

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертационную работу О.А. Бахаревой

«Роль испаренного вещества при взаимодействии примесных макрочастиц с высокотемпературной плазмой установок с магнитным удержанием»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.9 – Физика плазмы

Достижение условий зажигания самоподдерживающейся термоядерной реакции синтеза в будущих термоядерных установках с магнитным удержанием является основной целью термоядерных исследований. Для технической реализации сопутствующих задач требуется развитие методов контроля и управления параметрами плазмы разряда. Метод инъекции макрочастиц может применяться для подпитки плазмы топливом, гашения разряда, смягчения последствий периферийных локализованных мод, а также в диагностических целях. Одним из важнейших параметров удерживаемой термоядерной плазмы является время ее удержания, которое связано с эффективностью передачи энергии плазме альфа-частицами, возникающими в реакции синтеза. В связи с этим, в настоящее время развиваются методы диагностики энергетических спектров ионов основной компоненты и альфа-частиц. Активным методом, позволяющим проводить локальные измерения энергетических спектров быстрых ионов, является PCX (Pellet Charge eXchange) диагностика, которая основана на перезарядке таких ионов на облаке испарившегося вещества вблизи макрочастицы и их последующей регистрации анализатором нейтральных частиц, расположенным за пределами плазменного шнура.

Для применения пеллет-инъекции в целях диагностики и управления параметрами плазмы требуется иметь модель, позволяющую прогнозировать скорость испарения макрочастицы в плазме с заданными параметрами, поскольку глубина проникновения макрочастицы определяет эффективность ввода топлива, в случае инъекции замороженных макрочастиц из изотопов

водорода, или область, доступную для измерений, в случае диагностической пеллет-инжекции. Как для верификации моделей испарения макрочастиц, так и для диагностических нужд необходима информация о структуре пеллетного облака, формирующегося вокруг примесной макрочастицы в высокотемпературной плазме установки с магнитным удержанием. Кроме того, для развития упомянутой перспективной РСХ диагностики, необходимо усовершенствование методики вычисления энергетического спектра быстрых ионов, удерживаемых в плазме, из измеряемого анализатором нейтральных частиц потока нейтральных атомов перезарядки. Таким образом, тема диссертационной работы О.А. Бахаревой входит в число **актуальных** научных проблем управляемого термоядерного синтеза.

Диссертационная работа состоит из введения и четырех глав. Введение содержит основные сведения о данной диссертационной работе.

В первой главе приводится обзор современного состояния теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия макрочастиц с высокотемпературной плазмой установок с магнитным удержанием, относящихся к теме диссертационной работы, включая и результаты, полученные в диссертационной работе. Рассмотрены проблемы, связанные с численным описанием процесса испарения, с исследованием структуры пеллетных облаков, с вычислением энергетических спектров быстрых ионов, измеряемых РСХ диагностикой.

Во второй главе излагаются результаты, полученные в диссертационной работе в части исследования структуры облаков вблизи примесных макрочастиц, испаряющихся в плазме установок с магнитным удержанием. Проанализированы распределения интенсивности свечения углеродных, углеводородных и литиевых облаков в линиях различных ионов. Для углеродных и углеводородных облаков сделан вывод о сопоставимом вкладе горячих электронов фоновой плазмы и холодных электронов вторичной плазмы пеллетного облака в ионизацию иона C^+ . Для полистироловых и литиевых макрочастиц получены профили распределения

зарядовых состояний в облаке, которые используются далее для определения энергетических спектров быстрых ионов с помощью РСХ диагностики.

В третьей главе развиваются модели испарения примесных макрочастиц в плазме современных установок, включающие различные комбинации механизмов экранирования первичного теплового потока из фоновой плазмы пеллетным облаком. Верификация моделей проводится путем сравнения измеренных скоростей испарения примесных макрочастиц в плазме различных установок (токамаков, стеллараторов, гелиотронов) с предсказаниями моделей испарения. На основе расчетов по модели получены законы подобия (скейлинги) для быстрого расчета скорости испарения примесной макрочастицы заданного размера из заданного материала при известных параметрах фоновой плазмы с максвелловским распределением частиц по скоростям.

