

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

Метод инъекции макрочастиц (пеллетов) давно разрабатывается и применяется для решения многих важных задач экспериментальной физики высокотемпературной плазмы, таких как диагностика локальных параметров (плотность и температура плазмы, плотность тока, функция распределения быстрых ионов и др.), подпитка топливом плазмы больших установок, управление периферийными локализованными модами (инициирование их, и/или смягчение их последствий), управление режимом удержания и контролируемое гашение разряда. Несмотря на долгую историю разработки и применения пеллет-инъекции, многие методические и практические аспекты ее остаются еще нерешенными.

Для разнообразных приложений пеллет-инъекции требуется иметь возможность прогнозировать процесс испарения макрочастицы в плазме. Расчет скорости испарения вещества макрочастицы и глубины ее проникновения важен, например, для определения области локализации доставляемого в плазму вещества. Картина испарения макрочастицы оказывается сложной, и, для выявления преобладающих в ней механизмов, важна также информация о структуре пеллетного облака. Такая информация необходима как для диагностических применений, так и для использования пеллет-инъекции для управления разрядом.

Таким образом, тема диссертационной работы О.А. Бахаревой относится к числу **актуальных** современных проблем управляемого термоядерного синтеза.

Диссертационная работа состоит из введения и четырех глав.

Первая глава содержит обзор современного состояния исследований взаимодействия макрочастиц с высокотемпературной плазмой установок с магнитным удержанием. Приведен анализ измерений и предсказаний параметров пеллетных облаков. Описаны различные подходы к моделированию процесса испарения на основе учета различных механизмов экранирования. Обсуждаются проблемы, связанные с РСХ-диагностикой энергетических спектров быстрых ионов (*Pellet Charge-Exchange, перезарядка на пеллетном облаке*) при их нейтрализации на облаке испаренного вещества.

Вторая глава посвящена исследованию структуры светящихся облаков вблизи примесных макрочастиц, испаряющихся в плазме установок с магнитным удержанием. Изучается роль горячих электронов фоновой плазмы и холодных электронов вторичной плазмы в ионизационном балансе. На основании экспериментальных данных подобраны профили пространственного распределения зарядовых состояний в углеводородном и литиевом облаках, которые необходимы для определения энергетических спектров быстрых ионов с помощью РСХ диагностики.

Третья глава посвящена моделированию процесса испарения примесных макрочастиц в плазме установок с магнитным удержанием. Рассматривается несколько моделей для расчета скорости испарения примесных макрочастиц в максвелловской плазме, которые включают в себя различные комбинации механизмов экранирования потока тепла, поступающего к макрочастице из фоновой плазмы сквозь пеллетное облако и испаряющего ее. Результаты расчетов скорости испарения макрочастицы по моделям сравниваются с экспериментально измеренными значениями. Показано, что значения глубины проникновения примесной макрочастицы в плазму, рассчитанные по модели нейтрального экранирования, находятся в хорошем согласии с экспериментом. На основе расчетов по указанной модели получены законы подобия (скейлинги) для быстрого расчета скорости испарения примесной макрочастицы в широком диапазоне как параметров материала макрочастицы и ее размера, так параметров фоновой плазмы. Однако, более детальный расчет показывает, что плазменная часть облака может вносить заметный вклад в экранирование по сравнению с основным механизмом нейтрального экранирования. Расчет по модели нейтрального и плазменного экранирования дает результат, согласующийся с экспериментальными данными не только для скорости испарения, но также и для характерного размера, концентрации и температуры электронов однократно ионизованной части облака.

В четвертой главе полученные результаты используются для усовершенствования РСХ диагностики функции распределения быстрых ионов фоновой плазмы. Сформулированы предложения по оптимизации РСХ диагностики, которые могут использоваться при планировании экспериментов по измерению абсолютных значений энергетических спектров быстрых протонов при инжекции полистироловых макрочастиц. Кроме того, для имеющихся экспериментальных данных, полученных в дейтериево-третиевых экспериментах на токамаке TFTR, уточнена методика расчета энергетического спектра альфа-частиц из сигнала анализатора нейтральных атомов с учетом более детальных предположений о структуре литиевого облака. Показано, что такой уточненный

подход может привести к увеличению на один-два порядка абсолютных значений энергетических спектров альфа-частиц, сообщавшихся ранее.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечена их согласием с экспериментальными данными, полученными на различных установках и другими авторами. В качестве наиболее важных и интересных результатов работы можно выделить следующие:

1. Получены скейлинги (законы подобия) для расчета скорости испарения примесной макрочастицы в максвелловской плазме с заданными параметрами в широком диапазоне параметров макрочастицы и плазмы в приближении нейтрального экранирования. Развита методика расчета скорости испарения примесной макрочастицы и характерных параметров пеллетного облака с учетом нейтрального и плазменного экранирования.

