

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Шарова Игоря Александровича «Формирование облака вблизи испаряющейся макрочастицы в плазме гелиотрона LHD», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы

Диссертация посвящена исследованию физических процессов, происходящих при взаимодействии твёрдой макрочастицы и высокотемпературной плазмы. Эта тема является весьма **актуальной** в настоящее время в связи с развитием работ по созданию термоядерного реактора, а также термоядерного источника нейтронов с использованием магнитного удержания плазмы. Недавно запущен крупнейший на сегодняшний день стелларатор Wendelstein 7-X, В 2025 году планируется запуск Международного Термоядерного Экспериментального Реактора (ИТЭР), ведется проектирование Т-15МД и ДЕМО-ТИН. Однако существует ряд проблем на пути построения таких установок, которые требуют дополнительного изучения. Инжекция макрочастиц позволяет осуществлять доставку вещества поперек магнитного поля вглубь плазмы. Она может быть использована для доставки топливной смеси. Возможен также ряд диагностических применений, например, для исследования переноса примеси. Образующееся в процессе испарения облако частично ионизованной плазмы вблизи испаряющейся макрочастицы является мишенью для перезарядки как ионов основной компоненты, так и термоядерных альфа частиц. Перезарядившиеся частицы, покидая установку, несут информацию о важнейшем параметре – функции распределения по энергии, которая может быть получена с помощью анализатора нейтральных частиц (NPA). Основанная на этом принципе диагностика называется Pellet Charge eXchange (PCX). Для эффективной реализации вышеперечисленных приложений необходимы сведения о структуре облаков, образующихся вблизи испаряющихся макрочастиц. Имеющихся на данный момент экспериментальных и теоретических сведений о распределениях

концентрации и температуры электронов, а также об ионизационном составе таких облаков совершенно недостаточно. Именно этому вопросу посвящена данная диссертационная работа. Конкретно в ней изучены физические процессы в углеводородных облаках вблизи полистироловых макрочастиц, испаряющихся в гелиотроне LHD.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Первая глава посвящена физике взаимодействия твёрдых макрочастиц и высокотемпературной плазмы. В ней дается обзор современных теоретических представлений о процессе испарения макрочастиц в плазме, а также приводится описание существующих экспериментов по измерению параметров облаков испарившегося вещества. Проводится анализ результатов и на их основе ставятся задачи данной работы.

Во второй главе описываются параметры технических устройств, используемых в исследовании. Особо необходимо упомянуть оригинальное устройство для проведения пространственно-разрешённых спектроскопических измерений, разработанное и примененное в эксперименте автором.

Третья глава посвящена определению физических параметров углеводородных облаков с использованием полученных спектроскопических данных. Концентрация электронов определяется по Штарковскому уширению спектральной линии водорода. Температура определяется по отношению суммарного коэффициента испускания линии водорода H_{β} и непрерывного спектра в её окрестности к коэффициенту испускания в непрерывном спектре, измеренном на участке без линейчатого спектра. Продемонстрировано, что в центральной части облака может отсутствовать локальное термодинамическое равновесие. Предложен метод подбора одномерного температурного распределения для минимизации невязки модельного и измеренного распределений коэффициента испускания суммарного коэффициента испускания линии водорода H_{β} и непрерывного спектра.

В четвертой главе приводятся результаты измерения параметров пеллетных облаков в разрядах LHD с различной концентрацией и температурой электронов, а также на различных этапах испарения. Показано, что размер облака определяется удельной энергией, приносимой электронами фоновой плазмы на одну испаренную с поверхности частицу. На основе ряда эмпирических законов подобия предложен алгоритм предсказания распределений концентрации и температуры электронов в облаке по заданным параметрам инжекции и фоновой плазмы. Также продемонстрирован сопоставимый вклад нейтральной и ионизованной части облака в ослабление потока тепла из фоновой плазмы.

