

## ОТЗЫВ

официального оппонента Мещерякова Алексея Ивановича, заведующего лабораторией ИОФ РАН, на диссертационную работу Сладкомедовой Алсу Данияловны «Исследование радиационных потерь плазмы сферического токамака Глобус-М», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Одним из наиболее перспективных источников энергии в настоящее время является реакция синтеза легких ядер. Исследования в области термоядерного синтеза необходимы для решения ряда проблем, стоящих на пути создания термоядерного реактора на основе магнитной ловушки. Радиационные потери плазмы уменьшают энергосодержание плазмы, поэтому они важны при оценке транспортных характеристик плазмы. Режим работы будущего термоядерного реактора ITER предусматривает большие радиационные потери плазмы. Это необходимо для снижения потока тепла на диверторные пластины токамака. Рассматриваемая в работе тема исследований также важна и для создания гибридных ядерных реакторов, в которых установка с магнитным удержанием представляет собой источник нейтронов.

Поэтому исследования, связанные с измерением и изучением радиационных потерь, безусловно, являются **актуальными**.

**К основным результатам работы** относятся:

1. Разработана диагностика мощности излучения плазмы на основе многоканальных систем детекторов и одиночных фотодиодов на токамаке Глобус-М.
2. Создан численный код для реконструкции двумерного профиля радиационных потерь плазмы из единицы объема в полоидальном сечении токамака на основе хордовых измерений.
3. Реконструирован двумерный профиль радиационных потерь плазмы в полоидальном сечении токамака Глобус-М.
4. Получены зависимости радиационных потерь плазмы токамака Глобус-М от тока плазмы, тороидального магнитного поля, плотности плазмы, расстояния между внешней границей плазмы и стенкой токамака.

**Новизна результатов** заключается в разработке оригинальной диагностической системы радиационных потерь плазмы на основе кремниевых полупроводниковых фотодиодов SPD, разработанных в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН.

Кроме того, на основании полученных с помощью данной диагностики значений мощности излучения плазмы было получено экспериментальное двумерное распределение радиационных потерь плазмы в полоидальном сечении токамака Глобус-М, что является новым результатом для сферических токамаков.

В работе получены зависимости радиационных потерь от параметров плазмы, таких как электронная плотность, плазменный ток, тороидальное магнитное поле, расстояние между плазмой и стенкой, в различных режимах нагрева плазмы и при различном изотопном составе плазмы.

Безусловно, к новым результатам также можно отнести визуализацию проникновения быстрой плазменной струи в плазму токамака Глобус-М с помощью разработанной автором диагностики. Получено хорошее согласие между теоретическими оценками времен замедления инжектированной струи и экспериментально измеренными величинами. Показано, что наибольший вклад в замедление струи в плазме токамака вносила альфвеновская проводимость.

Диссертационная работа обладает высокой **степенью достоверности**. Полученные результаты находятся в соответствии с результатами измерений радиационных потерь на других сферических токамаках в схожих режимах. Большая часть результатов опубликована в рецензируемых научных журналах, а также доложена на российских и международных конференциях.

**Научная значимость** результатов заключается в получении зависимости мощности излучения плазмы в различных спектральных диапазонах от плотности плазмы при использовании различных методов нагрева (омического нагрева и омического нагрева с дополнительной инжекцией атомарного пучка высокой энергии). Полученные зависимости радиационных потерь от тока плазмы, тороидального магнитного поля могут быть использованы для прогнозирования параметров плазмы в установках с увеличенным тороидальным магнитным полем и, соответственно, током плазмы.

Оснащение экспериментальной установки диагностикой радиационных потерь представляет собой, несомненно, **практически значимый** результат работы. Разработанный алгоритм реконструкции для восстановления профиля неизвестной величины по хордовым измерениям может быть в дальнейшем использован на других установках с магнитным удержанием с учетом другой геометрии измерения. Практический интерес для контроля уровня загрязнения плазмы токамака представляют результаты измерения эволюции потерь на излучение плазмы в условиях деградации боро-углеродного покрытия вакуумной стенки установки, а также зависимости радиационных потерь от расстояния между плазмой и стенкой вакуумной камеры установки.

Можно отметить следующие **замечания** к диссертационной работе:

1. На стр.43 (2-ой абзац) представлено описание принципа работы пироэлектрического детектора. Здесь приведено ошибочное утверждение: «Таким образом, пироэлектрический детектор измеряет производную от мощности излучения». На самом деле, сигнал

пироэлектрического детектора пропорционален производной от температуры, как видно из приведенной здесь же правильной формулы (2.14), то есть детектор измеряет падающую на него мощность излучения, а не ее производную.

2. На стр.99 (последний абзац) написано: «Как видно из рисунка 4.3.а, по мере увеличения электронной плотности наблюдался линейный рост радиационных потерь. Это отражает линейную зависимость мощности линейчатого излучения от электронной плотности в соответствии с формулой (2.12).». Формула (2.12) относится к суммарной мощности потерь за счет всех трех механизмов излучения: тормозного, рекомбинационного и линейчатого. Если посмотреть на формулу (2.11) для мощности линейчатого излучения, то, становится, очевидным, что прежде, чем делать выводы о соответствии экспериментальной зависимости и зависимости линейчатого излучения от плотности, необходимо дополнительно учесть зависимость концентрации ионов примесей и электронной температуры от плотности плазмы. Поэтому без такого дополнительного рассмотрения вывод о том, что линейчатое излучение отражает наблюдаемую в эксперименте линейную зависимость мощности радиационных потерь от плотности, является необоснованным.

3. На стр. 107 написано: «Для средних по большому радиусу значений электронной температуры плазмы 200–800 эВ, соответствующих рассмотренным разрядам, определяющим механизмом излучения является линейчатое излучение легких примесей [24].». Вывод работы [24] используется для обоснования утверждения о том, что в спектральном диапазоне “С” (10,9–330 эВ) основной вклад в мощность потерь вносит излучение линий углерода. Если автор доверяет выводам работы [24], то приведенные здесь же оценки величины тормозного излучения в диапазонах “А”, “В”, “С” и “D” не нужны. А если не доверяет, то нужно было бы оценить и рекомбинационное излучение, которое может в разы превышать тормозное. Поэтому утверждение о том, что в спектральном диапазоне “С” (10,9–330 эВ) основной вклад в мощность потерь вносит излучение линий углерода, представляется не обоснованным в данной работе. В то же время, у автора есть возможность обосновать это утверждение на основании оценок содержания примеси углерода в плазме токамака Глобус-М, полученных в разделе 4.3 при моделировании процессов переноса. Для этого следовало бы вычислить мощности тормозного, рекомбинационного и линейчатого излучений плазмы при наличии 8% примеси углерода. При наличии таких расчетов работа выглядела бы более выигрышной.

Несмотря на приведенные замечания, данная работа выполнена на высоком научном уровне. Результаты, полученные в работе, отличаются актуальностью, научной новизной и практической значимостью. Содержание автореферата достаточно полно раскрывает содержание диссертационной работы.

Представленная диссертация удовлетворяет требованиям к диссертациям, указанным в Положении о присуждении ученых степеней, а ее автор – Сладкомедова А.Д. – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской Академии наук (ИОФ РАН)

Россия 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38.

Телефон: 7(499)135-8019, E-mail: [meshch@fpl.gpi.ru](mailto:meshch@fpl.gpi.ru)

Мещеряков Алексей Иванович

\_\_\_\_\_ 2018 г.

Подпись Мещерякова Алексея Ивановича ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь ИОФ РАН

Андреев С.Н.