

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу И.А. Шарова
"Формирование облака вблизи испаряющейся макрочастицы в плазме
гелиотрона LHD", представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук
по специальности 01.04.08 - «Физика плазмы»

Удержание высокотемпературной дейтерий-третиевой плазмы с помощью магнитного поля в будущих термоядерных установках требует развития продвинутых методов контроля удерживаемой плазмы, а также способов управления её параметрами. Технология инжекции макрочастиц открывает широкие возможности для решения этих задач. Инжекцию макрочастиц из замороженной смеси дейтерия и трития планируется использовать в будущих реакторных установках ITER и DEMO в качестве основного метода для поддержания необходимой концентрации топливной смеси, а также для снижения тепловой нагрузки на обращенные к плазме компоненты, связанной с периферийными локализованными модами. Инжекция макрочастиц с успехом применяется на гелиотроне LHD и других установках для изучения переноса примеси. Перезарядившиеся на облаке испарившегося вещества вблизи макрочастицы ионы основной компоненты плазмы и термоядерные альфа-частицы могут регистрироваться анализатором нейтральных частиц, что позволяет измерять важнейшие параметры удерживаемой термоядерной плазмы – функции распределения по энергиям ионов основной компоненты и альфа-частиц.

Однако, для применения столь перспективных методов диагностики и управления параметрами плазмы необходимы подробные знания о распределении концентрации и температуры электронов, а также ионизационном состоянии в облаке испарившегося вещества вблизи испаряющейся макрочастицы. В существующих экспериментальных исследованиях сообщаются лишь усреднённые значения этих параметров.

Теоретические же расчёты нуждаются в широкой экспериментальной проверке. Поэтому тема диссертационной работы И.А. Шарова входит в число **актуальных** научных проблем управляемого термоядерного синтеза.

Диссертационная работа состоит из четырех глав. В первой главе приводится аналитический обзор литературы, сообщается современное представление о взаимодействии высокотемпературной плазмы с твёрдой макрочастицей, а также описываются существующие методы измерения параметров облаков испарившегося вещества.

Во второй главе описано экспериментальное оборудование, в том числе оригинальный изображающий полихроматор, а также описывается методика обработки полученных данных.

Третья глава посвящена методам определения пространственных распределений концентрации и температуры в облаке испарившегося вещества. Концентрация электронов измеряется по Штарковскому уширению линии H_{β} . Температура электронов определяется двумя способами: по отношению интенсивностей испускания линии и непрерывного спектра, и методом подбора с минимизацией невязки расчётного и экспериментально измеренного коэффициентов испускания линии H_{β} . Также обсуждаются границы применимости указанных методов. Указывается на возможное нарушение локального термодинамического равновесия в центральной части облака.

В четвертой главе анализируется совокупность полученных экспериментальных данных. Выводятся законы подобия для зависимостей характерных параметров пеллетных облаков от параметров фоновой плазмы. Описывается алгоритм предсказания распределений концентрации и температуры электронов в облаке вблизи макрочастицы по известным параметрам инжекции и фоновой плазмы. Также продемонстрировано, что вклады плазменной и нейтральной части облака в экранирование потока тепла, приносимого электронами фоновой плазмы на поверхность макрочастицы, сопоставимы.

Для анализа поведения макрочастиц в плазме использовались апробированные ранее спектроскопические и микроволновые методы диагностики и теоретические модели, что обеспечивает **достоверность** полученных результатов.

Оценивая диссертацию в целом, можно выделить следующие наиболее важные и интересные результаты:

1. Разработана методика измерения пространственных распределений концентрации и температуры электронов в углеводородных пеллетных облаках. Создано оригинальное устройство для проведения таких измерений.

2. Распределения концентрации и температуры электронов измерены в облаках вблизи полистироловых макрочастиц, испаряющихся в плазме гелиотрона LHD. Эти распределения измерены с лучшим пространственным разрешением, чем во всех существующих экспериментальных исследованиях.

3. Экспериментально продемонстрирован сопоставимый вклад нейтрального и плазменного экранирования в ослабление потока тепла из фоновой плазмы на поверхность макрочастицы.

Полученные результаты и разработанные методики спектроскопических измерений обладают высокой **практической значимостью** и могут найти применение на существующих, строящихся и проектируемых установках для магнитного удержания плазмы: Asdex Upgrade, LHD, Wendelstein 7-X, T-15МД, ДЕМО-ТИН, ITER и других.

По работе могут быть сделаны следующие замечания.

1. Остается невыясненным до конца вопрос применимости такой методики для водородных и дейтериевых пеллетных облаков, поскольку инжекция макрочастиц из таких материалов гораздо шире распространена на существующих установках по удержанию плазмы.

2. Было бы желательным, проведение аналогичных измерений и оценок вкладов нейтральной и плазменной экранировки для случая водородных/дейтериевых макрочастиц представляющих не меньшую научную и практическую значимость.

Приведенные замечания не являются принципиальными возражениями по сути выполненной работы.

По **научной и практической** значимости работа удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по **специальности 01.04.08 физика плазмы.**

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Доктор физико-математических наук, профессор
начальник лаборатории Теории излучения
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

В.С. Лисица
22 апреля 2019 г.

Адрес: 123182, г.Москва, пл. Академика Курчатова, 1
Эл. почта: Lisitsa_VS@nrcki.ru, тел.: +7 (499)-196-73-34

Подпись Лисицы Валерия Степановича заверяю

Главный учёный секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»

П.А. Форш