

На правах рукописи

Шаров Игорь Александрович

**ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛАКА ВБЛИЗИ ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ
МАКРОЧАСТИЦЫ В ПЛАЗМЕ ГЕЛИОТРОНА LHD**

Специальность 01.04.08 – Физика плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО СПбПУ)

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры «Физика плазмы»
ФГАОУ ВО СПбПУ

Сергеев Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
начальник лаборатории НИЦ
«Курчатовский институт»

Лисица Валерий Степанович

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры оптики СПбГУ

Пастор Александр Александрович

Ведущая организация:

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт общей физики им. А.М.
Прохорова Российской академии наук

Защита состоится «__» июня 2019 г. в __:__ на заседании диссертационного совета Д002.205.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук и на сайте www.ioffe.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Красильщиков А.М.

Д 002.205.03, к. ф.-м. н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Диссертация посвящена проблеме испарения примесных и топливных макрочастиц (пеллетов) в высокотемпературной плазме, удерживаемой магнитным полем. Экспериментальная часть работы выполнена на гелиотроне “Large Helical Device” (LHD) [1].

Преодоление энергетической проблемы человечества путем создания энергетического термоядерного реактора и термоядерного источника нейтронов требует решения ряда физических и инженерных задач [2]. Инжекция твердых макрочастиц позволяет осуществлять доставку вещества внутрь магнитной конфигурации, удерживающей нагретую до термоядерных температур плазму. Технологии инъекции макрочастиц могут быть использованы для решения важных задач управляемого термоядерного синтеза. К ним относятся: управление составом топливной D-T смеси, смягчение влияния периферийных локализованных мод (ELM) на обращенные к плазме поверхности и создание на них защитного покрытия, контролируемое и аварийное гашение разряда, мониторинг параметров плазмы. Реализация перечисленных выше приложений требует детальных знаний о процессах, происходящих при взаимодействии макрочастиц с высокотемпературной плазмой.

Картина взаимодействия макрочастицы с плазмой выглядит следующим образом. Поток энергии из горячей плазмы, приносимый преимущественно электронами в силу их значительно большей тепловой скорости, нагревает поверхность макрочастицы до температуры интенсивного испарения. Вблизи поверхности испарившееся вещество образует нейтральное облако. По мере удаления от поверхности макрочастицы нейтральный газ ионизуется, и продолжает разлёт вдоль магнитного поля, формируя плазменное облако. Электроны из окружающей плазмы теряют в облаке энергию, что приводит к снижению интенсивности испарения. Процесс испарения и формирования

облака испарившегося вещества, благодаря эффекту экранирования тепловых потоков на поверхность макрочастицы, носит самосогласованный характер. В настоящее время обсуждается целый ряд различных механизмов экранирования: нейтральное, плазменное, электростатическое, магнитное и их комбинации (см. обзор [4]).

Знания о параметрах пеллетного облака необходимы для выяснения роли различных механизмов экранирования, что важно также для проверки и уточнения существующих моделей испарения. Это необходимо для предсказания глубины проникновения макрочастиц в плазму, которая определяет эффективность подпитки разряда топливом, а также доступную пространственную область диагностических приложений. Кроме того, знание пространственных распределений концентрации и температуры электронов, а также концентраций каждого ионизационного состояния атомов испарившегося вещества необходимы для диагностических применений пеллет-инжекции [3,5].

В данной работе, с помощью новой методики и специально разработанного спектроскопического оборудования проведено экспериментальное исследование облаков вблизи полистироловых макрочастиц, испаряющихся в плазме установки LHD.

Цель и задачи исследования

Целью работы было исследование физических процессов при формировании облака испаряющейся макрочастицы в замагниченной плазме установок с магнитным удержанием. В ходе работы решались следующие задачи:

1. Разработка методики и создание аппаратуры для измерения пространственных распределений температуры и концентрации электронов в пеллетном облаке.
2. Экспериментальные исследования облаков вторичной плазмы вблизи полистироловых макрочастиц, испаряющихся в высокотемпературной плазме гелиотрона LHD в разрядах с различными параметрами плазмы и макрочастицы.

3. Создание моделей для описания наблюдаемых процессов и явлений при взаимодействии полистироловой макрочастицы с плазмой.

