

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.03
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
по диссертации
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 19 декабря 2024 г. № 7

О присуждении Бахаревой Ольге Александровне,
гражданке Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Роль испаренного вещества при взаимодействии примесных макрочастиц с высокотемпературной плазмой установок с магнитным удержанием» по специальности 1.3.9 – «физика плазмы» принята к защите 3 октября 2024 г., протокол № 5, диссертационным советом ФТИ 34.01.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75, прил. 1 от 12 июля 2019 г., приказами Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 223 от 18.12.2023, № 177 от 11.10.2023, № 28 от 16.02.2023, № 41 от 25.02.2022, № 13 от 09.02.2021 об изменении состава диссертационного совета ФТИ 34.01.03 и приказом Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 160 от 21.12.2021 о внесении изменений в шифры специальностей диссертационных советов.

Соискатель Бахарева Ольга Александровна, 3 февраля 1976 года рождения, в 1999 году окончила магистратуру Санкт-Петербургского технического университета по направлению подготовки «техническая физика». В 2002 году окончила аспирантуру Санкт-Петербургского технического университета по направлению 01.04.08 - «Физика плазмы». Кандидатские экзамены, в том числе по специальности 1.3.9 – «физика плазмы», успешно сданы соискателем в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ Петра Великого) в 2024 году. В настоящее время соискатель работает в должности ведущего инженера научно-исследовательской лаборатории управляемого термоядерного синтеза Физико-механического института СПбПУ Петра Великого.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель – Сергеев Владимир Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор высшей школы фундаментальных физических исследований СПбПУ Петра Великого.

Официальные оппоненты:

1. Лисица Валерий Степанович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт», дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 3 замечания.

2. Аскинази Леонид Георгиевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе, дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 4 замечания.

Ведущая организация: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ) предоставила положительный отзыв на диссертацию, содержащий 2 замечания. Отзыв подготовил доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики, спектроскопии и физики плазмы СПбГУ, доктор физико-математических наук Девдариани Александр Зурабович. Отзыв подписал заведующий кафедрой оптики, спектроскопии и физики плазмы СПбГУ, доктор физико-математических наук, профессор Тимофеев Николай Александрович. Отзыв утверждён кандидатом физико-математических наук, проректором по научной работе СПбГУ Микушевым Сергеем Владимировичем. В заключении отзыва указано, что диссертационная работа Бахарева О.А. 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 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 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, а её автор Бахарева О.А. заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что оба имеют ученую степень доктора наук, работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают

высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет» является известным научно-учебным центром международного уровня, в котором ведутся теоретические и экспериментальные исследования по актуальным проблемам физики плазмы: элементарные процессы в плазме, кинетика заряженных и возбужденных частиц в плазме, диагностика плазмы, исследование физических процессов на границе плазма-поверхность твердого тела, процессы переноса в плазме, неравновесная плазма, плазма в условиях полного, локального, частичного термодинамического равновесия.

Кроме того, в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет» действуют диссертационные советы по физико-математическим специальностям.

Основное содержание диссертации представлено в 7 работах, индексируемых в базе данных Web of Science:

1. Tamura N., Sergeev V.Yu., Kalinina D.V., Miroshnikov I.V., Sato K., Sharov I.A., Bakhareva O.A., Ivanova D.M., Timokhin V.M., Sudo S., Kuteev B.V. Spectroscopic diagnostics for ablation cloud of tracer-encapsulated solid pellet in LHD //Review of Scientific Instruments. – 2008. – Vol. 79. – No. 10, – 10F541.

2. Бахарева О.А. и др. Исследование углеродных облаков в плазме стелларатора Wendelstein 7-AS //Физика плазмы. – 2005. – Т. 31. – №. 4. – С. 316-326.

3. Бахарева О.А., Сергеев В. Ю., Шаров И. А. О формировании плазменного облака при испарении макрочастицы в высокотемпературной замагниченной тороидальной плазме //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2023. – Т. 117. – №. 3.– С. 213-219.

4. Кутеев Б.В., Кострюков А.Ю., Бахарева О.А. Структура светящихся облаков вблизи испаряющейся водородной макрочастицы //Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72. – №. 8. – С. 1-6.

5. Сергеев В.Ю., Бахарева О.А., Кутеев Б.В., Тендлер М. Исследования испарения примесных макрочастиц в высокотемпературной плазме установок с магнитным удержанием //Физика плазмы. – 2006. – Т. 32. – №. 5. – С. 398-412.

