На правах рукописи

Скоков Вячеслав Геннадьевич

# ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ИНЖЕКЦИИ УГЛЕРОДА И ЛИТИЯ В ВИДЕ МАКРОЧАСТИЦ И ПЫЛЕВЫХ СТРУЙ В УСТАНОВКИ С МАГНИТНЫМ УДЕРЖАНИЕМ ПЛАЗМЫ

Специальность 01.04.08 – Физика плазмы

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

()

Санкт-Петербург 2018 Работа федеральном выполнена государственном В автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО СПбПУ) Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика плазмы» ΦΓΑΟΥ ΒΟ СΠ6ΠΥ Сергеев Владимир Юрьевич Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук, начальник лаборатории НИЦ «Курчатовский институт» Вершков Владимир Александрович Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики плазмы НИЯУ МИФИ Гаспарян Юрий Микаэлович Акционерное общество Ведущая организация:

Защита состоится «05» июня 2018 г. в 13:00 на заседании Диссертационного Д002.205.03 при Федеральном государственном Совета бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 26. С диссертацией можно ознакомиться библиотеке Федерального В государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_ 2018 г.

институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук и на сайте www.ioffe.ru

Ученый секретарь

диссертационного совета

Кандидат физико-математических наук

Altan

«НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»

Красильщиков А.М.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

#### Актуальность темы

Использование примесных частиц в виде атомов, молекул, пыли, жидких струй и макрочастиц (пеллетов) является одним из важных методов управления и диагностики разряда высокотемпературной плазмы в установках с магнитным удержанием. Скорости испарения и глубины проникновения инжектируемого вещества внутрь плазменного шнура являются важнейшими параметрами, определяющими характер его взаимодействия с плазмой и возможности применений инжекционных технологий. Создание моделей, описывающих процессы при взаимодействии инжектируемого вещества с плазмой, позволит улучшить использование примесных инжекционных технологий в современных и будущих установках с магнитным удержанием, включая термоядерные реакторы.

При широком использовании примеси лития как средства улучшения характеристик разряда до сих пор происходит поиск оптимальных способов и параметров инжекции этого вещества в камеру токамака. Такой важный для управления разрядом процесс, как рециклинг рабочего газа, на который может заметно влиять присутствие лития в установке, исследуется зачастую лишь качественно. Поэтому исследование процессов литиизации разряда и создание моделей, позволяющих описать эволюцию материального баланса плазмы в присутствии лития, представляются весьма актуальными. Исследованиям и решению перечисленных выше задач отводится значительная роль в программе создания управляемого термоядерного синтеза в нашей стране и за рубежом [А9].

#### Цель и задачи исследования

Целью данной работы было исследование физических процессов при инжекции углерода и лития в виде макрочастиц и пылевых струй в установки с магнитным удержанием. Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Экспериментальные исследования физических процессов при инжекции углеродных макрочастиц в плазму стелларатора Wendelstein 7-AS и токамака T-10. 2. Разработка аппаратуры для инжекции литиевых макрочастиц и пылевых струй. Проведение экспериментов с ее использованием на токамаке T-10 для управления параметрами разряда.

3. Создание моделей для описания наблюдаемых процессов и явлений при взаимодействии инжектированного вещества с плазмой.

#### Методы исследования

Результаты, представленные в данной работе, получены с помощью спектроскопических (линии излучения рабочего газа – водород, дейтерий; вносимого вещества – углерод, литий; основной примеси установки – углерод и др.) и микроволновых (вторая гармоника электрон-циклотронной частоты, СВЧ-интерферометр и др.) методов исследования плазмы, а также различных методов инжекции вещества (пыль, макрочастицы) в высокотемпературную плазму токамака.

### Научная новизна и научно-практическое значение результатов работы

Впервые были обнаружены новые режимы испарения углеродных макрочастиц. Выяснены физические механизмы обнаруженных особенностей испарения, которые заметно влияют на глубину проникновения макрочастиц и профили депозиции инжектированного вещества.

При инжекции сферических углеродных макрочастиц диаметром более 300 мкм в плазму токамака Т-10 экспериментально обнаружено возникновение узколокализованных участков, в которых наблюдаются быстрые изменения скорости испарения макрочастиц и профиля температуры электронов. Разработана модель, описывающая наблюдаемые явления в предположении развития быстрых МГД-процессов, инициируемых макрочастицей в районе рациональных магнитных поверхностей.

Разработана методика пассивирования литиевых макрочастиц, снижающая химическую активность лития и увеличивающая надежность работы инжектора в эксперименте. Разработана оригинальная конструкция для инжекции литиевой пылевой струи. Впервые проведены эксперименты по инжекции литиевой пылевой струи в лимитерный токамак T-10.