Методология и методы исследования

Исследование структуры пеллетных облаков проводилось методом изображающей спектроскопии [A2]. Распределения концентрации и температуры измерялись косвенно. Непосредственно в эксперименте регистрировались изображения пеллетных облаков в девяти узких спектральных интервалах [A1]. Посредством деконволюции по методу Пирса [A4], учитывая осевую симметрию и предполагая прозрачность пеллетных облаков в используемых спектральных интервалах [A3], восстанавливались локальные значения коэффициентов испускания. Локальные значения концентрации электронов вычислялись посредством её варьирования для минимизации невязки между нормированным расчётным профилем линии H_{β} [7] и измеренным профилем, состоящим из локальных значений коэффициентов испускания в семи узких спектральных интервалах. Значения температуры были получены двумя методами: по отношению коэффициентов испускания линии и непрерывного спектра, а также по распределению коэффициента испускания линии H_{β} [A5].

Экспериментальные данные о пространственном распределении коэффициента испускания в окрестности линии H_{β} , а именно в спектральном интервале 486.5 ± 5.0 нм сопоставлялись с результатами численного моделирования на основе столкновительно-излучательной модели в предположении одномерного разлёта плазменного пеллетного облака.

Методы регрессионного анализа применены для выявления зависимости структуры пеллетных облаков от параметров разряда и скорости испарения и текущего радиуса макрочастицы.

Научная новизна и научно-практическое значение результатов работы

Впервые разработана методика одновременного измерения пространственных распределений концентрации и температуры электронов в пеллетном облаке. Для этого создан оригинальный девятиканальный

изображающий полихроматор. Впервые одновременно получены изображения светящихся облаков, в спектральных интервалах линий водорода и углерода, а также непрерывного спектра. Создана численная модель для расчёта пространственного распределения коэффициента испускания в углеводородном пеллетном облаке вблизи линии H_{β} .

Полученные данные о параметрах пеллетных облаков использовались для уточнения результатов диагностики нейтралов перезарядки на пеллетном облаке (PCX) на гелиотроне LHD [8]. Они также могут быть использованы для её реализации на других установках, в том числе реакторного масштаба с альфа-частицами. Экспериментальные результаты использованы для оценки относительной роли механизмов нейтрального и плазменного экранирования при испарении полистироловых макрочастиц в LHD. Они также могут быть полезны для уточнения моделей испарения макрочастиц при планировании экспериментов на установках с магнитным удержанием плазмы.

Достоверность научных результатов

Полученные в ходе работы результаты экспериментально обоснованы. Их достоверность обеспечена многократным повторением измерений, а также сопоставлением с результатами, полученными независимыми методами. Они не противоречат результатам измерений и моделирования, полученным ранее другими авторами и на других установках. Описываемые в работе результаты опубликованы в реферируемых журналах, а также доложены на международных конференциях и на семинарах и совещаниях кафедры физики плазмы ИФНиТ СПбПУ и Национального Института Термоядерных Исследований (Токи, Япония).

Положения, выносимые на защиту

1. Методика спектроскопических измерений пространственных распределений электронной концентрации и температуры в облаках вторичной холодной плазмы вблизи водородосодержащих макрочастиц, испаряющихся в высокотемпературной плазме установок с магнитным удержанием.

2. Разработка оригинального устройства для спектроскопических измерений структуры углеводородных пеллетных облаков.
3. Модель для расчёта пространственного распределения коэффициента испускания в углеводородном пеллетном облаке вблизи линии H_{β} .
4. Измерение и интерпретация зависимости параметров углеводородных облаков от параметров макрочастиц и фоновой плазмы установки LHD.
5. Обнаружение сопоставимого вклада нейтрального и плазменного экранирования теплового потока при испарении полистироловых макрочастиц в установке LHD.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии:

1. Разработана и реализована методика восстановления пространственных распределений концентрации и температуры электронов в углеводородном пеллетном облаке.
2. Разработан и откалиброван девятиканальный изображающий полихроматор.
3. Автором получены и интерпретированы основные экспериментальные данные по параметрам пеллетных облаков в разрядах гелиотрона LHD с различными параметрами плазмы и макрочастиц. В том числе, создана модель для описания пространственного распределения излучения и самопоглощения линии H_{β} в пеллетном облаке.

Апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы представлены на 7 научных конференциях и семинарах:

- 33, 35, 36, 37, 38 международные конференции Европейского Физического Общества по физике плазмы и УТС (Рим, Италия, 2006 г.; Херсониссос, Крит, Греция, 2008 г.; София, Болгария, 2009 г.; Дублин, Ирландия, 2010 г., Страсбург, Франция, 2011 г.)
- 21 международная конференция по формам спектральных линий (Санкт-Петербург, Россия 2012)

- 22 международная конференция в Токи «Перекрестная проверка эксперимента и моделирования для плазмы УТС и астрофизической плазмы» (Токи, Япония, 2012 г.)

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, получены в период с 2006 по 2018 годы и опубликованы в 5 печатных работах в журналах из перечня ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (81 литературных источника), трёх приложений и изложена на 144 страницах, включая 76 рисунков и 11 таблиц.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность, сформулированы цель и основные задачи исследования структуры облаков испарившегося вещества вблизи испаряющихся в высокотемпературной плазме макрочастиц, приведены основные сведения о данной диссертационной работе.

В **Главе 1** дан обзор современного состояния исследований взаимодействия твердых макрочастиц с высокотемпературной плазмой установок с магнитным удержанием. При этом упор сделан на экспериментальные и теоретические методы исследования структуры пеллетных облаков, образующихся при таком взаимодействии. В разделе 1.1 описаны основные физические процессы, определяющие испарение макрочастицы, и приведены современные методы их описания и моделирования. Раздел 1.2 посвящен перспективным применениям инъекции макрочастиц. В разделе 1.3 проанализированы результаты исследований светящихся облаков вторичной холодной плазмы вблизи испаряющихся макрочастиц. В разделе 1.4 сформулированы и обоснованы цель и задачи диссертационной работы.

Глава 2 посвящена описанию аппаратуры, используемой в ходе исследований. В разделе 2.1 приведено описание установки для магнитного удержания плазмы LHD. Установка представляет собой гелиотрон с

соотношением полоидального/тороидального чисел обхода 2/10, большим радиусом 3.6 ÷ 4.0 м и малым радиусом 0.6 м. Эксперименты проводились в водородной плазме с температурой 0.5 ÷ 1.5 кэВ и концентрацией $(1 \div 7) \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ электронов, поддерживаемой инжекцией нейтральных пучков с мощностью $P_{\text{НВИ}} \approx 3 \div 14 \text{ МВт}$. Раздел 2.2 посвящен описанию системы примесной инжекции Tracer Encapsulated Solid PELlet (TESPEL) [6, A1]. Основой системы является инжектор, предназначенный для ускорения примесных макрочастиц диаметром 850 ÷ 900 микрон до скоростей 400 ÷ 450 м/с. Инжекция осуществляется в экваториальной плоскости в направлении большого радиуса с внешней стороны тора. В экспериментах использовались макрочастицы сферической формы из полистирола $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-)_n$. Инжектор оснащен тремя пролетными датчиками для измерения скорости макрочастицы. Диагностический комплекс включает широкообзорные датчики излучения с возможностью установки спектральных фильтров для оценки скорости испарения, а также оптическую систему на основе монохроматора для измерения спектра интегрального излучения облака вблизи испаряющейся макрочастицы. В разделе 2.3 подробно описан оригинальный изображающий полихроматор. Он оснащен девятью каналами с возможностью установки индивидуального интерференционного фильтра и диафрагмы. Полихроматор позволяет получить девять пространственно привязанных изображений светящейся области вблизи макрочастицы со временем экспозиции от 10 мкс 1 раз за время испарения с пространственным разрешением 0.6 мм/пиксель. Система синхронизации позволяет произвести съемку в момент нахождения макрочастицы в заданном положении вдоль большого радиуса установки. Пример полученных изображений с параметрами фильтров приведен на Рис. 1.