6. Бахарева О.А., Сергеев В. Ю., Шаров И. А. Влияние облака вторичной плазмы на испарение макрочастиц в установках с магнитным удержанием //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2023. – Т. 118. – №. 10. – С. 725-732.

7. Бахарева О.А., Сергеев В. Ю., Шаров И. А. Особенности нейтрализации быстрых протонов в углеводородном пеллетном облаке //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2024. – Т. 119. – №. 11. – С. 810-816.

На автореферат поступило 4 отзыва.

1. Отзыв кандидата физико-математических наук, научного сотрудника лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе Белокурова Александра Александровича, положительный, содержит 1 замечание:

- Как показано на рисунке 4, расхождение ближе к центру между экспериментом и моделями нейтрального плазменного экранирования объясняется эффектами, связанными, с нейтральной инжекцией, однако даже с учетом расхождения из-за NBI в этой области модель только нейтрального экранирования даёт лучшее совпадение, чем модель нейтрального и плазменного экранирования, хотя наилучшее совпадение на периферии получается именно при использовании модели нейтрального и плазменного экранирования. Данный факт никак не прокомментирован.

2. Отзыв доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук Корешевой Елены Ростиславовны, положительный, содержит 1 замечание:

- Автореферат содержит некоторое количество орфографических ошибок в тексте, а также систематические ошибки в ссылках на иностранные журналы (например, где-то указывается ссылка на Nuclear Fusion, а где-то на Nuclear fusion и т.п.).

3. Отзыв PhD, заведующего научной лабораторией перспективных методов исследования плазмы сферических токамаков СПбПУ Петра Великого Гончарова Павла Романовича, положительный, содержит 2 замечания:

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

- В тексте замечено некоторое количество опечаток, например на стр. 11 способ пространственных измерений плотности температуры углеводородного пеллетного облака...». Вероятно, имелось в виду плотности и температуры.

4. Отзыв доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Отдела Физических Исследований Отделения Экспериментальной Физики Плазмы Комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт» Вершкова Владимира Александровича, положительный, содержит 3 замечания:

- В диссертации рассматривается вопрос о измерении функции распределения надтепловых ионов с помощью диагностики РСХ, однако не рассматривается влияние надтепловых ионов на процесс сгорания пеллеты.

- На стр.4 сказано: «тепловой поток может ослабляться из-за экранирования нейтральным и плазменным облаком, окружающим испаряющуюся макрочастицу (нейтральное и плазменное экранирование), а также под действием электростатической разности потенциалов, возникающей на границе облака и фоновой плазмы (электростатическое экранирование) (7).» Возможно правильнее уточнять, что речь о потоке электронов. Поскольку тепловой поток ионов упомянутая разность потенциалов будет несколько увеличивать.

- На стр.6 фигурирует термин «кривые испарения». По всей видимости, имеется в виду зависимость скорости испарения макрочастицы от времени, либо от её положения в установке. Однако это специфический жаргон, который может быть не вполне понятен тем, кто мало знаком с исследованиями испарения пеллет.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по диссертации «Роль испаренного вещества при взаимодействии примесных макрочастиц с высокотемпературной плазмой установок с магнитным удержанием» были получены следующие основные результаты:

1. Анализ результатов экспериментальных измерений размеров пеллетных облаков в спектральном диапазоне вблизи линии СII, а также результатов расчетов температуры и концентрации электронов в облаке показал, что для объяснения наблюдаемых в экспериментах продольных характерных длин спада излучения СII необходимо учитывать одновременно вклады горячих электронов плазмы разряда и холодных электронов облака. Особенно важен этот эффект в углеводородных облаках, в которых поток электронов горячей плазмы сильно экранируется облаком, и холодные электроны облака вносят основной вклад в ионизацию, более чем на порядок превышающий вклад горячих электронов плазмы разряда. В углеродных облаках вклады оказываются сопоставимыми.

2. Для широких диапазонов температуры (0.1 – 10 кэВ) и концентрации (10^{13} – 10^{14} см⁻³) высокотемпературной плазмы, для случаев,

когда функция распределения частиц близка максвелловской, модель нейтрального экранирования обобщена для различных материалов макрочастицы в широком диапазоне значений заряда ядра и энергии сублимации. Построены скейлинги, позволяющие с точностью до 15-30% (относительно расчетов по модели) оценивать скорость испарения примесной макрочастицы в приближении сильного экранирования. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных по испарению примесных макрочастиц в установках T-10, Heliotron E, W7-AS, LHD, TFTR, ASDEX Upgrade. Показано, что учет эффекта электростатического экранирования ухудшает согласие расчетной скорости испарения с экспериментальной, и предложен механизм для объяснения этого явления.