Количественно описана эволюция содержания частиц рабочего газа, лития и углерода в плазме T-10 с помощью нульмерного моделирования. Показано, что наиболее эффективным инструментом для управления материальным балансом плазмы является инжекция литиевой пыли.

## Достоверность научных результатов

результатов Достоверность полученных обусловлена применением современных методов, сопоставлением математических результатов моделирования с экспериментальными данными автора, а также сравнением с результатами, полученными другими исследователями. Описываемые в работе результаты опубликованы в реферируемых журналах, представлены на международных конференциях, семинарах и совещаниях кафедры физики плазмы ИФНиТ СПбПУ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе и Института физики токамаков НИЦ «Курчатовский Институт».

## Положения, выносимые на защиту

1. Обнаружение и интерпретация изменения режима испарения углеродных макрочастиц в плазме токамака Т-10 с увеличением их размера.

2. Выявление и объяснение режима испарения углеродных макрочастиц с эмиссией крупинок в плотной плазме стелларатора Wendelstein 7-AS с мощным нейтральным нагревом.

3. Создание методики пассивирования твердотельных литиевых макрочастиц, которая снижает химическую активность лития и существенно увеличивает надежность работы инжектора в эксперименте. Разработка оригинального устройства для инжекции литиевой пылевой струи.

4. Измерение и интерпретация поведения плотностей и потоков частиц рабочего газа и примесей при инжекции в плазму токамака Т-10 литиевых макрочастиц и литиевых пылевых струй с целью управления разрядом токамака. Обнаружение инжекции литиевой пыли как наиболее эффективного инструмента для управления материальным балансом плазмы токамака Т-10.

## Апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы были представлены на 14 научных конференциях и семинарах:

- 30, 31, 32, 33, 34, 38, 39 международные конференции Европейского физического общества по физике плазмы и УТС (Санкт-Петербург, Россия, 2003 г; Лондон, Великобритания, 2004 г.; Таррагона, Испания, 2005 г., Рим, Италия, 2006 г.; Варшава, Польша, 2007 г.; Страсбург, Франция, 2011 г.; Стокгольм, Швеция, 2012 г.)
- 21, 22 международные конференции МАГАТЭ по энергии термоядерного синтеза (Ченгду, Китай, 2006 г.; Женева, Швейцария, 2008 г.)

- XXXIV, XXXVIII, XXXIX международные Звенигородские конференции по физике плазмы и УТС (2007 г., 2011 г., 2012 г.)
- 22 международная конференция в Токи «Перекрестная проверка эксперимента и моделирования для плазмы УТС и астрофизической плазмы» (Токи, Япония, 2012 г.)
- 3 международный симпозиум по литиевым приложениям для установок термоядерного синтеза (Фраскати, Италия, 2013 г.)

Основное содержание диссертации опубликовано в 9 печатных работах в журналах из перечня ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (136 литературных источников), изложена на 174 страницах, включает 60 рисунков и 5 таблиц.

## Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность и сформулирована постановка задачи исследований инжекции примесного вещества в токамак и стелларатор в рамках работ по созданию управляемого термоядерного реактора.

В Главе 1 дан обзор литературы по тематике исследований. В первом параграфе обсуждены основные возможности управления разрядом установок с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы с помощью инжекции примеси, и процессы, оказывающие влияние на испарение макрочастицы. Во втором параграфе описаны разработанные методики управления разрядом с помощью литиевых технологий, и проанализирована их применимость на современных установках. В третьем параграфе сформулированы выводы и постановка задачи.

Глава 2 посвящена описанию методики и техники экспериментов. Дана информация о технических характеристиках установок T-10 и Wendelstein 7-AS и их диагностических комплексов, которые использованы в диссертации. Описана система инжекции диагностических макрочастиц ДИМ-6, применявшаяся на обеих установках (диаметры инжектируемых макрочастиц 0.2-0.7 мм, скорость 100-600 м/с). Даны оценки допустимых параметров инжекции лития для экспериментов по управлению разрядом токамака:  $(0.4 \div 2.5) \times 10^{19}$  атомов импульсно при использовании макрочастиц, либо потоки  $(0.1 \div 10) \times 10^{20}$  ат/с лития длительностью до 500 мс в виде пыли.

