

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего
образования «Санкт-
Петербургский
государственный университет»

С.В. Микушев

2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» на диссертацию 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.

Диссертационная работа О.А.Бахаревой посвящена развитию и применению диагностики функции распределения по энергиям быстрых ионов в современных установках по термоядерному синтезу, которая основана на перезарядке ионов в пеллетном облаке и последующей регистрации нейтральных атомов. Несмотря на то, что интенсивные работы по термоядерному синтезу начались еще в середине XX века, круг **актуальных задач**, связанных с ним, только расширяется. И одна из них – экспериментальное и теоретическое процессов при испарении макрочастиц в высокотемпературной плазме, поскольку первичный тепловой поток экранируется (ослабляется) нейтральным и плазменным облаком вблизи пеллеты. Ранее, в 80-90ых годах предполагалось, что экранирование связано с нейтральным облаком вблизи макрочастицы, однако последующее развитие исследований показало, что процесс испарения существенно сложнее. В частности, не существовало моделей, удовлетворительно описывающих скорость испарения и параметры пеллетного облака и, соответственно, не был решен вопрос о вычислении абсолютных значений доли нейтрализовавшихся на пеллетном облаке быстрых ионов. Ответы на эти вопросы и определяют **научную новизну** диссертационного исследования.

Диссертационная работа включает Введение, 4 главы, Заключение, Списка литературы.

1-ая глава носит обзорный характер и описывает текущее состояние исследований по темам, развиваемым в диссертации. Необычно большой объем главы (с.13-79) обусловлен спецификой работы – получение теоретически оправданных числовых оценок и выводов, основываясь на недавно полученных экспериментальных результатах. Обсуждаются существующие методики изучения испарения макрочастиц и модели нейтрального экранирования, а также диагностика функции распределения быстрых ионов в пеллетном облаке, основанная на перезарядке и последующей регистрации атомов перезарядки (Pellet Charge eXchange, PCX).

Современный, но ставший уже традиционным, путь решения задач с многофункциональными зависимостями, а именно такие задачи и возникают при анализе процессов взаимодействия плазмы с пеллетой, – компьютерный, который затрудняет сравнение, использование и обсуждение результатов, полученных на различных установках по термоядерному синтезу. В качестве решения в диссертации используется закон подобия (скейлинг), что позволило не только анализировать и использовать результаты, полученные на различных установках (стелларатор Wendelstein 7-AS, гелиотрон LHD, TFTR), но и придать выводам прогностический характер.

Во 2-ой главе описано количественное изучение структуры облаков у поверхности макрочастиц. Установлено, что экранирование первичных электронов в углеродном облаке в установке W7-AS слабое, так что вклады горячих электронов окружающей плазмы и холодных электронов пеллетного облака в ионизацию ионов C^{+} оказываются сопоставимыми, а также приводятся оценки характерных размеров однократно ионизованной части литиевого облака, наблюдавшегося при инъекции литиевой макрочастицы в плазму установки TFTR.

В главе 3 данные по измеренным скоростям испарений сопоставляются с результатами модельных оценок, полученных с использованием скейлинга.

В подпараграфе 3.1.4 предлагается модель для расчета скорости испарения примесных макрочастиц с учетом нейтрального и плазменного экранирования, которая описывает скорость испарения, характерные поперечный размер и концентрацию электронов облака. Установлено, что учет электростатического экранирования приводит к ухудшению согласия с экспериментальными данными как для тугоплавких макрочастиц с небольшим экранированием, так и для испарения макрочастиц с заметным экранированием. В подпараграфе 3.2.2 продемонстрировано, что для полистироловых макрочастиц, инжестированных в плазму установки LHD расчет по модели нейтрального и плазменного экранирования дает

результаты, согласующиеся с экспериментальными, полученными в начальной фазе испарения, когда скорость испарения определяется тепловыми электронами.

Результаты по обработке экспериментальных данных, полученных на установках T-10, Heliotron E, W7-AS, LHD, TFTR, ASDEX Upgrade приводят к выводу, что нейтральное облако вносит наибольший вклад в экранирование тепловых потоков фоновой плазмы, испаряющих макрочастицу, тогда как вклады дополнительных неучтенных механизмов, видимо, компенсируются.