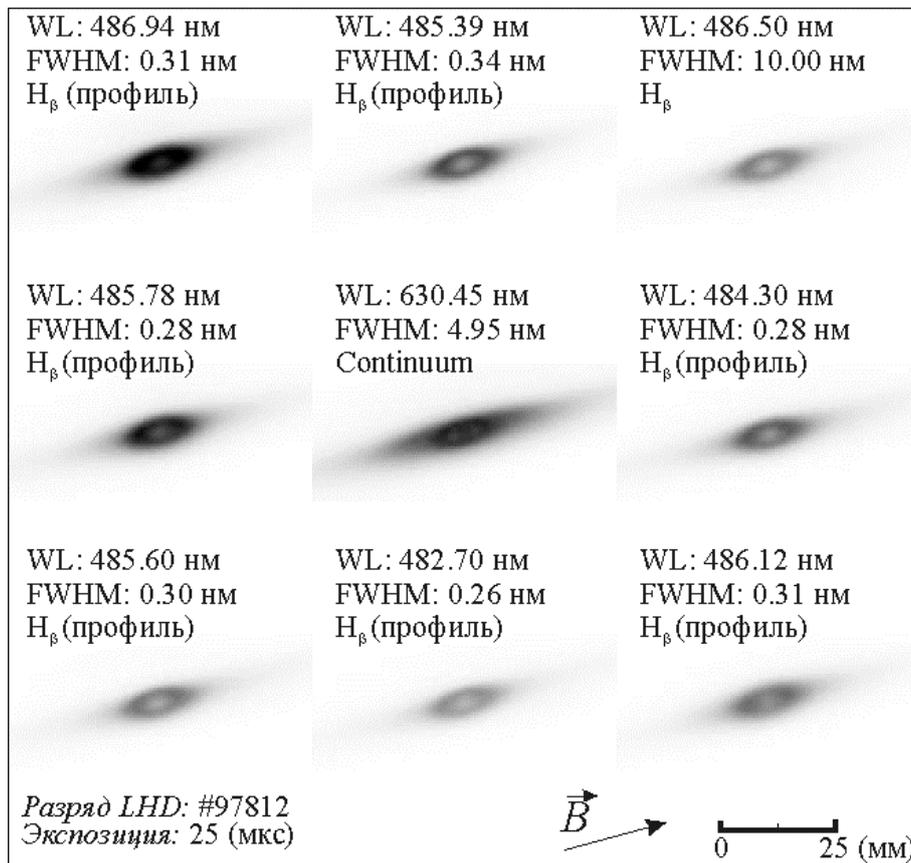


Рис. 1. Изображения углеводородного облака, полученные полихроматором в разряде LHD #97812. Параметры полосы пропускания фильтров: WL – центральная длина волны, FWHM – полная ширина на половине высоты. Направление силовой линии магнитного поля отмечено стрелкой.

Видно, что облака имеют аксиально симметричную форму с осью вдоль магнитного поля. Это позволило разработать изложенный в разделе алгоритм восстановления локальных значений коэффициента испускания ϵ с помощью метода Пирса в предположении оптической прозрачности [A3] для излучения линии H_β. Также приведена процедура определения характерных размеров области излучения из облака. Радиус облака определялся для центрального, содержащего макрочастицу, поперечного сечения как расстояние от центра до точки, где коэффициент испускания равен половине от максимального в этом сечении. Длина введена для распределения коэффициента испускания на оси как наибольшее расстояние между двумя точками, в которых его значение равно половине максимального.

Глава 3 содержит описание методов измерения пространственных распределений концентрации и температуры электронов вблизи испаряющейся в плазме полистироловой макрочастицы. В разделе 3.1 приведён метод определения пространственных распределений концентрации электронов в углеводородных облаках. До 7 узких (FWHM $\sim 3 \text{ \AA}$) фильтров полихроматора используются для измерения спектрального профиля линии H_{β} в каждой точке облака. При параметрах плазмы, характерных для углеводородного облака, уширение спектральной линии зависит главным образом от концентрации электронов n_{cld} [7]. Значение n_{cld} определяется путем минимизации невязки между расчётным и измеренным спектральными профилями линии. Измеренные значения n_{cld} на оси пеллетного облака показаны треугольниками на Рис. 3.

Метод определения температуры на основе локально измеренного отношения коэффициентов испускания линии H_{β} и непрерывного спектра в предположении существования локального термодинамического равновесия (ЛТР) описан в разделе 3.2. Для его реализации проведены расчеты температурной зависимости отношения суммарного коэффициента испускания линии H_{β} и непрерывного спектра на длине волны 486 нм $\varepsilon_{H_{\beta}+cont}$ к коэффициенту испускания в непрерывном спектре на длине волны 630 нм ε_{cont} с учетом излучательного прилипания, а также вкладов ионов углерода C^{1+} и C^{2+} при различных значениях концентрации электронов пеллетного облака (см. Рис. 2). Значение температуры T_{cld} в точке (i', j') определяется из решения уравнения

$$\varepsilon_{H_{\beta}+cont}(T_{cld}, n_{cld}) / \varepsilon_{cont}(T_{cld}, n_{cld}) = \hat{\varepsilon}_{H_{\beta}+cont}(i', j') / \hat{\varepsilon}_{cont}(i', j'), \quad (1)$$

где $\hat{\varepsilon}_{H_{\beta}+cont}$ и $\hat{\varepsilon}_{cont}$ – экспериментально измеренные значения соответствующих коэффициентов испускания. Полученные распределения температуры на оси пеллетного облака показаны ромбами на Рис. 3.