В проведенных экспериментах материалами, инжектируемыми в плазму токамака Т-10 с помощью ДИМ-6, были углерод и литий. Углеродные макрочастицы имели сферическую форму диаметром 0.2÷0.7 мм И изготавливались промышленно. Литиевые макрочастицы из-за значительной химической активности изготавливались перед экспериментом с помощью разработанных специально для этой цели инструментов. Во избежание реагирования помещенных в зарядное устройство инжектора макрочастиц с остаточными атмосферными газами, они предварительно пассивировались в осушенной атмосфере. При этом на них формировалась пленка Li<sub>3</sub>N толщиной в несколько мкм. Полученные таким образом макрочастицы могли находиться в зарядном устройстве инжектора до 4 часов без заметного взаимодействия с парами воды, что использовалось в экспериментах по инжекции литиевых макрочастиц в установке Т-10.

Была создана система инжекции металлической литиевой пыли и аппаратура для ее использования на токамаке Т-10. Принцип его работы заключается В переходе ОТ трения покоя между частицами пыли, наполняющими барабанный бункер инжектора, к трению скольжения при вращении бункера. Выходящий поток пыли можно было регулировать как грубо, с помощью изменения угла наклона оси вращения, так и плавно, методом изменения скорости вращения бункера. Это позволяло варьировать значения потока лития в пределах (0.1÷20)×10<sup>20</sup> ат/с, что достаточно для экспериментов. Скорость покидающих инжектор пылевых частиц определялась гравитацией (высота падения от инжектора до плазмы ~1 м, итоговая скорость до 5 м/с). Была разработана процедура зарядки системы инжекции и подготовки ее к работе. Оценены потери литиевой пыли между выходом бункера и плазмой. Разработана система синхронизации инжектора пыли с разрядом токамака Т-10 [A5, A6].

В Главе 3 представлены результаты, полученные в ходе экспериментов по углеродной инжекции. В первом параграфе описаны наблюдения, сделанные при инжекции в плазму Т-10. Сферические углеродные макрочастицы с диаметрами, изменявшимися в пределах от 0.20 до 0.62 мм, что соответствует содержанию от  $1.9 \times 10^{17}$  до  $5.6 \times 10^{18}$  атомов углерода, ускорялись до 350-450 м/с и инжектировались сверху в направлении оси плазменного шнура. Параметры плазмы: омический нагрев, средняя плотность  $2.2 \times 10^{13}$  см<sup>-3</sup> (полное число электронов в разряде  $5.8 \times 10^{19}$ ), электронная температура в центре около 1.2 кэВ,

7

ток по плазме 270 кА. В экспериментах было обнаружено появление зон повышенного и пониженного испарения по сравнению с моделью нейтрального экранирования. Появление указанных зон имело четко выраженный пороговый эффект по размеру макрочастиц. Профили скорости испарения макрочастиц диаметром выше  $0.3 \div 0.35$  мм (содержание электронов  $3.8 \times 10^{18} \div 6.1 \times 10^{18}$  шт. соответственно) начинали демонстрировать локализованные всплески и провалы испарения, в то время как меньшие макрочастицы в большинстве случаев испарялись без всплесков.

Анализ спада сигналов электрон-циклотронного излучения (ЭЦИ) на многоканальном приемнике показал, что положения обнаруженных зон повышенного испарения коррелируют с зонами быстрой перестройки профиля электронной температуры при движении макрочастицы вглубь плазмы. При этом время спада температуры на соседних каналах приемника оказывается на этих участках в несколько раз меньше времени, за которое макрочастица преодолевает расстояние между этими каналами.

Для объяснения обнаруженных явлений, - скачков скорости испарения быстрой перестройки электронной температуры, - была предложена модель, магнитных учитывающая перезамыкания поверхностей, вызванные макрочастицей, проходящей через области с рациональными значениями запаса устойчивости. Макрочастица охлаждает плазму и добавляет в нее примесь, тем самым увеличивая эффективный заряд плазмы Z<sub>eff</sub>. Охлаждение плазмы и рост Z<sub>eff</sub> приводят к росту резистивности η [1] и электрического поля и формированию магнитных островов вблизи рациональных поверхностей. Такой эффект может быть весьма существен: для типичных условий токамака резистивное время может уменьшиться в 10<sup>3</sup> ÷ 10<sup>4</sup> раз, поскольку вблизи макрочастицы температура электронов может составлять менее 10 эВ. Оценки характерного времени роста тиринг-моды [1] показывают, что на середине малого радиуса омической плазмы Т-10 значения этого времени изменяются от  $\approx 20 \div 30$  MC перед до ≈ 10÷20 мкс инжекцией вблизи инжектируемой макрочастицы, что подтверждается трехмерным МГД-моделированием процесса инициирования неустойчивости при инжекции макрочастиц [2].

Для расчета скорости испарения, зависящей от концентрации и температуры электронов плазмы, а также размера макрочастицы в месте ее нахождения, была использована модель нейтрального экранирования (МНЭ) [3].