Глава 4 посвящена изучению нейтрализации быстрых ионов в пеллетных облаках с целью дальнейшего развития РСХ диагностики.

В параграфе 4.1 описана методика определения распределений по энергии быстрых протонов на основе РСХ диагностики с инжекцией полистироловых макрочастиц на установке LHD. Основная трудность в определении распределений связана с тем, что нейтральная фракция быстрых частиц может меняться в зависимости от состава периферийного слоя углеводородного облака. В подпараграфе 4.2.1 изложена методика расчета энергетического спектра альфа-частиц с энергиями в диапазоне 0.2-4 МэВ для литиевого облака в качестве мишени для перезарядки. Подчеркивается, что трансформация функции распределения по энергиям претерпевает существенные изменения по мере прохождения внутренних областей и периферийного слоя литиевого облака, тогда как во всех предыдущих работах предполагалась однородность по пространству ионизационного состава облака. Корректный учет подобной трансформации позволил согласовать абсолютные значения спектра альфа-частиц, измеренного с помощью РСХ-диагностики, и теоретически рассчитанного спектра альфа-частиц по энергии, которые были получены для DT экспериментов на установке TFTR.

В **Заключении** диссертационной работы формулируются ее основные результаты.

Текст диссертации представлен на 173 печатных листах и включает список литературы (123 источника).

При переходе к общей оценке диссертационной работы О.А.Бахаревой следует отметить, что работа не следует традиционному канону работ, выполненных в Физико-техническом институте, – «описание нового прибора или экспериментальной установки, описание, что нового измерено и какая физика из этого следует». Очевидно, что современные установки по термоядерному синтезу, как и получаемые с их помощью экспериментальные данные, представляют собой результаты работы больших научных коллективов. Такое решительное изменение экспериментальной базы повлекло за собой и появление нового типа работ, которых трудно отнести к традиционным теоретическим или

экспериментальным. Скорее, это своеобразным и необходимый «интерфейсом» между теми и другими. Представляется, что диссертационная работа как раз может быть отнесена к работам такого рода.

В качестве недостатка отметим отсутствие обсуждения влияния перезарядки в возбужденные состояния при использовании метода РСХ. На Рис. 4-6 отсутствует обозначения кривых «e» и «f».

В целом, диссертационная работа О.А.Бахаревой представляет собой законченное научное исследование, направленное на решение важной и актуальной задачи. Результаты исследования отражены в 7 публикациях в профильных рецензируемых журналах, докладывались на всероссийских и международных конференциях. Автореферат диссертации корректно отражает ее содержание. Тема исследования соответствует заявленной научной специальности. Полученные **автором** результаты являются **новыми**, их **достоверность** обеспечивается разумным согласием с многочисленными экспериментальными данными, полученными на различных установках.

Результаты исследования могут быть использованы в научной работе профильных учреждений, таких как: Национальный исследовательский Центр «Курчатовский Институт», Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургский государственный университет и в других институтах и учреждениях, где проводятся работы по управляемому термоядерному синтезу.

Диссертационное исследование Бахаревой Ольги Александровны «Роль испаренного вещества при взаимодействии примесных макрочастиц с высокотемпературной плазмой установок с магнитным удержанием» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи, имеющее важное значение для физики высокотемпературной плазмы и устройств ее получения (токамаков). Работа соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Бахарева Ольга Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

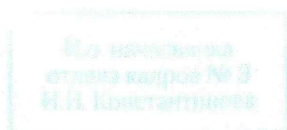
Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, профессором кафедры оптики, спектроскопии и физики плазмы Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего

образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
Девдариани Александром Зурабовичем.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры оптики, спектроскопии
и физики плазмы СПбГУ 30 октября 2024 г., протокол № 44/12/9-02-7.

Заведующий кафедрой оптики, спектроскопии
и физики плазмы СПбГУ, доктор
физико-математических наук, профессор _____ Н.А.
Тимофеев

Подпись заверяю:



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
университет»

Адрес: 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7-9-11.

Телефон +7 (812) 363-62-58

E-mail: science@spbu.ru