Четвертая глава посвящена методике расчета энергетических спектров быстрых ионов плазмы из регистрируемых анализатором нейтральных частиц потоков атомов перезарядки. Сформулированы предложения по оптимизации РСХ диагностики с инъекцией полистироловых макрочастиц при планировании будущих экспериментов с целью осуществления абсолютных измерений спектров быстрых протонов. Показано, что корректный учет структуры литиевого облака при расчете доли перезарядившихся на облаке альфа-частиц может привести к увеличению на один-два порядка нормировки абсолютных значений энергетических спектров альфа-частиц, ранее полученных в дейтериево-третиевых экспериментах на токамаке TFTR с помощью РСХ диагностики. Метод РСХ в определенной степени является конкурентом методов пучковой диагностики термоядерной плазмы.

Результаты анализа сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными на различных установках, а также с результатами расчетов других авторов, что обеспечивает **достоверность** полученных результатов.

Представленная диссертация является законченным научным исследованием в котором можно выделить следующие наиболее важные и интересные результаты:

1. Проанализировано влияние различных механизмов экранирования пеллетным облаком потока тепла, поступающего из окружающей плазмы на макрочастицу. Продемонстрирован заметный вклад плазменного экранирования, на фоне преобладающего нейтрального экранирования. Развита методика для одновременного расчета как скорости испарения макрочастицы, так и характерных параметров пеллетного облака, с учетом нейтрального и плазменного экранирования. Для широкого диапазона материалов макрочастицы и ее размеров получены законы подобия, позволяющие быстро рассчитывать скорость испарения примесной макрочастицы в максвелловской плазме с заданными параметрами.

2. Из анализа характерных длин спада интенсивности свечения углеродных и углеводородных облаков в линии СII сделан вывод о том, что в случае нетугоплавких полистироловых макрочастиц ионизация иона C^+ в облаке определяется холодными электронами вторичной плазмы пеллетного облака, а в случае тугоплавких углеродных макрочастиц горячие электроны фоновой плазмы и холодные электроны облака вносят сопоставимый вклад в ионизацию испаренного вещества в области нахождения иона C^+ .

3. Показано, что аккуратный учет распределения ионизационных состояний в пеллетном облаке и его размеров при вычислении перезарядившихся на облаке быстрых ионов может приводить к заметному увеличению абсолютных значений энергетических спектров, измеряемых с помощью РСХ диагностики.

Полученные результаты и разработанные методики 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. Исследования структуры пеллетных облаков для случая водородных пеллет сталкивается с проблемой запираания излучения на наблюдаемых бальмеровских линиях. Этот эффект приводит к своеобразному «исчезновению пеллеты» вследствие перехода контура линейчатого излучения к пределу излучения «черного тела» в определенной спектральной области. Хотелось бы видеть обсуждение этого эффекта в диссертационной работе.

2. В работе также исследуется испарение полистироловых макрочастиц. При термическом разложении полистирола может образовываться широкий спектр углеводородных молекул и молекулярных ионов. Однако в работе не обсуждается их влияние на процессы нейтрализации быстрых протонов. Кроме того, в плотных и холодных пеллетных облаках возможно формирование отрицательных ионов. Их вклад как в ионизационный баланс, так и в перезарядку быстрых частиц в облаке не проанализирован.

3. В тексте диссертационной работы присутствует ряд опечаток, например:

- в формуле (3.20) на стр. 117 предположительно потерян множитель dN/dt в числителе дроби под квадратным корнем;
- на стр. 150 верхний предел указанного диапазона значений энергии E имелся в виду, очевидно, 1000 кэВ.

Указанные замечания не являются принципиальными возражениями по сути выполненной работы. Диссертационная работа представляет собой законченное исследование, достоверность, научная новизна и значимость результатов которого не вызывает сомнения. Основные результаты работы достаточно полно отражены в 7 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в перечне ВАК РФ и в базе данных Web of Science, апробированы в ряде всероссийских и международных конференций. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации, основные

положения диссертации соответствуют специальности 1.3.9 – Физика плазмы.

Заключение

Считаю, что диссертационная работа Бахаревой О.А. «Роль испаренного вещества при взаимодействии примесных макрочастиц с высокотемпературной плазмой установок с магнитным удержанием» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 "Физика плазмы" согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор Бахарева О.А. заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, профессор

Главный научный сотрудник

Национального исследовательского центра

«Курчатовский институт»

В.С. Лисица

_____ 2024 г.

Адрес: 123182, г.Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Эл. почта: Lisitsa_VS@nrcki.ru, тел.: +7 (499)-196-73-34

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.08 – Физика плазмы.

Подпись Лисицы Валерия Степановича заверяю

Главный учёный секретарь

НИЦ «Курчатовский институт»

О.А. Алексеева