В разделе 3.3 изложена модель для расчета заселенности уровней водорода в углеводородном облаке при заданном распределении концентрации

и температуры электронов в нём. Она позволяет производить расчет заселенности первых семи уровней нейтрального водорода, а также количества ионов водорода в предположении одномерного разлёта вещества с околосвуковой скоростью вдоль магнитного поля. Модель использована для разработки метода определения температуры по распределению коэффициента испускания линии H_{β} , описание которого приведено в разделе 3.4. Метод позволяет определить одномерное распределение температуры электронов в облаке путем минимизации невязки между расчетным распределением заселенности верхнего уровня перехода линии H_{β} $n = 4$ и экспериментально наблюдаемым распределением коэффициента испускания. На Рис. 3 приведен пример сравнения таких распределений для подобранного распределения T_{cld} , обозначенного на том же графике сплошной кривой.

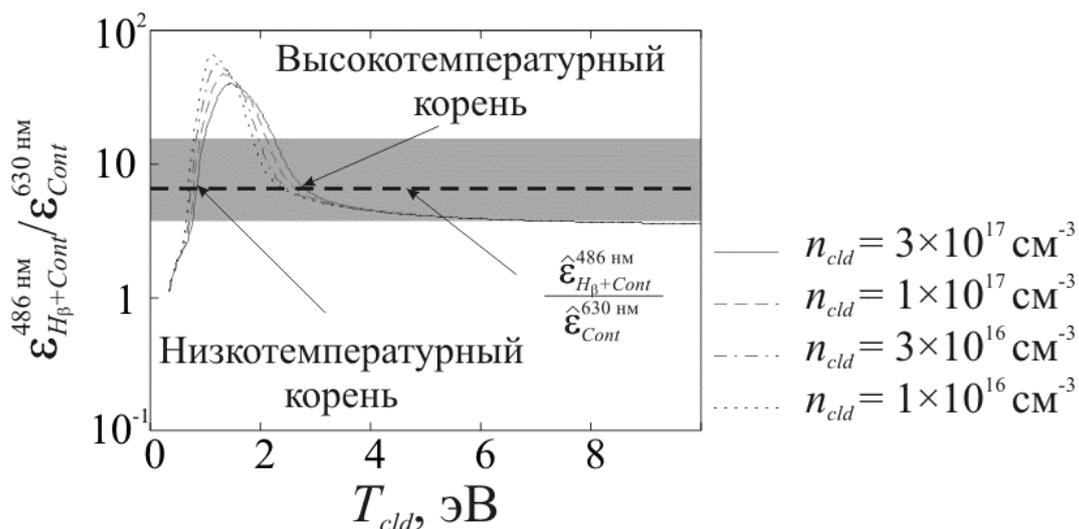


Рис. 2. Температурная зависимость отношения суммарного коэффициента испускания линии H_{β} и непрерывного спектра на длине волны 486 нм к коэффициенту испускания в непрерывном спектре на длине волны 630 нм с учетом вкладов ионов углерода C^{1+} и C^{2+} при различных значениях электронной концентрации. Серым цветом выделена область экспериментальных значений отношения.

В разделе 3.5 проанализирована применимость приближения ЛТР в углеводородном облаке. Сопоставление двух методов определения температуры выполнено в разделе 3.6. Проанализирован вклад различных ионизационных состояний углерода в излучение непрерывного спектра.

Показано, что учет ионизации углерода до C^{2+} приводит к значительно лучшему совпадению результатов определения температуры по двум методам, как это можно видеть на Рис. 3.

