

“УТВЕРЖДАЮ”

Заместитель директора Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт
общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук

д.ф-м.н. _____ В.В. Глушков

“___” мая 2019 г

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Шарова Игоря Александровича
«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

Инжекция твердых макрочастиц (пеллетов) в высокотемпературную плазму нашла широкое применение в экспериментальных установках управляемого термоядерного синтеза (УТС). Инжекция макрочастиц способствует решению ряда разноплановых задач: управление плотностью плазмы, уменьшение негативных последствий воздействия периферийных локализованных мод на стенки вакуумной камеры, нанесение специальных защитных покрытий на стенки вакуумной камеры, быстрое (но контролируемое) прекращение разряда, а также многочисленные диагностические применения, например, для исследования процессов переноса тепла и частиц. Для всех перечисленных задач необходимо знание о процессах

взаимодействия вещества макрочастицы с окружающей высокотемпературной плазмой, приводящих к испарению вещества и образования облака вокруг макрочастицы. Поэтому экспериментальное исследование облаков вблизи макрочастиц в высокотемпературной плазме является актуальной задачей.

Диссертационная работа Игоря Александровича Шарова посвящена экспериментальному исследованию параметров облаков вблизи полистироловых макрочастиц в высокотемпературной плазме.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование характеристик (геометрических размеров, температуры электронов, плотности электронов) облаков вблизи полистироловых макрочастиц в высокотемпературной плазме гелиотрона LHD (г. Токи, Япония) для чего были разработаны методики и аппаратура для спектроскопических измерений, проведены эксперименты на гелиотроне LHD при различных значениях макропараметров плазмы, предложены численные модели, описывающие наблюдаемые в экспериментах результаты.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, содержащего 81 наименование, и 3 приложений. Объем работы – 144 страницы, 76 рисунков, 11 таблиц. Структура и содержание работы отражают поэтапное решение задач, позволяющее достичь поставленной в диссертации цели.

Во **введении** автор обращает внимание на глобальную цель современных исследований по УТС и перечисляет роль инъекции макрочастиц в достижении этой цели, показывает актуальность темы диссертационной работы, приводит цель работы и задачи, которые были решены для достижения заявленной цели, обосновывает научную новизну, теоретическую и практическую ценность результатов работы, приводит методы исследования, перечисляет основные положения, выносимые на защиту, указывает степень достоверности и апробацию результатов.

В **первой главе** диссертации приведены современные представления физики о процессе испарения вещества макрочастицы в процессе ее движения в высокотемпературной плазме магнитных ловушек. В том числе указывается на

самосогласованность установления скорости испарения вещества, возможное влияние нейтрального и электростатического экранирования на уменьшение потоков тепла, поступающих из окружающей высокотемпературной плазмы на поверхность макрочастицы. **Первая глава** также содержит в себе подробный литературный обзор экспериментальных и теоретических работ по применению пеллет-инжекции на тороидальных установках с магнитной термоизоляцией плазмы для различных задач, упомянутых во **введении**. Еще одна немаловажная часть **первой главы** посвящена анализу уже имеющегося мирового опыта исследования геометрических параметров облака вокруг макрочастицы, а также плотности и температуры электронов в облаке на установках T-10, ASDEX Upgrade, Wendelstein7-AS, TFR, TEXT, PLT, LHD.

Вторая глава начинается с описания гелиотрона LHD, на котором проводились все описанные в диссертации эксперименты. Представлены характерные параметры плазмы, диагностические системы и системы нагрева, задействованные в этих экспериментах. Нагрев плазмы осуществлялся системой инъекции пучка нейтральных атомов при мощностях до 14 МВт, а плотность и температура электронов в месте испарения макрочастицы составляла $(1 - 5) \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $(0.8 - 1.5) \text{ кэВ}$ соответственно. В дальнейшем во **второй главе** автор приводит описание системы инъекции макрочастиц на установке LHD — “TESPEL”. Сферические полистироловые частицы размером 500 – 900 мкм разгоняются инжектором до 450 м/с. Описана и диагностическая система для исследования скорости испарения макрочастиц в плазме наряду с девятиканальным изображающим полихроматором, разработанным автором в рамках диссертационной работы. Время экспонирования составляло 10 – 30 мкс, что меньше времени полного испарения макрочастицы (400 ÷ 600 мкс). Наблюдение осуществлялось практически сонаправлено со скоростью движения макрочастицы, что позволяло уменьшить смазывание изображения в результате смещения частицы за время экспонирования. Основным диапазоном длин волн регистрируемого свечения облака вокруг макрочастицы лежал вблизи линии H_{β} , т.к. именно ее уширение и отношение интенсивности к

интенсивности непрерывного спектра позволяло в дальнейшем определять плотность и концентрацию электронов в облаке. Оценка самопоглощения линии H_{β} в углеводородном пеллетном облаке, выполненная **во второй главе**, показала, что для полистироловых макрочастиц самопоглощением можно пренебречь практически во всем диапазоне характерных плотностей и температур, что выгодно отличает их от топливных (водородных, дейтериевых) макрочастиц. Далее автор описывает процедуры калибровки и поворота изображения, после чего переходит к получению локальных значений коэффициента испускания в облаке с помощью обратного преобразования Абеля по методу Пирса с регуляризацией Тихонова. Завершается **вторая глава** введением определений длины облака, радиуса облака, координаты максимума коэффициента испускания посредством снятых пространственных распределений коэффициента испускания.