Научная новизна определяется тем, что диссертантом были впервые одновременно измерены с пространственным разрешением концентрация и температура электронов в углеводородном облаке вблизи испаряющейся в высокотемпературной плазме полистироловой макрочастицы. Измерения проведены в широком диапазоне концентраций и температур электронов фоновой плазмы. Путем регрессионного анализа установлен ряд эмпирических зависимостей параметров облака от параметров фоновой плазмы, которые позволяют объяснить не только результаты проведенных диссертантом наблюдений, но и результаты упомянутых в обзоре литературы экспериментов. Впервые на основе экспериментальных измерений продемонстрирован сопоставимый вклад нейтральной и плазменной части облака в ослабление переносимого электронами горячей плазмы теплового потока на поверхность макрочастицы.

Полученные результаты хорошо **обоснованы**, так как получены в нескольких сериях экспериментов, что определило воспроизводимость эффектов, а также благодаря использованию результатов обширного и оттестированного диагностического комплекса установки LHD.

Достоверность результатов определяется применением современных методов диагностики и моделирования, широким обсуждением результатов на различных конференциях и в реферируемых публикациях, а также

сопоставлением с результатами схожих экспериментов в России и за рубежом.

Практическая ценность состоит в том, что предложенная методика измерений концентрации и температуры электронов может быть использована для исследований параметров облаков вблизи испаряющихся макрочастиц из других водородосодержащих материалов. Созданный метод предсказания распределений концентрации и температуры электронов в облаке по известным параметрам инжекции и фоновой плазмы, а также рассчитанное с помощью столкновительно-излучательной модели распределение водорода и углерода по ионизационным состояниям могут быть использованы для уточнённой интерпретации данных РСХ диагностики, работающей на гелиотроне LHD и предназначенной для изучения высокоэнергетичной части функции распределения ионов. Кроме того, полученные данные и созданные методики измерения позволят существенно продвинуть применение РСХ диагностики на других установках, в том числе проектируемых. Поскольку подтверждён сопоставимый вклад нейтральной и плазменной части облака в экранирование поверхности макрочастицы от теплового потока электронов из плазмы, при оценках глубины проникновения макрочастиц в плазму необходимо использовать модели, учитывающих вклад плазменного экранирования.

Следует также отметить несколько недостатков:

1. Определение температуры электронов в облаке в работе производилось в предположении выполнения модели локального термодинамического равновесия. Вместе с тем, как указывает автор, в центральной части облака, где температура электронов не превышает 1.5 эВ, существенную роль могут играть процессы, связанные с быстрыми электронами, проникающими в облако из высокотемпературной плазмы. Поэтому не вполне обоснованным выглядит сообщаемое значение $T_{cd} \approx 0.8$ эВ вблизи поверхности макрочастицы.

2. В работе не приведена численная оценка возможного смещения облака поперек линии наблюдения за время экспозиции полихроматора из-за движения макрочастицы вдоль траектории. Кроме того, в параграфе 2.3.3 упоминается незначительная асимметрия изображений облака в направлении поперек магнитного поля. В связи с этим возникает вопрос: не может ли эта асимметрия быть следствием перемещения облака?

Приведенные недостатки не являются принципиальными и не умаляют значимость и объем проделанной работы.

Тематика диссертации соответствует специальности 01.04.08 – Физика плазмы. Основные положения и выводы широко представлены в докладах на конференциях и опубликованы в изданиях, входящих в «перечень ВАК».

Автореферат соискателя в полной степени отражает положения, выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертации.

Считаю, что диссертационное исследование Шарова Игоря Александровича «Формирование облака вблизи испаряющейся макрочастицы в плазме гелиотрона LHD» выполнено на высоком уровне, соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

К.ф.м.н,

доцент кафедры оптики
физического факультета СПбГУ

Пастор Александр Александрович

199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

тел. (812) 428-44-53, e-mail pastor273@gmail.com

Подпись Пастора Александра Александровича заверяю: