

## О Т З Ы В

на автореферат диссертации Бахаревой Ольги Александровны  
«Роль испаренного вещества при взаимодействии примесных макрочастиц  
с высокотемпературной плазмой установок с магнитным удержанием»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы»

Диссертация О.А. Бахаревой посвящена изучению физических процессов при испарении твердых частиц миллиметрового размера, инжектируемых в высокотемпературную плазму установок с магнитным удержанием. Способ доставки термоядерного топлива в замороженном виде в рабочую область реактора был первоначально предложен в работах по инерциальному управляемому синтезу. Позже этот способ стал активно использоваться и в установках с магнитным удержанием горячей плазмы. В настоящее время в плазму токамаков и стеллараторов инжектируются макрочастицы, именуемые также пеллетами, состоящие как из изотопов водорода, так и из различных примесей. Это позволяет решать не только задачи по поддержанию требуемой концентрации изотопов водорода в рабочем объеме, но и разнообразные диагностические задачи. Среди последних одной из наиболее сложных и перспективных является задача измерения функции распределения по энергиям ионов основной компоненты плазмы, а также термоядерных альфа-частиц с помощью диагностики перезарядки на облаке пеллета (PCX, Pellet Charge eXchange).

Для эффективного применения инъекции макрочастиц требуются знания об особенностях процесса испарения, а также о структуре облака вещества, формирующегося в зоне испарения. До недавнего времени структура пеллетных облаков оставалась малоизученной. Развитие методов визуальной диагностики и изображающей спектроскопии пеллетных облаков в последнее десятилетие позволило получить значительный объем новых экспериментальных данных. Представленная диссертационная работа является актуальной, поскольку в ней в комплексе анализируются экспериментальные данные о скорости испарения, структуре пеллетных облаков, а также о перезарядившихся на облаке быстрых ионах.

В рамках представленного исследования проанализировано влияние структуры облака на скорость испарения макрочастицы, а также на процесс нейтрализации - захвата электронов быстрыми ионами фоновой плазмы при взаимодействии с частицами облака. В работе продемонстрировано, что аккуратный учет структуры

пеллетного облака приводит к увеличению на порядок и более абсолютных значений энергетического спектра альфа-частиц, который восстанавливается из данных анализатора нейтральных частиц в экспериментах на токамаке TFTR. Это является важным уточнением, которое необходимо в дальнейшем учитывать при проектировании и анализе данных такого рода систем измерения абсолютных значений функции распределения альфа-частиц в плазме.

Помимо значительного вклада в развитие диагностики РСХ в работе получены также и другие важные результаты. Показано, что холодные электроны пеллетного облака вносят существенный вклад в ионизационный баланс в облаке даже при испарении тугоплавких углеродных макрочастиц. В случае, когда поток электронов горячей плазмы сильно экранируется испарившемся веществом, что характерно для углеводородных, водородных и т.д. макрочастиц, холодные электроны облака вносят основной вклад в ионизацию, более чем на порядок превышающий вклад горячих электронов фоновой плазмы.

В представленной работе обобщена модель нейтрального экранирования для различных материалов макрочастицы в широком диапазоне значений заряда ядра и энергии сублимации. Построены законы подобия, позволяющие с точностью до 15-30% (относительно расчетов по модели) оценивать скорость испарения примесной макрочастицы в случае сильного экранирования. Продемонстрировано, что учет эффекта электростатического экранирования, рассчитанного в рамках одномерного подхода, ухудшает согласие расчетной скорости испарения с экспериментальной и предложен механизм для объяснения этого явления.

Автором создана модель для расчета скорости испарения примесной макрочастицы одновременно с оценкой параметров пеллетного облака, с учетом нейтрального и плазменного экранирования. Скорость испарения, вычисленная по разработанной модели, а также расчетные значения радиуса и концентрации плазменного пеллетного облака хорошо согласуются с соответствующими величинами, измеренными на гелиотроне LHD в начальной фазе испарения, когда можно пренебречь влиянием быстрых частиц. В указанной фазе испарения наблюдалось отличие скорости испарения, рассчитанной по модели нейтрального экранирования, от измеренной в эксперименте в полтора-два раза. Учет плазменного экранирования позволил скорректировать это отличие.

Обоснованность полученных в работе результатов подтверждается сопоставлением с результатами экспериментальных измерений скорости испарения

макрочастиц из различных материалов, а также результатами спектроскопических исследований пеллетных облаков, полученных на установках для удержания высокотемпературной плазмы (T-10, Heliotron E, W7-AS, LHD, TFTR, ASDEX Upgrade).

Можно отметить высокий уровень выполненного исследования. Автореферат даёт полное представление о работе. В качестве недостатка можно отметить следующее:

1) В описании формулы (1) и Рисунка 2 на стр. 12-13 введены два разных обозначения для температуры облака, не расшифровано обозначение скорости  $u$ .

2) В тексте замечено некоторое количество опечаток, например, на стр. 11 «...способ пространственных измерений плотности температуры углеводородного пеллетного облака...». Вероятно, имелось в виду плотности  $I$  температуры.

Тем не менее, указанные замечания не являются существенными и не влияют на общее положительное впечатление от работы.

На основании автореферата можно сделать вывод, что работа удовлетворяет 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.

Заведующий Научной лабораторией перспективных методов исследования плазмы  
сферических токамаков

ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Ph.D.

Гончаров Павел Романович

ул. Политехническая, д. 29

тел.: +7 909 590 85 90

e-mail: P.Goncharov@spbstu.ru