

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО»

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

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор В.Ю. Сергеев

Санкт-Петербург

2018

Содержание

Введение.....	4
1. Обзор литературы.....	12
1.1 Управление разрядом методом инъекции примеси.	12
1.1.1 Технологии внесения примеси в плазму.....	13
1.1.2 Моделирование испарения инжектированных макрочастиц.....	14
1.1.3 Быстрый перенос при инъекции.	17
1.2 Литиевые технологии.	19
1.2.1 Покрытие стенок установки литием с помощью испарителя.....	22
1.2.1.1 Литиевый испаритель на T-10.	23
1.2.1.2 Литиевые испарители на других установках.	26
1.2.2 Литиевые лимитеры с открытой поверхностью.....	28
1.2.3 Литиевые лимитеры на основе капиллярно-пористых структур (КПС)...	33
1.2.4 Инжекция литиевых макрочастиц.....	36
1.2.4.1 TFTR.....	37
1.2.4.2 NSTX.....	39
1.2.4.3 RFX-mod.....	40
1.2.5 Лазерное распыление лития.	42
1.2.6 Инжекторы пылевой струи.....	44
1.2.6.1 Литиевый дроппер на NSTX и DIII-D.	45
1.2.6.2 Литиевый дроппер на EAST.	46
1.2.7 Проблема сбора лития в камере установки.	48
1.3 Выводы из обзора литературы и постановка задач.	49
2. Экспериментальные установки и оборудование.....	53
2.1 Система инъекции примеси в токамак T-10.	53
2.1.1 Токамак T-10 и его диагностический комплекс.....	53
2.1.2 Оценки параметров инъекции лития для токамака T-10.....	55
2.1.3 Система примесной инъекции токамака T-10 и система регистрации испарения макрочастиц.	57
2.1.3.1 Система примесной инъекции токамака T-10.	58
2.1.3.2 Система регистрации испарения макрочастиц для T-10.....	61
2.1.3.3 Макрочастицы для системы примесной инъекции T-10.	62
2.1.4 Шприцевой инжектор литиевой струи на T-10.....	66
2.1.5 Система инъекции металлической литиевой пыли для токамака T-10....	68
2.1.5.1 Литиевый порошок SMLP TM	68
2.1.5.2 Источник пылевой струи.	71
2.1.5.3 Подсистема доставки пыли в токамак.....	74
2.1.5.4 Эксплуатация системы инъекции литиевой пыли.	77
2.2 Система инъекции примесных макрочастиц в стелларатор W7-AS.....	81
3. Исследование особенностей испарения углеродных макрочастиц.....	85
3.1 Быстрые МГД-процессы при испарении примесных макрочастиц.	86
3.1.1 Эксперименты по инъекции макрочастиц разных размеров в T-10... 87	
3.1.2 Моделирование испарения с учетом быстрых МГД-процессов.....	93
3.1.3 Обсуждение результатов.	98
3.2 Исследование пылевой моды испарения.	100
3.2.1 Обнаружение пылевой моды испарения углеродных макрочастиц.....	100
3.2.2 Моделирование испарения с эмиссией «микрореллетов».	106
3.2.2.1 Оценка скоростей крупинки.....	106

3.2.2.2	<i>Оценка размеров крупинок.</i>	109
3.2.3	Обсуждение результатов.	112
4.	Управление разрядом методом инъекции лития.	113
4.1	Инжекция литиевых макрочастиц в плазму токамака T-10.	113
4.1.1	Результаты экспериментов по инъекции литиевых макрочастиц.	115
4.1.2	Обсуждение результатов инъекции литиевых макрочастиц.	118
4.2	Инжекция литиевых пылевых струй в плазму токамака T-10.	123
4.2.1	Результаты экспериментов по инъекции литиевой пылевой струи.	125
4.2.1.1	<i>Моды инъекции.</i>	126
4.2.1.2	<i>Эксперименты по инъекции в квазистационарной моде.</i>	135
4.2.2	Моделирование поведения ионов в плазме T-10	142
4.2.2.1	<i>Моделирование реперного разряда.</i>	142
4.2.2.2	<i>Моделирование разряда с инъекцией лития.</i>	148
4.2.3	Обсуждение результатов.	154
4.3	Перспективы использования лития в современных термоядерных установках.	160
	Заключение	161
	Благодарности.	163
	Список литературы	164

Введение

За примерно 60 лет своего развития программа управляемого термоядерного синтеза (УТС) прошла большой путь и сейчас приближается к стадии зажигания термоядерной плазмы в лабораторных условиях. Для этого выбран токамак, базирующийся на принципах, предложенных отечественными учеными. Активно ведется строительство токамака-реактора ITER и планирование первой термоядерной электростанции DEMO на основе токамака.