3. Создана модель для расчета скорости испарения примесной макрочастицы одновременно с оценкой параметров пеллетного облака, с учетом нейтрального и плазменного экранирования. Модель верифицирована на экспериментальных данных по испарению полистироловых макрочастиц на гелиотроне LHD. Скорость испарения, вычисленная по указанной модели, а также расчетные значения радиуса и концентрации плазменного пеллетного облака согласуются с экспериментально измеренными величинами в условиях, когда можно пренебречь влиянием быстрых частиц на испарение. При этом скорость испарения по модели только нейтрального экранирования, вычисленная в условиях отсутствия заметного влияния надтепловых частиц на испарение, превышает измеренные экспериментальные значения приблизительно в 1,5–2 раза.

4. Методика расчета потока нейтральных атомов, формирующегося при нейтрализации быстрых протонов на углеводородном облаке, усовершенствована путем учета пространственных распределений различных зарядовых состояний углерода и водорода в облаке. Это позволяет установить связь абсолютных значений распределения быстрых протонов фоновой плазмы по энергии в диапазоне 100-1000 кэВ с измеряемым распределением по энергии быстрых атомов водорода, которые регистрируются детектором нейтральных атомов. Обнаружен эффект влияния плотности, размера углеводородного пеллетного облака и зарядового состава его периферийного слоя на долю перезарядившихся быстрых частиц. Сформулированы рекомендации для оптимизации измерений распределения быстрых протонов по энергии при их перезарядке на углеводородных облаках.

5. Показано, что более корректный учет структуры литиевого пеллетного облака и его размеров, при вычислении доли перезарядившихся частиц, позволяет согласовать абсолютные значения энергетического спектра альфа-частиц в дейтериево-тритиевых

экспериментах на токамаке TFTR с данными других диагностик и расчетами.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенная модель испарения примесных макрочастиц может использоваться при планировании и интерпретации результатов экспериментов с инжекцией макрочастиц из различных материалов в высокотемпературную плазму с максвелловским распределением частиц по скоростям.

Результаты оценки относительной роли механизмов нейтрального и плазменного экранирования при испарении углеродных и полистироловых макрочастиц полезны для развития более сложных моделей испарения макрочастиц и их верификации.

Усовершенствованная методика расчета абсолютных значений функции распределения быстрых частиц, учитывающая ослабление потока этих частиц при многократном прохождении через облако, может быть использована для реализации пеллетной диагностики на установках с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы, в том числе на установках реакторного масштаба с альфа-частицами.

Сформулированные рекомендации по оптимизации диагностики перезарядки быстрых протонов на углеводородном пеллетном облаке могут быть полезны при планировании и реализации экспериментальных измерений абсолютных значений энергетических спектров быстрых протонов с использованием их перезарядки на углеводородных пеллетных облаках в условиях с дополнительным инжекционным и/или ионно-циклотронным нагревом в установках с магнитным удержанием плазмы.

Результаты работы могут быть использованы при реализации Федерального проекта №3 «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» в рамках комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации».

Достоверность результатов обеспечена проведением многочисленных измерений и сравнением с данными, полученными с применением независимых методов. Результаты согласуются с результатами исследований, которые были ранее представлены другими авторами.

Актуальность полученных результатов обоснована тем, что для развития такого перспективного метода управления параметрами разряда и их диагностики, как инжекция макрочастиц, необходимы модели, предсказывающие скорость испарения макрочастицы и параметры облака испаренного вещества. В частности, важным результатом работы

является улучшение метода РСХ диагностики, позволяющее приблизиться к возможности абсолютных измерений функции распределения быстрых ионов плазмы по энергиям, от которой принципиально зависит зажигание термоядерной реакции.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1. Методика расчета относительных вкладов горячих электронов окружающей плазмы и холодных электронов пеллетного облака в ионизацию первого иона углерода в пеллетном облаке. Демонстрация сопоставимого вклада обоих механизмов при формировании структуры углеродных пеллетных облаков и преобладания холодных электронов при формировании структуры углеводородных пеллетных облаков.

