

## ОТЗЫВ

официального оппонента Овсянникова Дмитрия Александровича 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

**Актуальность темы** диссертации обусловлена необходимостью создания эффективных и экологически чистых источников энергии. Изучение процессов, протекающих в термоядерной плазме токамака, является необходимым для прогнозирования параметров и создания будущих реакторов на основе магнитной ловушки для выработки энергии. Для обеспечения экономически эффективной работы реактора на основе управляемого термоядерного синтеза необходимо, чтобы выделяемая мощность превосходила вложенную в  $\geq 10$  раз. Поэтому важным является контроль потерь энергии из плазмы, в частности потерь на электромагнитное излучение – радиационных потерь плазмы. Существенную роль радиационные потери плазмы играют в проблеме уменьшения тепловых нагрузок на дивертор магнитной ловушки. Снижения тепловых нагрузок можно добиться напуском примесных газов для преобразования энергии плазмы в электромагнитное излучение. Исследование потерь на электромагнитное излучение в плазме с собственной примесью является актуальным, поскольку эти потери являются неизбежными в плазме токамака.

Диссертационная работа Сладкомедовой А.Д. посвящена главным образом исследованию поведения радиационных потерь плазмы токамака Глобус-М в зависимости от различных параметров плазмы. Диссертация состоит из четырех глав.

В первой главе обсуждается влияние радиационных потерь плазмы на параметры плазмы магнитной ловушки, описывающие удержание энергии. Приводятся теоретические основы процессов переноса частиц и тепла.

Вторая глава посвящена теоретическому обзору моделей для описания ионизационного равновесия плазмы и используемых для расчета радиационных потерь плазмы. Дан обзор методам экспериментального исследования мощности излучения плазмы.

Третья глава посвящена методам исследования, использованным в работе. Важным результатом работы, описанным в данной главе, является создание диагностики для измерения радиационных потерь плазмы в 280 каналах, а также диагностики мощности излучения плазмы на основе одноканальных детекторов, позволяющих измерять излучение плазмы в различных спектральных диапазонах. Рассмотрены теоретические основы транспортных кодов, использованных для моделирования переноса частиц и тепла основной плазмы и примеси токамака Глобус-М, – АСТРА и STRANL. В третьей главе обсуждаются теоретические принципы томографии и методы численного решения обратной задачи. В работе отмечены основные принципы, использованные в работе для реконструкции профиля мощности излучения в полоидальном сечении токамака. Важным результатом, описанным в главе, является разработанный автором алгоритм реконструкции радиационных потерь плазмы, основанный на использовании метода регуляризации Тихонова и анизотропного ограничивающего функционала. Проиллюстрирован метод невязки для определения оптимального параметра

регуляризации. Корректность и работоспособность разработанного автором алгоритма подтверждается результатами его тестирования на модельных профилях.

В четвертой главе работы приведены результаты работы по экспериментальному исследованию радиационных потерь от электронной плотности, метода нагрева, изотопного состава, тока и тороидального магнитного поля плазмы, зазора между плазмой и стенкой. Обсуждается влияние боронизации на мощность излучения плазмы. Рассмотрены результаты проведенного моделирования переноса основной плазмы, потока тепла и переноса углерода. Приведены результаты исследования деградации фотодиодов и изучения проникновения плазменной струи в плазму токамака с помощью быстрой матрицы фотодиодов.

Среди **новых и наиболее важных результатов** работы стоит отметить разработанную диагностику радиационных потерь на основе кремниевых полупроводниковых фотодиодов, которая позволила измерить мощность излучения плазмы в различных спектральных диапазонах на токамаке Глобус-М. Значительным достоинством работы является разработка алгоритма реконструкции мощности излучения плазмы для условий наблюдения детекторов в тангенциальном к плазменному шнуру направлении. Автором впервые на сферических токамаках получено экспериментальное двумерное распределение радиационных потерь в полоидальном сечении токамака. В экспериментах по формированию профиля плотности плазмы токамака с помощью инжекции плазменной струи была определена радиальная скорость распространения плазменной струи в плазме токамака.

Полученные результаты обладают высокой **практической значимостью** – диагностический комплекс радиационных потерь может быть использован на установке следующего поколения – Глобусе-М2. Разработанный алгоритм томографической реконструкции неизвестной величины может быть адаптирован для других токамаков и использован для восстановления двумерного профиля в приближении тороидальной симметрии. Полученные зависимости радиационных потерь позволяют контролировать уровень примесей в плазме и предсказывать потери на излучение в различных режимах работы токамака. **Научная значимость** работы, безусловно, высокая. Полученные в работе зависимости радиационных потерь позволили расширить знания о радиационных потерях плазмы в сферических токамаках.

**Степень достоверности** полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений. Результаты работы были доложены на отечественных и зарубежных конференциях и опубликованы в реферируемых изданиях.

#### **Замечания и вопросы**

1. Согласно рисунку 3.17 и как отмечено в тексте работы, наибольшие ошибки восстановления профиля излучения с помощью развитого в работе алгоритма характерны для периферии плазмы. При этом автор не приводит оценки ошибок восстановленного профиля для случая профиля из кода B2SOLPS. На экспериментальном профиле радиационных на рисунке 4.15 приведены

- одинаковые по величине ошибки величин в центре плазмы и на периферии. Откуда взялись эти ошибки и почему они отличаются от ошибок для модельного случая?
2. Не очевиден выбор метода для решения обратной задачи. Из текста диссертации не ясно, почему не был использован в работе, например, описанный принцип максимума энтропии.

### **Общая характеристика диссертационной работы**

Несмотря на перечисленные замечания и недостатки, представленная диссертационная работа представляет собой законченную квалифицированную работу. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации. Диссертация удовлетворяет всем требованиям к диссертациям, указанным в постановлении Правительства Российской Федерации «О порядке присуждения ученых степеней». Считаю, что автор диссертации – Сладкомедова А. Д. – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой Теории и систем управления электрофизической аппаратурой, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ)

Россия, 198504 Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский просп., 35.

Телефон: (812) 428-47-29, E-mail: d.a.ovsyannikov@spbu.ru

Овсянников Дмитрий Александрович

\_\_\_\_\_ 2018

Подпись Овсянникова Дмитрия Александровича заверяю  
Декан Факультета Прикладной математики –  
Процессов управления СПбГУ, профессор

Л.А. Петросян