8

От границы плазмы до места, где наблюдались скачки скорости испарения, ее эволюция рассчитана по невозмущенным значениям плотности и температуры электронов. Ширина островов тиринг-моды w для условий T-10 по данным работы [4] составляла 3÷5 см. Это также примерно соответствовало наблюдаемым расстояниям между пиками на скорости испарения (см. Рис. 1, положения тиринг-мод). Исходя из оцененной скорости роста тиринг-моды, время формирования острова заметно меньше времени ≈ 100 мкс. необходимого макрочастице для пересечения острова. Поэтому в модели было сделано предположение, что острова развиваются, когда макрочастица попадает на рациональную магнитную поверхность с q=2, 3/2, 4/3 и 5/4, и далее летит по сформировавшемуся острову. Перемешивание плазмы в зонах перезамыкания формировало новые профили ne и Te перед макрочастицей на глубину w/2.



Рис. 1. Результаты моделирования испарения макрочастицы с учетом перезамыкания в процессе ее проникновения в плазму. Скорость макрочастицы  $V_{pel} = 383$  м/с, диаметр 0.50 мм.

В оценках полагалась ионизация испаренного углерода до зарядового состояния *Z*, которое в расчетах варьировалось в пределах от 2 до 6. Кроме того, требовалось учесть суммарные потери на ионизацию примеси и радиационное охлаждение плазмы *L*. Исходя из опубликованных данных [5], при возрастании электронной температуры от 100 до 1000 эВ это значение плавно эволюционирует от 9 до 3 кэВ на атом испаренного углерода.

Рис. 1 иллюстрирует результаты расчетов по предложенной модели для трех наборов параметров: Z = 2, L = 5 кэВ/атом; Z = 3, L = 6 кэВ/атом; Z = 6, L = 7 кэВ/атом. Здесь экспериментально измеренная скорость испарения (тонкая сплошная линия) была сравнена с результатами расчетов по МНЭ без (жирная сплошная) и с учетом эффектов перезамыкания для перечисленных наборов параметров (пунктирная, штриховая и штрихпунктирная соответственно).

Видно, что модель с перезамыканием разумно описывала наблюдаемые резкие изменения скорости испарения. Воспроизводилась и форма с начальным скачком скорости испарения в момент старта тиринг-процесса и последующим медленным спадом. Эффект перезамыкания по Кадомцеву [6], ответственный за снижение скорости испарения макрочастицы внутри поверхности q = 1, ясно виден по экспериментальным данным и также удовлетворительно описывается моделью [А3].

Обнаруженные явления при взаимодействии макрочастицы с плазмой, которые можно связать с пороговыми процессами, существенно изменяют представления об условиях испарения инжектированных макрочастиц в токамаке. Наблюдаемые процессы обеспечивают более глубокое проникновение макрочастицы, а, следовательно, дают возможность, например, вносить вещество глубже в плазму, что может быть важно для эффективности ввода топлива в реактор.

Во втором параграфе данной главы обсужден не отмечавшийся ранее тип испарения углеродной макрочастицы в плотной плазме с мощным нейтральным (NBI) нагревом, связанный с эмиссией с поверхности макрочастицы углеродных макроскопических чешуек.

В ходе эксперимента сферические углеродные макрочастицы диаметром 0.35 ÷ 0.41 мм с помощью легкогазового инжектора инжектировались со скоростями 250 ÷ 300 м/с в плазму стелларатора Wendelstein 7-AS [A1, A2]. Макрочастицы взаимодействовали с дейтериевой плазмой, нагреваемой интенсивным пучком нейтральных атомов дейтерия (NBI) и незначительной ВЧ-мощностью на ионной циклотронной частоте (ICRH). Параметры разряда были следующими:  $n_e(0) = (7.9 \div 11.5) \times 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $T_e(0) = 300 \div 450$  eV,  $P_{NBI} = 1.75$ ·MBT при ускоряющем напряжении 56 кВ,  $P_{ICRH} = (0.1 \div 0.5)$  МВт на второй гармонике водорода. Фотографирование процесса инжекции в плазму показало, что на фоне основной видимой траектории наблюдаются траектории крупинок (микропеллетов), эмитированных с поверхности основной макрочастицы.

Необходимо отметить, что описываемое явление наблюдалось только в разрядах с нагревом пучком нейтральных атомов в условиях высокой плотности плазмы и относительно низкой электронной температуры. В таком случае источник тепла, производимый внутри макрочастицы за счет быстрых ионов, оказывается ближе к поверхности, чем за счет электронов. Высокий температурный градиент на поверхности углеродной макрочастицы может инициировать ее хрупкое разрушение и эмиссию продуктов эрозии поверхности, наблюдавшиеся в экспериментах.