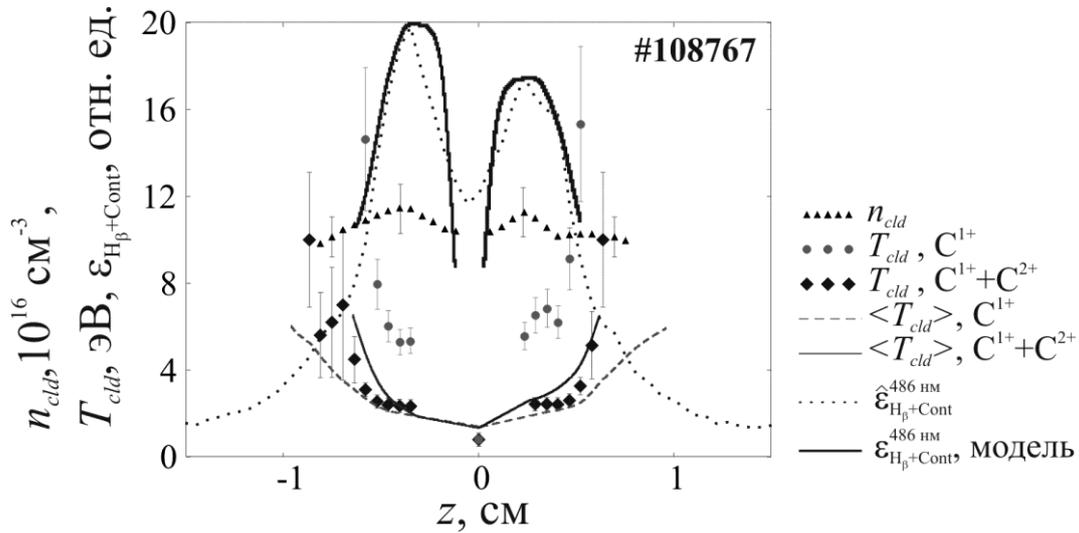


Рис. 3. Значения T_{cld} на оси пеллетного облака вдоль магнитного поля. Ромбами и кругами показаны значения, полученные по отношению испускания линии H_{β} и непрерывного спектра при учете ионизации углерода до C^{2+} и C^{1+} , соответственно. Сплошная и штриховая кривые получены по методу минимизации невязки расчетного и наблюдаемого распределений коэффициента испускания линии H_{β} при учете ионизации углерода до C^{2+} и C^{1+} , соответственно. Треугольниками показаны значения концентрации электронов. Пунктирной кривой показано измеренное распределение коэффициента испускания линии H_{β} , а сплошной - рассчитанное по модели.

В Главе 4 проанализированы результаты проведенных исследований структуры углеводородных облаков вблизи полистироловых макрочастиц, испаряющихся в плазме гелиотрона LHD. В разделе 4.1 установлена взаимосвязь между продольным и поперечным размерами светящихся областей как в линии H_{β} , так и в линии CII . Показано, что положение точки с максимальной концентрацией электронов в облаке линейно связано с длиной облака. Продемонстрировано, что энергия, приносимая из плазмы на один испаренный мономер $CH_2-CH(C_6H_5)$, является определяющим параметром для размера облака. Посредством регрессионного анализа определены коэффициенты степенной зависимости размера облака от этого параметра. В

качестве следствия получены законы подобия для описания зависимости наблюдаемых размеров излучающей области в линии H_{β} от текущего радиуса макрочастицы, концентрации и температуры электронов фоновой плазмы:

$$r_{cld}^{sc1g} [см] = 4.26 \cdot 10^3 n_e^{-0.26} [см^{-3}] T_e^{0.10} [эВ] r_{pel}^{0.67} [см], \quad (2)$$

$$l_{cld}^{sc1g} [см] = 5.08 \cdot 10^5 n_e^{-0.35} [см^{-3}] T_e^{0.14} [эВ] r_{pel}^{0.92} [см]. \quad (3)$$

Показано, что геометрические характеристики облака воспроизводятся с их помощью с погрешностью не более 25% для диапазона измеренных параметров. Объяснено, что полученная в экспериментах на других установках зависимость полного продольного размера от скорости испарения связана с вкладом непрерывного спектра при регистрации их изображений. В то же время, зависимости характерных длин спада излучения как в продольном, так и в поперечном направлении от параметров фоновой плазмы при регистрации облаков в спектральных линиях объяснены с использованием предложенного в диссертации подхода.