Тем не менее, остается еще ряд физических и технологических проблем, которые необходимо решить для успешной реализации программы. Одна из них связана с высокими стационарными потоками тепла и частиц на первую стенку вакуумной камеры и дивертор термоядерного реактора. Эти потоки становятся близкими или превышают предельные инженерные значения порядка 10 МВт/м^2 ([1]), допустимые для «видящих плазму» материалов исходя из условия сохранения их целостности и проектных теплофизических характеристик. Кроме того, обнаружены специфические ситуации, в ходе которых поток из плазмы на стенку может локально кратковременно возрастать в десятки раз (например, неустойчивости типа ELM [2]). Важными являются также проблема эрозии материалов и выдерживание ими высоких нейтронных нагрузок в реакторе. Таким образом, без решения данной проблемы первая стенка и дивертор токамака-реактора могут быть разрушены в ходе первых нескольких часов работы реактора.

Одной из достаточно давно предложенных [3] и в последнее время активно разрабатываемых методик защиты обращенных к плазме элементов первой стенки и дивертора является создание на них защитного слоя из самого легкого из металлов – лития. Было протестировано множество способов получения литиевой поверхности, в том числе и базирующихся на внесении лития непосредственно в плазму. Образовавшиеся при этом в периферийных слоях ионы лития могут быть вынесены непосредственно на элементы первой стенки и дивертора, наиболее подверженные влиянию плазмы. При реализации условий, в результате которых прирост слоя за счет выхода лития из плазмы на стенку будет компенсирован его уходом с поверхности под воздействием потоков тепла и частиц из плазмы или теплового испарения, возможно создание самоподдерживающегося покрытия. Частотная импульсная инжекция в периферийные области плазмы может также управлять параметрами ELM [4], повышая

их частоту и тем самым снижая их энергосодержание и связанную с этим нагрузку на стенку. Инжекция на периферию литиевой пыли может подавлять ELM [5], [6]. Массивная инжекция примесного газа используется для выключения разряда без больших механических нагрузок на элементы токамака и без генерации тока убегающих электронов [7]. Инжекция примесного газа также используется для переизлучения энергии как в основном объеме (для DEMO) так и на периферии (SOL) плазмы для получения режима «отрыва» диверторной плазмы от пластин дивертора, что является основным методом снижения тепловых потоков на них и их эрозии [8].

Перечисленные приложения требуют прогнозирования области депозиции вносимого в плазму вещества. Для создания литиевого покрытия желательно внесение его в самые периферийные области плазмы. Для эффективного же выключения разряда необходимо максимально равномерно переизлучить запасенную в шнуре энергию, что требует глубокого проникновения вносимого в плазму вещества. Как показывают эксперименты, область депозиции вносимого вещества зависит как от параметров инжектируемого материала, так и от параметров плазмы. Например, повышенная по сравнению с предсказываемой существующими моделями (модель нейтрального экранирования (МНЭ) [9], модель Паркса [10]) скорость испарения приводит к более периферийной депозиции вещества. С другой стороны, быстрые МГД-процессы, возникающие при инжекции, могут изменить поток энергии на макрочастицу и тем самым влиять на результирующую глубину проникновения. Все это свидетельствует в пользу того, что явления, происходящие при внесении примеси в плазму, надо рассматривать комплексно, принимая во внимание как процесс испарения, так и индуцированные им эффекты.

Актуальность темы

Из вышеизложенного видно, что 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 внутри 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 инъекции 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 [11].

Цель и задачи исследования

Целью данной работы было исследование физических процессов при инъекции 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 инъекции углеродных макрочастиц в плазму стелларатора Wendelstein 7-AS и токамака T-10.
2. Разработка аппаратуры для инъекции 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 инъекции 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 инъекции 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 инъекции литиевой пылевой струи. Впервые проведены эксперименты по инъекции литиевой пылевой струи в лимитерный токамак Т-10.

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

Достоверность научных результатов

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

На защиту выносятся:

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 крупинки 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 инъекции литиевой пылевой струи.

4. Измерение и интерпретация поведения плотностей и потоков частиц рабочего газа и примесей при инжекции в плазму токамака T-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 T-10.