Скорости микропеллетов рассчитывались с учетом предположения о том, что они покидают поверхность макрочастицы в направлении, нормальном к ее траектории в плоскости снимка. Оцененные нормальные к поверхности основной макрочастицы скорости крупинок лежат в пределах 150 ÷ 350 м/с, что близко к значениям (240 ÷ 260 м/с), предсказываемым моделью хрупкого разрушения углерода [7]. Размеры крупинок были оценены двумя методами: по отношению интегральных интенсивностей излучения макрочастицы И крупинки, трек которой можно выделить с достаточной точностью, и по глубин проникновения крупинки с помощью моделированию модели нейтрального экранирования. В первом случае размеры крупинок составили 20-40 мкм, во втором – 40 ÷ 50 мкм [А4], что соответствует размерам крупной фракции, наблюдения которой упомянуты в работе [7].

В Главе 4 описаны результаты исследований управления разрядом токамака с использованием инжекции лития, которые были мотивированы успешными результатами экспериментов по инжекции литиевых макрочастиц в TFTR [8], где удалось заметно снизить потоки дейтерия и углерода в плазму. Эксперименты на T-10 проводились на квазистационарной стадии разряда, в которых на 600 мс отключался газовый клапан для независимой оценки по распаду плотности коэффициента  $R_i$  – отношения потока частиц сорта «*i*» внутрь плазмы со стенки к потоку частиц того же сорта из плазмы через последнюю замкнутую магнитную поверхность (LCMS).

Цилиндрические литиевые макрочастицы диаметром 0.75 мм и длиной 0.9±0.1 мм, что соответствует содержанию в них  $(1.6 \div 2.0) \times 10^{19}$  атомов лития, инжектировались в плазму на 600 мс. После серии 4 последовательных литиевых инжекций наблюдалось снижение  $R_D$  со значений 1.01 (без лития) до 0.98. При этом заметного снижения содержания основной примеси (углерода) в плазме не наблюдалось. После прекращения инжекция лития через 2-3 разряда

значения  $R_D$  восстанавливались. Таким образом, положительный эффект по сравнению с TFTR [8] оказался незначительным. Возможными причинами являлись небольшое по сравнению с TFTR относительное количество инжектированного лития, а также сценарий выключения разряда T-10, который, по-видимому, приводил к удалению лития, осажденного на контактирующие с плазмой поверхности.

Инжекция литиевых пылевых струй активно применяется для управления разрядом (рециклинг рабочего газа, ELMs и др.) современных токамаков – NSTX [9], EAST [10], DIII-D [11]. В отличие от перечисленных установок с дивертором, эксперименты с инжектированием литиевых пылевых струй в данной работе проводились на лимитерном токамаке T-10 в разряды с омическим нагревом и в разряды с дополнительным ЭЦР нагревом (ЭЦРН). Характерные параметры разрядов были следующими: большой радиус плазмы 150 см, малый радиус плазмы 30 см, средняя плотность плазмы 2·10<sup>13</sup> см<sup>-3</sup>, ток по плазме 200 либо 250 кА, тороидальное поле 2.4 ÷ 2.5 Тл. Мощность омического нагрева составляла  $\cong$  0.3 МВт. Инжекция проводилась, начиная с 500 ÷ 550 мс разряда, когда плотность выходила на заданное программой квазистационарное значение. Большинство экспериментов выполнялось с длительностью инжекции до 500 мс. Было показано, что инжекция потока литиевой пыли до ~5×10<sup>20</sup> ат/с не приводила к срыву разряда токамака [А7].

Временная эволюция параметров плазмы при инжекции 4.8×10<sup>19</sup> ат/с лития в плазму в разряде 61648 представлена на Рис. 2 черными сплошными кривыми в сопоставлении с реперным разрядом 61645 без инжекции лития (серые штриховые кривые). Вертикальными штриховыми линиями выделено три стадии взаимодействия лития с плазмой: стадия А от 500 мс (начало инжекции) до 750 мс – стадия монотонного небольшого изменения параметров разряда; стадия В от 750 до 800 мс – значительного изменения параметров разряда; стадия С от 800 до 1000 мс – распада плотности в конце разряда.