2. Анализ данных об излучении углеродных и углеводородных облаков показал, что электроны вторичной плазмы вносят сравнимый, по сравнению с электронами фоновой плазмы, вклад в ионизационный баланс иона C^+ в углеродном облаке и основной вклад в углеводородном облаке.

3. Показано, что результаты расчета доли перезарядившихся на пеллетном облаке быстрых ионов зависят от распределения зарядовых состояний в облаке. Учет размеров и структуры пеллетного облака может привести к увеличению на один-два порядка сообщавшихся ранее абсолютных значений энергетического спектра альфа-частиц, полученных с помощью РСХ диагностики в дейтериво-третиевых экспериментах на токамаке TFTR.

Полученные в работе результаты и разработанные методики обладают высокой **практической значимостью** и могут применяться на современных и проектируемых установках с магнитным удержанием плазмы.

По работе имеются следующие замечания.

1. На рис. 2.4 проведено сопоставление измеренного и вычисленного по скейлингу (2.1.) масштабов спада интенсивности излучения на изображениях, полученных через интерференционные фильтры 720 ± 5 нм 723 ± 1 нм на стеллараторе W7-AS. Если для первого случая имеет место хорошее совпадение экспериментальных значений масштабов спада и предсказаний скейлинга (2.1), то для измерений через второй фильтр соответствие гораздо хуже. Это выглядит странным, поскольку

параметры фильтров весьма близки, и через них проходит излучение тех же самых линий углерода СІІ 723.1 нм и 723.6 нм, как указано в табл. 1.1. Хотелось бы понять причину такого различия.

2. В параграфе 3.2.1 проводится сравнение экспериментально измеренных радиальных профилей скорости испарения примесных макрочастиц (по данным нескольких установок) и рассчитанных по моделям нейтрального экранирования с учетом и без учета вклада электростатического экранирования. Убедительно показано, что одномерная модель электростатического экранирования не позволяет адекватно описать экспериментальные результаты, а, с другой стороны, чисто нейтральное экранирование в большинстве случаев оказывается для этой цели вполне достаточным. В качестве объяснения этого неожиданного результата предлагается учитывать реальную двумерную картину токов вблизи макрочастицы, в результате чего перепад потенциала в слое снижается примерно в 3 раза, но не показано, является ли это снижение перепада потенциала достаточным для приведения в согласие предсказаний модели и результатов наблюдений.
3. В диссертации подробно рассмотрены различные модели испарения макрочастиц, учитывающие нейтральное экранирование (в том числе слабое), электростатическое, плазменное, и их комбинации, и продемонстрированы случаи их успешного применения. В то же время, у читателя может создаться впечатление, что эти модели зачастую выбираются исследователем, что называется, «по случаю (ad hoc)», исходя из наилучшего согласия с конкретным экспериментом. Полезно было бы представить некоторый обобщающий параграф, в котором были бы систематизированы особенности моделей и их применения (в зависимости от материала макрочастицы, параметров плазмы и установки и т.п.).
4. Не перепутано ли направление движения пеллета на Рис. 2.1 в диссертации? Если сравнивать положение максимальной интенсивности свечения облака с максимумом на профиле скорости испарения на Рис. 2.7, то может показаться, что на Рис. 2.1 пеллет летит в другую сторону, чем указано стрелкой.

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 опубликованы в 7 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в перечне ВАК РФ и в базе данных Web of Science, и представлялись на ряде международных и российских

конференций. Содержание диссертации достаточно полно отражено в автореферате, основные положения диссертации соответствуют специальности 1.3.9 – Физика плазмы.

Заключение

Считаю, что диссертационная работа О.А. Бахаревой «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 О.А. Бахарева заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
лаборатории физики высокотемпературной плазмы
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Л.Г. Аскинази

29 ноября 2024 г.

Адрес: 194021, С.-Петербург, ул. Политехническая, 26.

Эл. почта: leonid.askinazi@mail.ioffe.ru, тел.: +7 (812) 297-22-45.

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.08 – Физика плазмы.

Подпись _____ Фамилия
зав. отделом кадров ФТИ им. А.Ф. Иоффе