Личный вклад автора

Следующие работы были выполнены лично автором:

1. Усовершенствована методика изготовления и пассивирования твердотельных литиевых макрочастиц.
2. Созданы источник пылевой струи и аппаратура для ее инжекции в плазму токамака T-10.
3. Проведены эксперименты по инжекции углеродных и литиевых макрочастиц, а также литиевой пылевой струи в плазму T-10.
4. Созданы модели для описания наблюдаемых процессов и явлений при взаимодействии инжестируемого вещества с плазмой.

Апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались 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.)

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период с 2003 по 2016 годы и изложены в 9 печатных работах в журналах из списка ВАК РФ (все статьи входят в перечни баз данных Scopus и Web of Science) и 14 тезисов докладов в материалах конференций. Основные публикации по теме диссертации:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. **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.
9. 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.

Содержание работы

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

Краткое изложение диссертации по главам

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

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 созданного и использующегося экспериментального оборудования. Дается краткое представление об установках T-10 и Wendelstein 7-AS и их диагностических комплексах, результаты измерений которых использованы в диссертации. Более подробно описана система инжекции диагностических макрочастиц ДИМ-6, применявшаяся на обеих установках. Детально обсуждается система инжекции металлической литиевой пыли для токамака T-10, а также свойства использовавшихся в экспериментах пассивированных литиевых цилиндрических макрочастиц и литиевого порошка.

В **Главе 3** представлены результаты, полученные в ходе экспериментов по углеродной инжекции. В первом параграфе описываются наблюдения, сделанные при инжекции в плазму токамака T-10 макрочастиц диаметром от 0.20 до 0.62 мм. Здесь демонстрируется нарастание количества и амплитуды резких скачков скорости испарения с увеличением размера макрочастиц. Проводится обсуждение причин наблюдаемого эффекта и предлагается модель для описания данного явления,

учитывающая перезамыкания магнитных поверхностей, вызванные макрочастицей, проходящей через рациональные магнитные поверхности. Во втором параграфе демонстрируется не отмечавшийся ранее тип испарения углеродной макрочастицы в плотной плазме стелларатора Wendelstein 7-AS с мощным NBI-нагревом, связанный с эмиссией с поверхности макрочастицы углеродных макроскопических крупинок. Даны некоторые теоретические и экспериментальные оценки для параметров этих крупинок, а также приводится модель испарения макрочастицы в условиях их эмиссии.

В **Главе 4** описываются разработанные методики управления разрядом токамака методом инъекции лития. Представлены данные, полученные при инъекции литиевых макрочастиц в плазму токамака T-10, и результаты их обработки. Продемонстрирована незначительная степень снижения потока частиц рабочего газа со стенки обратно в плазму при таком способе внесения лития, обсуждаются возможные причины этого. Кроме этого, описываются результаты инъекции в T-10 литиевых пылевых струй. Проведен анализ поведения плазмы при инъекции при различных потоках инжектированного вещества. Описана нульмерная модель поведения ионов Li, D, C в плазме, отработанная сначала на «реперном» разряде без лития, а затем на последовательности разрядов с инъекцией лития. В завершающем параграфе проводится подробное обсуждение полученных результатов, где методика инъекции литиевой пылевой струи сравнивается с другими методами инъекции, а также анализируются причины отсутствия заметного кумулятивного эффекта накопления лития на обращенных к плазме поверхностях в токамаке T-10. В конце главы обсуждаются перспективы использования лития в современных установках.

В **Заключении** подводятся основные итоги работы и перечисляются важнейшие полученные результаты. Там же сформулированы сделанные в ходе подготовки диссертации выводы.

1. Обзор литературы

Настоящая глава диссертационной работы содержит обзор литературы, в котором анализируются результаты опубликованных ранее научных работ, непосредственно относящихся к теме диссертации.

В первой части главы рассматриваются общие приемы управления разрядом методом инъекции примеси, применяемые в современной физике высокотемпературной плазмы. Кратко описываются разработанные к настоящему моменту технологии внесения примеси в плазму, описываются развитые ранее модели испарения инжесктированных в плазму макрочастиц, а также обращается внимание на экспериментальные факты, демонстрирующие эффект быстрого (нелокального) переноса при инъекции.

Вторая часть посвящена более подробному рассмотрению технологий управления разрядом с использованием лития, применявшимся в последнее время на ряде отечественных и зарубежных установок с магнитным удержанием плазмы. Описана как техника эксперимента, так и полученные результаты, продемонстрировавшие в большинстве случаев уменьшение содержания примеси в разряде и снижение рециклинга рабочего газа, что подтверждает возможность использования литиевых технологий для улучшения управляемости разряда.