Пыль достигала плазмы примерно с 600 мс, как видно из графика (b), показывающего излучение из плазмы на линии LiII 5485 Å. Во время инжекции плотность плазмы (a) немного нарастала, приводя к снижению потока дейтерия из системы газонапуска (d), управляемой системой обратной связи, запрограммированной на поддержание постоянной плотности. Отключение

газонапуска на 800 мс позволило проследить за распадом плотности. Можно заметить, что снижение плотности начиналось до этого момента, что ассоциируется не только с уменьшением притока лития, но и с ожидаемым уменьшением потока рабочего газа в плазму. Излучение на линии  $D_{\beta}$  4860 Å с рельсового лимитера (е) и на линии СІІІ 4647 Å (с) в том же сечении "A" снижались в сравнении с реперным разрядом вплоть до момента времени 750 мс. Снижение излучения СІІІ подтверждало уменьшение выхода примеси с обращенных к плазме компонентов вакуумной камеры установки. С другой стороны, это происходило одновременно с ростом излучения континуума 5235 Å (f), что показывало рост эффективного заряда плазмы  $Z_{eff}$  на фоне весьма слабого возмущения периферийной электронной температуры (g).



Рис. 2. Эволюция основных параметров плазмы в реперном разряде 61645 (серые штриховые кривые) в сравнении с разрядом 61648 (черные сплошные кривые). (а) – среднехордовая плотность, (b) – излучение на линии лития LiII (5485 Å), (c) – излучение на линии углерода CIII (4647 Å), (d) – газонапуск в разряд, (e) – излучение на линии дейтерия  $D_{\beta}$  (4860 Å), (f) – излучение в непрерывном спектре (5235 Å), (g) – периферийная электронная температура, (h) – сигнал с магнитных зондов.

Примерно после 750 мс начиналось заметное уменьшение поступления лития в плазму (стадия В). Это приводило к уменьшению излучения на линии континуума и росту периферийной температуры при примерно постоянной плотности. Однако наиболее сложным образом вело себя излучение в линии D<sub>β</sub>.

На примере кривых (d) и (e) для реперного разряда можно заметить, что, когда поток газа уменьшался на 400 мс при выходе плотности на плато, и когда он отключался на 800 мс, излучение на линии  $D_{\beta}$  возрастало, причем с некоторой задержкой, связанной с вытеканием остаточного газа из клапана его подачи. То есть небольшой рост температуры на периферии в указанные моменты времени в реперном разряде (кривая g) приводил к значительному росту излучения  $D_{\beta}$ .

В прекращения литиевой инжекции случае также снимался дополнительный периферийный охлаждающий фактор, что приводило к уже упомянутому росту температуры. С ним можно связать наблюдавшийся на 750 мс резкий рост излучения в линии D<sub>6</sub>. Таким образом, в данном случае мы имеем дело с достаточно сложным процессом, который предлагаемая ниже нульмерная модель описать оказывается не в состоянии. В связи с этим, результаты моделирования приводятся только до 750 мс. Начиная с 800 мс. напуск рабочего газа прекращался с целью изучения характерного времени распада плотности плазмы (стадия С). На ней температура также возрастала, и нульмерное моделирование не производилось.

При моделировании использовались экспериментальные данные о том, что в этих разрядах с 500 мс по 750 мс форма профилей электронных температуры и плотности практически не менялась. Это позволило использовать нульмерный подход при анализе уравнений баланса для описания временной эволюции содержания частиц сорта «*i*» (D, C и Li) во время разряда:

$$\frac{dN_i}{dt} = \Gamma_i^{in} - \Gamma_i^{out} = \Gamma_i^{in,puff} + \Gamma_i^{in,wall} - \frac{N_i}{\tau_p} = \Gamma_i^{in,puff} + R_i \frac{N_i}{\tau_p} - \frac{N_i}{\tau_p}$$
(1).

Здесь,  $N_i$  – полное число частиц сорта «*i*»,  $\Gamma_i^{out}$  - поток частиц из плазмы через LCMS – брался в виде  $N_i/\tau_p$ ,  $\tau_p$  - время удержания частиц (полагалось одинаковым для всех сортов частиц и равным времени удержания энергии 30 мс, рассчитанному по скейлингу [1] для омического разряда T-10),  $\Gamma_i^{in}$  - поток частиц в плазму через LCMS, который состоял из  $\Gamma_i^{in,puff}$  от газового клапана и потока  $\Gamma_i^{in,wall} = R_i \Gamma_i^{out}$  со стенки.

Моделирование было проведено в два этапа – первый для разряда без лития, второй для разряда с инжекцией. На первом этапе для реперного разряда 61645 было рассчитано содержание частиц для рабочего газа дейтерия и основной примеси (углерода). Второй этап выполнялся для разрядов с

инжекцией лития, в ходе которого устанавливалось содержание дейтерия, углерода и лития, а также для проверки рассчитывался эффективный заряд. Из уравнения баланса (1) для D была оценена эволюция  $R_D$ . На максимуме инжекции, в районе 700 мс, в данном разряде  $R_D$  снизилось с 0.93 до 0.83 [A8].

