рисунков: например рис. 3.8 на стр. 67, рис. 4.8 на стр. 91, рис. 5.4. а на стр. 106, рис. 5.15а, b, d, e на стр. 121, рис. 5.17 d, e на стр. 123. Кроме того рис. 4.10 слишком мелкий для иллюстрирования совпадения свертки полученных распределений электронов с функциями отклика детектора с экспериментальными точками. Все перечисленное затрудняет чтение работы. Так же в диссертации последний абзац на стр. 130 совпадает с первым абзацем на стр. 131.

2. В главе 1 в разделе 1.1.1, где обсуждается классический механизм образования убегающих электронов (стр. 19 абзац 2), сказано: «Это одна из причин, почему стационарные токамаки не могут функционировать за счет убегающих электронов: индуктивное электрическое поле, используемое для поддержания тока в омических разрядах обычно меньше, чем E_c ». Как раз наоборот, индуктивное электрическое поле в обычных разрядах современных токамаков, которое составляет величину $E = U_{\text{обх}} / 2 \pi R \sim (10^{-2} - 10^{-3}) E_D$, много больше E_c , которое в разрядах с температурой $T_e \sim 1.0$ кэВ, как следует из формулы, приведенной на этой же странице, $E_c = T_e * E_D / m_e * c^2 \sim 10^{-6} E_D$.

Указанные замечания не снижают положительной оценки диссертации Шевелева Александра Евгеньевича. Работы А.Е. Шевелева, представленные в диссертации, внесли вклад в физику магнитного удержания высокотемпературной плазмы. Представленная диссертационная работа является целостным научным трудом, вклад автора в который является

определяющим. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Достоверность полученных А.Е. Шевелевым результатов подтверждается их публикацией в ведущих рецензируемых иностранных и отечественных научных журналах, а также представленными докладами на международных и российских конференциях. Эти работы известны специалистам в данной области физики плазмы и цитируются в научных изданиях.

В целом представленная диссертантом работа оставляет хорошее впечатление, прежде всего тем, что диссертантом проделана большая работа по созданию диагностических комплексов убегающих электронов для трех токамаков. При проектировании и создании диагностик были использованы последние технические достижения в области сцинтилляционных детекторов и цифровой регистрации сигналов. Благодаря этому удалось достичь высокой скорости регистрации (до 10^7 квантов в секунду). С помощью быстродействующих АЦП сигнал детектора можно запомнить, а затем обработать и получить спектр в интересующем интервале времени. Это открывает возможность исследовать быстропеременные процессы. В диссертации представлено экспериментальное исследование пилообразных колебаний, представлены спектры убегающих электронов во время срывов и в промежутках между срывами. Приятно удивляет тщательность выполненной работы на всех этапах от проектирования и выбора элементов диагностик до отладки процедуры деконволюции и проведения экспериментов на токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

В лице А. Е. Шевелева мы, несомненно, имеем высокопрофессионального специалиста, знания и умения которого, безусловно, отвечают высоким требованиям, предъявляемым к учёным, достаиваемым степени кандидата физико-математических наук.

Оригинальные результаты диссертации, безусловно, являются достижением в области экспериментальных исследований свойств убегающих электронов в высокотемпературной плазме токамаков.

Диссертация А.И. Шевелева полностью удовлетворяет требованиям, изложенным в пунктах 9 – 11, 13 и 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 наук, а ее автор Шевелев Александр Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Отзыв составлен заведующим лабораторией ИОФ РАН, к.ф.-м.н. по специальности 01.04.08 «Физика плазмы» Мещеряковым А. И., тел.: (8)-499-503-87-77 (доб. 3-40), email: meshch@fpl.gpi.ru на основе обсуждения содержания диссертации на семинаре отдела физики плазмы ИОФ РАН, который состоялся 23 апреля 2019 г.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета отдела физики плазмы, протокол № 454 от 29 апреля 2019 г.

Заведующий лабораторией «Ливень»
отдела физики плазмы ИОФ РАН, к.ф.-м.н.

Мещеряков А.И.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН)
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38
Телефон: +7 (499) 503-8734
Факс: +7 (499) 503-8723
e-mail: office@gpi.ru
<http://www.gpi.ru/>