В Разделе 4.2 показано, что максимальное значение концентрации в облаке определяется скоростью испарения и может быть описано линейной зависимостью от этой величины с погрешностью $\leq 35\%$. Продемонстрировано, что диапазон получаемых локальных значений концентрации $(0.3 \div 2) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [A4] и температуры $0.8 \div 6.5 \text{ эВ}$ [A5] хорошо согласуется с результатами для водородных и дейтериевых облаков в других экспериментах [4], а также с расчетами для облаков при испарении углеродных макрочастиц [9]. Показана ключевая роль механизма излучательного прилипания для получения растущих от местоположения макрочастицы распределений температуры электронов в пеллетных облаках. На основе выведенных законов подобия предложена методика предсказания распределений концентрации и температуры электронов в углеводородном облаке вблизи полистироловой макрочастицы по известным параметрам инъекции и фоновой плазмы.

В разделе 4.3 сопоставлены роли нейтрального и плазменного экранирования при испарении полистироловых макрочастиц с использованием

полученных данных о структуре углеводородных облаков. В Таблице 1 приведена оценка фактора нейтрального экранирования $\delta_{C_8H_8}^{NGS}$ [10], фактора экранирования, оценённого из эксперимента $\delta_{C_8H_8}^{exp}$, фактора экранирования на плазменной части облака $\delta_{C_8H_8}^{pl}$, а также фактора совместного экранирования нейтральным и плазменным облаками $\delta_{C_8H_8}^{NGS+pl}$, который рассчитан самосогласованно в нейтральном облаке после дополнительного экранирования в плазменном облаке. Он ожидаемо меньше значений $\delta_{C_8H_8}^{NGS}$, и различия не превышают 25%. Этот вывод согласуется с выводами работы [11], в которой показано, что глубина проникновения водородной макрочастицы в предположении равных оптических толщин плазменной и нейтральной частей облака меняется не более чем на 10%.

Таблица 1. Оценки фактора экранирования

Параметр\номер разряда	#97812	#97814	#97816
$\delta_{C_8H_8}^{exp}$	0.047	0.066	0.029
$\delta_{C_8H_8}^{NGS}$	0.048	0.050	0.028
$\delta_{C_8H_8}^{pl}$	0.164	0.221	0.124
$\delta_{C_8H_8}^{NGS+pl}$	0.036	0.044	0.034

В Заключение сформулированы основные результаты:

1. Разработан девятиканальный изображающий полихроматор с пространственным 0.06 см и временным 10 мкс разрешением.
2. Получена экспериментальная база данных по облакам полистироловых макрочастиц диаметром ≈ 900 мкм, и скоростью инъекции ≈ 450 м/с в водородной плазме гелиотрона LHD с температурой $0.5 \div 1.5$ кэВ и концентрацией $(1 \div 7) \times 10^{13}$ см⁻³ электронов, поддерживаемой инъекцией нейтральных атомов мощностью $3 \div 14$ МВт.

3. Разработан и реализован метод восстановления пространственных распределений концентрации электронов в углеводородном облаке вблизи полистироловой макрочастицы. Измеренные значения концентрации электронов в видимой части облака составили $(0.3 \div 2) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в зависимости от стадии испарения и удаленности от поверхности макрочастицы. Показано, что максимальное значение концентрации в облаке может быть описано линейной зависимостью от скорости испарения с относительной погрешностью не более 35%.

4. Разработаны и применены два метода измерения температуры электронов в плазменном облаке. Значения температуры вблизи макрочастицы составили $0.8 \div 1.3 \text{ эВ}$. Зарегистрирован существенный рост температуры в направлении фоновой плазмы до значения $\approx 6.5 \text{ эВ}$ на расстояниях $6 \div 8 \text{ мм}$ от макрочастицы вдоль и $2 \div 3 \text{ мм}$ поперек направления магнитного поля соответственно. Показана ключевая роль механизма излучательного прилипания для получения низких значений температуры $\approx 1 \text{ эВ}$ в центре облака.

5. Проведено моделирование пространственного распределения излучения в окрестности линии H_{β} в предположении одномерного разлета испарившегося вещества. Результаты моделирования согласуются с измеренными распределениями коэффициента испускания линии H_{β} .

6. Сделаны оценки, подтверждающие предположение об отсутствии самопоглощения линии H_{β} в пеллетном облаке, используемое в методиках измерения параметров облака.