Так как на 800 мс разряда газовый клапан отключался (см. Рис. 2), а к 900 мс практически прекращалось внесение лития в плазму, можно было также оценить изменение  $R_D$  по характерному времени распада плотности. Таблица 1 сопоставляет результаты оценок  $R_D$  из нульмерного моделирования и из анализа динамики распада плотности плазмы.

Таблица 1. Количество инжектированных атомов лития  $N_{Li}$ , и значения коэффициента  $R_D$  для дейтерия.

Номер	$N_{Li}$ ,	<i>R</i> <sub>D</sub> (из баланса частиц,	<i>R</i> <sub>D</sub> (из анализа распада
импульса	10 <sup>19</sup> ат.	на 700 мс)	плотности, на 900 мс)
61645	0	0.92±0.02	0.94±0.01
61647	1.2±0.4	0.87±0.02	0.92±0.01
61646	2.5±0.4	0.84±0.02	0.90±0.01
61649	3.2±0.4	0.84±0.02	0.89±0.01
61648	4.8±0.4	0.83±0.02	0.87±0.01
61651	10.0±0.4	0.80±0.02	0.84±0.01

Видно, что значения  $R_D$  рабочего газа коррелировали с количеством внесенного в плазму лития. В реперном разряде расхождение между методиками находится внутри погрешности, определяемой варьированием входных параметров моделирования. Видно также, что значение  $R_D$  с увеличением потока лития снижалось. Разница в оцененных величинах  $R_D$ , повидимому, объясняется различными моментами их определения, в частности, расчет из распада плотности на 900 мс производился, когда литий уже уходил из разряда.

Полученный результат можно сравнить с опубликованными ранее данными литиизации на T-10 с помощью литиевого испарителя [12]. После сеанса испарения  $R_D$  составил 0.86, а затем начал расти от разряда к разряду, пока не вышел обратно на стандартный уровень около 0.92 через 5 импульсов. Таким образом, обе техники позволяют достичь примерно одинаковых

результатов — снижения  $R_D$  на 0.06-0.08. Примерно такие же значения снижения  $R_D$  были получены при литиизации токамаков NSTX [13] и EAST [14].

Необходимо отметить, что в ходе экспериментов практически не было зарегистрировано кумулятивного эффекта накопления лития на обращенных к плазме поверхностях от разряда к разряду. Это, по-видимому, связано со сценарием выключения разряда токамака T-10, так же, как и в случае инжекции литиевых макрочастиц.

В Заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Обнаружен новый режим испарения углеродных макрочастиц в плотной плазме стелларатора Wendelstein 7-AS с мощным NBI-нагревом, отличающийся эмиссией углеродных фрагментов с поверхности макрочастицы. Выполнены экспериментальные оценки скорости около 250 м/с и размеров 20-50 мкм эмитируемых фрагментов, которые совпадают с предсказаниями модели хрупкого разрушения углерода.

2. При инжекции углеродных макрочастиц диаметром более 300 мкм в плазму токамака T-10 с омическим нагревом обнаружено появление узколокализованных участков, в которых наблюдались быстрые изменения скорости испарения макрочастиц и профиля температуры электронов. Предложена модель наблюдаемых явлений, предполагающая развитие быстрых МГД-процессов типа тиринг-неустойчивости, инициируемых макрочастицей в районе рациональных магнитных поверхностей.

3. Создана методика пассивирования твердотельных литиевых макрочастиц, которая снижает химическую активность лития и существенно увеличивает надежность работы инжектора в эксперименте.

4. Разработана конструкция для инжекции литиевой пылевой струи, позволяющая вносить в плазму литий со скоростью около 5 м/с и потоком  $(0.1 \div 20) \times 10^{20}$  ат/с.

5. Проведены эксперименты по инжекции в плазму токамака T-10 литиевых макрочастиц и литиевых пылевых струй с целью управления параметрами разряда токамака. Развито количественное описание эволюции содержания частиц рабочего газа и примесей в плазме T-10 с помощью нульмерного моделирования. Показано, что отношение потоков частиц рабочего газа в плазму и из плазмы снижается на 5-10% при инжекции лития. Это снижение

подтверждено оценками, выполненными на основе динамики распада плотности плазмы при выключении газонапуска.

#### Список цитируемой литературы

1. Wesson J. Tokamaks. Oxford: Clarendon Press, 2004.

2. Ivanov A.A., Martynov A.A., Medvedev S.Yu., et al., 34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw, 2 – 6 July 2007, P-4.069.

3. Сергеев В. Ю., Бахарева О. А., Кутеев Б. В., и др. Физика плазмы, 2006, т.32, стр.398.

4. Ivanov N. V., Kakurin A. M. 38th EPS Conference on Plasma Physics, Strasbourg, 27 June – 1 July 2011, P2.080.

5. Mirnov S. V., Azizov E. A., Evtikhin V. A., et al. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2006, Vol.48, p.821.