В **третьей главе** пристальное внимание уделено методикам определения плотности и температуры электронов в облаке. Плотность определялась по Штарковскому уширению линии H_{β} . Для определения температуры предложено две методики: 1) по отношению измеренных коэффициентов испускания линии и непрерывного спектра; 2) по спаду линии H_{β} . В первом методе непрерывный спектр регистрировался в области 630 нм поскольку регистрация вблизи линии H_{β} (486.12 нм) была признана нецелесообразной из-за помехи в виде большого числа линий углерода в этой области. Был учтен вклад углерода в непрерывный спектр, а также радиационное прилипание, в результате чего получено новое выражение температурной зависимости отношения суммарного коэффициента испускания в районе 486.12 нм к коэффициенту испускания непрерывного спектра в области 630 нм. Вывод выражения представлен в **Приложении 1**. Также в третьей главе представлена разработанная автором модель для расчета заселенности уровней водорода в углеводородном пеллетном облаке. В рамках этой модели было показано, что, получаемые распределения H_{β} нельзя интерпретировать как распределение нейтрального водорода, характерная длина спада излучения на распределении никак не связана с длиной ионизации,

но содержит информацию о нарастании температуры электронов в облаке. Это позволило разработать второй из вышеупомянутых методов определения температуры электронов в облаке, который состоит в подборе распределения температуры электронов в облаке, при котором невязка между расчетным и экспериментально измеренным распределением коэффициента испускания линии H_{β} минимальна. Завершается **третья глава** обоснованием применимости приближения локального термодинамического равновесия в углеводородном облаке, использованного в моделях, и сравнением обоих использованных методов определения температуры электронов облаке. Сравнение показало, что оба метода дают близкие результаты только при учете вклада C^{1+} и C^{2+} .

Четвертая глава вмещает в себя все результаты экспериментов по измерению распределения локального свечения облаков вокруг полистироловых макрочастиц в LHD, определению плотностей и температур электронов при различных значениях макропараметров плазмы в установке. Эти результаты также представлены в виде сводных таблиц в **Приложении 3**. Была установлена линейная связь между продольным и поперечным размерами облака, получаемыми по свечениям на линиях H_{β} и $C II$, определены коэффициенты этой зависимости. Проведено сравнение полученных результатов с результатами других установок. Найдены и объяснены отличия полученных в диссертации результатов от результатов установок T-10 и ASDEX Upgrade. Завершается **четвертая глава** оценкой влияния плазменного и нейтрального экранирования на испарение макрочастицы. Получен результат, свидетельствующий о слабом влиянии предварительного экранирования в плазменном облаке на скорость испарения.

В **заключении** диссертации представлены решенные в работе научные задачи, выводы по результатам проведенного исследования.

Наиболее значимыми научными результатами диссертационной работы И.А. Шарова, представляющими практический и научный интерес, являются следующие:

- разработан девятиканальный изображающий полихроматор с пространственным 0.06 см и временным разрешением 10 мкс, позволяющий получать пространственные распределения свечения облака вокруг макрочастицы;
- разработан и реализован метод восстановления пространственных распределений концентрации электронов в углеводородном облаке вблизи полистироловой макрочастицы, получены значения концентрации электронов $(0.3 - 2) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$;
- разработаны и применены два метода измерения температуры электронов в плазменном облаке, получено множество двумерных распределений температуры электронов в облаке при различных макропараметрах плазмы установки LHD;
- показана ключевая роль механизма излучательного прилипания для получения низких значений температуры $\approx 1 \text{ эВ}$ в центре облака
- сделаны оценки, подтверждающие предположение об отсутствии самопоглощения линии H_{β} в пеллетном облаке, используемое в методиках измерения параметров облака;
- показано, что продольные и поперечные размеры пеллетного облака в линиях H_{β} и $C II$ линейно взаимосвязаны;

Научная ценность работы обусловлена тем, что: детально изучено пространственное строение облаков вокруг полистироловых макрочастиц в экспериментах на гелиотроне LHD при различных макропараметрах плазмы; созданные модели и выведенные законы подобия для структуры облака позволяют знать её на протяжении всего времени испарения макрочастицы, а не только в момент фактической регистрации свечения облака; разработана оригинальная дополнительная методика для определения температуры электронов в облаке по спаду линии H_{β} .

Практическая значимость состоит в том, что создан изображающий полихроматор, позволяющий получать изображение с уникально высокими спектральным, временным и пространственным разрешениями. Высокое

пространственное разрешение требует минимизации смазывания изображения, связанного с движением макрочастицы, за счёт выбора крайне малого угла (2°) между осью полихроматора и направлением движения макрочастицы, а следовательно, малого телесного угла светосбора. В то же время для формирования чёткого изображения макрочастицы на ПЗС матрице число фотонов, регистрируемых за относительно краткое время экспозиции, должно быть достаточно велико. Как видно из приведенных в диссертации снимков, автор блестяще справился с решением этой задачи.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются тем, что:

- законы подобия были получены благодаря анализу большого количества экспериментальных данных;
- проведена проверка применимости различных критериев при обосновании моделей и получаемых результатов, например, применимость приближения локального термодинамического равновесия;
- проведено сравнение с результатами, получаемыми на других магнитных ловушках, а расхождение объяснено;
- большим научным опытом коллектива, с которым взаимодействует автор, в области спектроскопических исследований испарения макрочастиц в высокотемпературной плазме;
- результаты исследований представлены в 5 научных статьях, которые опубликованы в рецензируемых зарубежных и отечественных журналах из перечня ВАК, а также были доложены на многочисленных международным конференциях и российских конференциях с международным участием.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования в организациях, ведущих исследования по физике магнитного удержания высокотемпературной плазмы: НИЦ "Курчатовский институт", ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ТРИНИТИ, ИОФ РАН, ИПФ РАН, НИЯУ МИФИ, ИЯФ СО РАН.

Недостатками работы являются:

- 1) Некоторая языковая и терминологическая небрежность в оформлении диссертации, впрочем, мало мешающая пониманию смысла текста.
- 2) При сопоставлении измеренных полихроматором относительных интенсивностей в окрестности линии H_{β} с 0-мерным измерением спектра излучения всего пеллетного облака (стр. 52, 53) при помощи связки монохроматор – ЭОП – ПЗС, «время экспонирования спектрометра составило 84 мкс» (подпись к рис. 2.9). Это значительно больше, чем в обычном режиме – см. описание на стр. 47 («**на короткое время** ЭОП обеспечивает регистрацию спектра на 42 строках ПЗС матрицы. Затем напряжение ЭОП снимается, и все строки матрицы сдвигаются в направлении считывающего регистра со скоростью 1 строка за 2 мкс.»). За 80 мкс макрочастица пролетает больше трети расстояния от начала интенсивного испарения до максимума испарения (см. рис. 2.5) и ее спектр существенно меняется. Возможно, это и объясняет полученное различие в спектрах.

Указанные замечания не снижают положительной оценки диссертации Шарова Игоря Александровича. Работы И.А. Шарова, представленные в диссертации, внесли вклад в физику магнитного удержания высокотемпературной плазмы. Представленная диссертационная работа является целостным научным трудом, вклад автора в который является определяющим. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Достоверность полученных И.А. Шаровым результатов подтверждается их публикацией в ведущих рецензируемых иностранных и отечественных научных журналах, а также представленными докладами на международных и российских конференциях. Эти работы известны специалистам в данной области физики плазмы и цитируются в научных изданиях.

В целом в представленной диссертантом работе решена принципиальная задача экспериментального исследования пространственной структуры облаков, возникающих при испарении углеводородных макрочастиц, с хорошим пространственным и временным разрешением. При этом задача была

решена комплексно: разработана диагностика и методики определения параметров плазмы в облаке; проведены эксперименты и получены результаты; разработаны модели, описывающие экспериментальные результаты, а также подобраны законы подобия для численной оценки структуры облаков. Проведено подробное сравнение полученных научных результатов с результатами исследований на других установках с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы.

В лице И.А. Шарова мы несомненно имеем высокопрофессионального специалиста, знания и умения которого безусловно отвечают высоким требованиям, предъявляемым к учёным, удостоиваемым степени кандидата физико-математических наук.

Оригинальные результаты диссертации, безусловно, являются достижением в области экспериментальных исследований структуры облаков, возникающих при испарении углеводородных макрочастиц высокотемпературной плазме тороидальных магнитных ловушек.

Диссертация И.А. Шарова полностью удовлетворяет требованиям, изложенным в пунктах 9 – 11, 13 и 14 действующего "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 01 октября 2018 г. № 1168), предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Шаров Игорь Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Отзыв составлен старшим научным сотрудником ИОФ РАН, к.ф.-м.н. по специальности 01.04.08 «Физика плазмы» Летуновым Александром Алексеевичем, тел.: (8)-499-503-87-77 (доб. 2-48), email: let@fpl.gpi.ru и старшим научным сотрудником ИОФ РАН, к.ф.-м.н. по специальности 01.04.08 «Физика плазмы» Борзосековым Валентином Дмитриевичем, тел.: (8)-499-503-87-77 (доб. 5-82), email: tinborz@gmail.com на основе обсуждения содержания

диссертации на семинаре отдела физики плазмы ИОФ РАН, который состоялся 24 апреля 2019 г.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета отдела физики плазмы, протокол № 454 от 29 апреля 2019 г.

Старший научный сотрудник
отдела физики плазмы ИОФ РАН, к.ф.-м.н.

Летунов А.А.

Старший научный сотрудник
отдела физики плазмы ИОФ РАН, к.ф.-м.н.

Борзосеков В.Д.

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

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

тел.: +7 499 503 8734

e-mail: office@gpi.ru

<http://www.gpi.ru/>