7. Показано, что продольные и поперечные размеры пеллетного облака в линиях H_{β} и CII линейно взаимосвязаны. Энергия, приносимая из фоновой плазмы на один испаренный мономер, определяет формирование облака и размеры излучающей области. Получены законы подобия, позволившие разработать методику оценки размеров, концентрации и температуры углеводородных облаков в зависимости от параметров макрочастицы и фоновой плазмы.

8. Продемонстрировано, что для углеводородных облаков на LHD вклады плазменного и нейтрального экранирования в ослаблении электронного потока соизмеримы. Показано, что экспериментальные значения фактора ослабления теплового потока с погрешностью, не превышающей 25%, могут быть оценены из модели нейтрального экранирования, а также из модели нейтрального экранирования с учетом предварительного экранирования на плазменной части облака.

Список цитируемой литературы

1. Takeiri Y. et al. Extension of the operational regime of the LHD towards a deuterium experiment // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. № 10.
2. Progress in the ITER Physics Basis // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. № 6., P. S1-S413.
3. Кутеев Б.В. Технологии для термоядерных реакторов, базирующиеся на инжекции макрочастиц // Журнал технической физики. 1999. Т. 69. № 9. С. 63–67.
4. Pégourié B. Review: Pellet injection experiments and modelling // Plasma Phys. Control. Fusion. 2007. V. 49. № 8. P. R87–R160.
5. McChesney J.M. et al. The interaction of fast alpha particles with pellet ablation clouds // Phys. Plasmas. 1998. V. 4. № 2. P. 381.
6. Sudo S. et al. Plasma Diagnostics with Tracer-Encapsulated Solid Pellet // Plasma Fusion Res. 2014. V. 9. P. 1402039
7. Stehlé C., Hutcheon R. Extensive tabulations of Stark broadened hydrogen line profiles // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1999. V. 140. № 1. P. 93–97.
8. Sergeev V.Yu. et al. Improvement of physical basis of PCX diagnostics using NIOS data on LHD // 38th EPS Conference on Plasma Physics 2011, EPS 2011 - Europhysics Conference Abstracts. , 2011. P. 1520–1523.
9. Morozov D.K. et al. Ionization–recombination processes and ablation cloud structure for a carbon pellet // Nucl. Fusion. 2004. V. 44. № 2. P. 252–259.
10. Сергеев В. Ю., Бахарева О. А., Кутеев Б. В., и др. Исследования испарения примесных макрочастиц в высокотемпературной плазме установок с магнитным удержанием // Физика плазмы, 2006, Т. 32, стр.398.

11. Houlberg W.A., Milora S.L., Attenberger S.E. Neutral and plasma shielding model for pellet ablation // Nucl. Fusion. 1988. Т. 28. № 4. P. 595–610.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи, опубликованные в журналах, включённых в Перечень ВАК РФ и индексируемых в базе данных SCOPUS:

A1. Tamura N., Sergeev V.Yu., Kalinina D.V., Miroshnikov I.V., Sato K., **Sharov I.A.**, Bakhareva O.A., Ivanova D.M., Timokhin V.M., Sudo S., Kuteev B.V. Spectroscopic diagnostics for ablation cloud of tracer-encapsulated solid pellet in LHD // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. № 10. P. 10F541.

A2. **Sharov I.A.**, Sergeev V.Yu., Miroshnikov I.V., Tamura N., Sudo S., Kuteev B.V. Imaging Spectroscopy of Pellet Clouds in a Helical Plasma // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. V. 39. № 11. P. 2476–2477.

A3. **Шаров И.А.**, Сергеев В.Ю., Мирошников И. В. Самопоглощение линии H_{β} в облаках пеллетов, испаряющихся в установка с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы // Письма в журнал технической физики 2014. Т. 40. № 8. С. 88–94.

A4. **Sharov I.A.** Sergeev V.Yu., Miroshnikov I.V., Tamura N., Kuteev B.V., Sudo S. Imaging polychromator for density measurements of polystyrene pellet cloud on the Large Helical Device // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. № 4. P. 43505.

A5. **Шаров И.А.**, Сергеев В.Ю., Мирошников И.В., Кутеев Б.В., Tamura N., Sudo S. Измерение пространственных распределений температуры электронов в облаках полистироловых пеллетов, испаряющихся в плазме гелиотрона LHD // Письма в журнал технической физики. 2018. Т. 44. № 9. С. 41.