2. Модель, учитывающая нейтральное экранирование, для расчета скорости испарения примесных макрочастиц в широком диапазоне значений заряда ядра и энергии сублимации материала макрочастицы в высокотемпературной плазме с максвелловским распределением частиц по скоростям. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных о скорости испарения примесных макрочастиц в установках с магнитным удержанием плазмы: T-10, Heliotron E, W7-AS, LHD, TFTR, ASDEX Upgrade.

3. Модель для расчета скорости испарения примесной макрочастицы и параметров облака вблизи нее с одновременным учетом механизмов нейтрального и плазменного экранирования, позволяющая описать скорость испарения макрочастиц и параметры углеводородных облаков в плазме с максвелловским распределением частиц по скоростям.

4. Методика расчета нейтрализации быстрых ионов в пеллетных облаках для измерения их функции распределения по энергии. Демонстрация существенного влияния таких параметров пеллетного облака, как зарядовый состав, плотность и размеры, на величину доли перезарядившихся быстрых частиц. Предложения по оптимизации параметров РСХ диагностики для измерений функции распределения по энергии быстрых протонов, перезарядившихся на углеводородном пеллетном облаке.

5. Интерпретация измеренных с помощью РСХ диагностики абсолютных значений энергетического спектра альфа-частиц в дейтериево-третиевых экспериментах на токамаке TFTR, позволяющая согласовать их с данными других диагностик и результатами расчетов.

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно соискателем или при её активном участии, что указано в автореферате.

Автором:

1. Выполнен анализ данных по структуре углеродных облаков в стеллараторе W7-AS и углеводородных облаков в гелиотроне LHD. Выяснена роль вкладов горячих электронов окружающей плазмы и холодных электронов пеллетного облака в ионизацию первого иона

углерода при формировании структуры углеродных и углеводородных облаков.

2. Создана модель нейтрального экранирования для расчета скорости испарения примесных макрочастиц в широком диапазоне значений заряда ядра и энергии сублимации материала макрочастицы, инжектированной в высокотемпературную плазму с максвелловским распределением частиц по скоростям. Проведена верификация модели с использованием экспериментальных данных по испарению примесных макрочастиц в установках T-10, Heliotron E, W7-AS, LHD, TFTR, ASDEX Upgrade.

3. Создана модель для расчета скорости испарения примесной макрочастицы, одновременно с оценкой параметров пеллетного облака, с учетом нейтрального и плазменного экранирования, описывающая экспериментальные скорость испарения и параметры облака полистироловой макрочастицы, инжектированной в плазму LHD с максвелловским распределением частиц по скоростям.

4. Усовершенствована методика расчетов нейтрализации быстрых протонов на углеводородном облаке. Обнаружен эффект влияния зарядового состава пеллетного облака на величину доли перезарядившихся быстрых частиц. Сформулированы рекомендации для оптимизации измерений функции распределения по энергии быстрых протонов.

5. Уточнены детали структуры пеллетных облаков и нейтрализации быстрых частиц в них, которые позволяют улучшить согласование абсолютных значений энергетического спектра альфа-частиц, измеренного с помощью РСХ диагностики в дейтериево-третиевых экспериментах на токамаке TFTR, с данными других диагностик и расчетами.

Результаты диссертационной работы представлены на 16 научных конференциях и семинарах:

□ 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 38 международные конференции Европейского физического общества по физике плазмы и УТС (Фуншал, Португалия, 2001 г.; Монтре, Швейцария, 2002 г.; Санкт-Петербург, Россия 2003 г; Лондон, Великобритания, 2004 г.; Рим, Италия, 2006 г.; Варшава, Польша, 2007 г.; Херсониссос, Крит, Греция, 2008 г; Страсбург, Франция, 2011 г.);

□ XXVII, XXVIII, XXIX, XXX, XXXI международные Звенигородские конференции по физике плазмы и УТС (2000, 2001, 2002, 2003, 2004 гг.);

□ 17-я тематическая конференция по диагностике высокотемпературной плазмы 2008(Альбукерке)

□ конференции Американского физического общества (1999 и 2000 гг.).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 10 докторов по специальности 1.3.9 – «физика плазмы», участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 18, против – 0, недействительный бюллетень – 1.

На заседании 19 декабря 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Бахаревой О.А. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «физика плазмы».

Председатель диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

О.С. Васютинский

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук

И.А. Горбунова

19 декабря 2024 г.