6. Кадомцев Б. Б. Физика плазмы, 1975, т.1, с.710.

7. Мартыненко Ю. В., Московкин П. Г. ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 1999, вып. 2, стр.31.

8. Mansfield D. K., Hill K. W., Strachan J. D., et al. Physics of Plasmas, 1996, Vol.3, p.1892.

9. Mansfield D. K., Roquemore A. L., Schneider H., et al. Fusion Engineering and Design, 2010, Vol.85, p.890.

10. Hu J. S., Ren J., Sun Z., et al. Fusion Engineering and Design, 2014, Vol.89, p.2875.

11. Osborne T. H., Jackson G. L., Yan Z., et al. Nuclear Fusion, 2015, Vol.55, 063018.

12. Вершков В. А., Вуколов Д. К., Кулешин Э. О., и др. ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 4, стр.80.

13. Maingi R., Boyle D. P., Canik J. M., et al. Nuclear Fusion, 2012, Vol.52, 083001.

14. Sun Z., Hu J. S., Zuo G. Z., et al. Fusion Engineering and Design, 2014, Vol.89, p.2886.

#### Список публикаций по теме диссертации

<u>Статьи, опубликованные в журналах, включённых в Перечень ВАК РФ и</u> <u>индексируемых в базе данных SCOPUS:</u>

А1. Тимохин В. М., Кутеев Б. В., Сергеев В. Ю., Скоков В. Г., Burhenn R. Эффект узколокализованного повышенного испарения углеродных макрочастиц в стеллараторе Wendelstein 7-AS // Письма в ЖТФ, 2004, том 30, вып. 7, стр. 83-87.

A2. Ledl L., Burhenn R., Lengyel L., Wagner F., W7-AS team, ECRH group, Sergeev V. Yu., Timokhin V. M., Kuteev B. V., Skokov V. G., Egorov S. M. Study

of carbon pellet ablation in ECR-heated W7-AS plasmas // Nuclear Fusion, **44** (2004), p. 600-608.

А3. Кутеев Б. В., Скоков В. Г., Сергеев В. Ю., Тимохин В. М., Крылов С. В., Павлов Ю. Д., Пономарев А. В., Пустовитов В.Д., Сарычев Д. В., Химченко Л. Н. Пороговые эффекты при взаимодействии плазмы с инжектированными пеллетами в токамаке Т-10 // Письма в ЖЭТФ, 2006, том 84, вып. 5, с. 295 – 298. А4. Сергеев В. Ю., Скоков В. Г., Тимохин В. М., Кутеев Б. В., Мартыненко В. М., Бурхенн Р. Исследование пылевой моды испарения углеродных макрочастиц в стеллараторе W7-AS // Журнал Технической Физики, 2006, том 76, вып. 11, стр. 66-71.

A5. Kuteev B. V., Sergeev V. Yu., Krylov S. V., **Skokov V. G.,** Timokhin V. M. Conceptual analysis of a tokamak reactor with lithium dust jet // Nuclear Fusion, **50** (2010), 075001, p.1-10.

A6. Kuteev B. V., Sergeev V. Yu., Timokhin V. M., **Skokov V. G.**, Krylov S. V., Bykov A. S., Notkin G. E., Kislov A. Ya., Tilinin G. T., Petrov V. S. Dust technologies for magnetic fusion // Journal of Nuclear Materials, Volume 415, Issue 1, Supplement, 1 August 2011, p. S1073-S1076.

A7. Sergeev V. Yu., Kuteev B. V., Bykov A. S., Krylov S. V., **Skokov V. G.**, Timokhin V. M.. Lithium Technologies for Edge Plasma Control // Fusion Engineering and Design, Volume 87, Issue 10, October 2012, Pages 1765-1769.

A8. **Skokov V. G.**, Sergeev V. Yu., Bykov A. S., Krylov S. V., Kuteev B. V., Timokhin V. M., Wagner F. Li dust injection experiments into T-10 tokamak // Fusion Engineering and Design, 2014, Vol.89 (2014), p.2816-2821.

A9. Sergeev V. Yu., Kuteev B. V., Bykov A. S., Gervash A. A., Glazunov D. A., Goncharov P. R., Dnestrovskij A. Yu., Khayrutdinov R. R., Klishchenko A. V., Lukash V. E., Mazul I. V., Molchanov P. A., Petrov V. S., Rozhansky V. A., Shpanskiy Yu. S., Sivak A. B., **Skokov V. G.**, Spitsyn A. V. Conceptual design of divertor and first wall for DEMO-FNS // Nuclear Fusion, 2015, Vol.55, 123013.