В последней части обзора литературы формулируются основные выводы и задачи диссертационной работы.

1.1 Управление разрядом методом инъекции примеси.

Инжекция в плазму небольшого количества примеси (вносимое число электронов обычно не более 10% от содержания частиц в шнуре) [12], [13] широко используется для диагностических приложений, а также для создания необходимых для правильного течения разряда условий на периферии плазмы. Инжекция значительного количества примеси (может в несколько раз превышать содержание электронов в плазме) применяется, например, для управляемого выключения разряда [14] и для смягчения последствий большого срыва [7].

Для внесения вещества было разработано множество разнообразных технологий, в том числе инъекция твердотельных макрочастиц. Проникновение этих

макрочастиц предсказывается на основе параметров разряда и инжекции с помощью ряда моделей. Однако в некоторых случаях в плазме могут происходить процессы, оказывающие воздействие на процесс испарения. Данный подраздел посвящен анализу литературы на вышеперечисленные темы. Управление разрядом с использованием литиевых технологий в нем пока не рассматривается.

1.1.1 Технологии внесения примеси в плазму

В связи с тем, что вещество примеси может находиться в разных состояниях (газ, твердое тело, аэрозоль), применяемые для инжекции устройства могут кардинально отличаться друг от друга.

Одним из наиболее простых и давно используемых методов вноса вещества в плазму установок с магнитным удержанием является напуск газовых струй. Изначально таким образом подпитывали плазму топливом, но затем аналогично предложили вносить и примесь. Данные системы представляют собой электромагнитные клапана, работающие в широком диапазоне давлений и дающие различные потоки вносимого вещества (см., например, сравнение двух типов клапанов, использующихся на токамаке T-10, в работе [7]). Для диагностических целей на периферию может инжектироваться небольшое количество как легкой [15], так и тяжелой примеси [16]. В свете развития установок с большой запасенной в шнуре энергией актуальным является использование массивной газовой инжекции для управления разрядом, а именно его выключения и смягчения последствий большого срыва (см., например, [17] и ссылки в ней). Еще один метод управления разрядом с помощью инжекции примесных газовых струй – создание режима отрыва (detachment) в области дивертора [8], который предполагается использовать в установках с большим выходящим потоком тепла. Для уменьшения его воздействия на элементы дивертора предлагается использовать такие газы, как, например, неон и азот, эффективность метода была подтверждена экспериментально [18].

Очевидно, что перечисленные выше системы можно использовать, если вносимая в установку примесь находится в газообразной форме. В случае твердого вещества используются совершенно другие схемы. Одна из них – это испарение напыленного на стекло тонкого слоя металла мощным лазерным импульсом [19], так называемый метод laser blow-off. Испаренная таким образом примесь попадает на периферию плазменного шнура, возможно осуществление серии повторяющихся

инжекций. Количество вносимого вещества можно регулировать за счет площади пятна, на которое фокусируется лазерный луч системы [20]. Своеобразное развитие метода предложено в работе [21], где проходящий сквозь плазменный шнур лазерный луч нацеливался на поверхность помещенной внутри камеры емкости с расплавленным литием, превращая ее в аэрозоль. Регулировка количества вносимого вещества также производилась за счет системы фокусировки.

Совершенно по-другому реализуется другой метод внесения находящегося в твердом состоянии вещества в плазму – с использованием инжекторов макрочастиц. Они позволяют производить инъекцию не только на периферию, но и в центральные области плазмы. Подобные методы оказались весьма востребованы для подпитки плазмы дейтерием, и номенклатура топливных инжекторов весьма велика [22]. В случае же примесной инъекции в основном используются газодинамические инжекторы, в дополнение к предыдущей работе описанные, например, в [23]. Принцип их работы заключается в ускорении макрочастицы в потоке легкого газа (обычно гелия), который затем отсекается системой быстродействующих клапанов и откачивается. Глубина проникновения примеси определяется как свойствами плазмы и примеси, так и скоростью и размером макрочастицы. Данные устройства могут применяться, в зависимости от инжектируемой примеси, для диагностики параметров плазмы (например, углерод), для управления разрядом (литий) и для его выключения (тяжелая примесь – Ag, Kr) (см. [24], а также [25] и ссылки в ней). В последнее время на токамаке EAST также использовался инжектор без ускоряющего газа, в котором макрочастицы получают ускорение при столкновении с вращающейся крыльчаткой [4], при этом параметры ее вращения определяют скорость макрочастицы и частоту инъекции.

Еще одна методика, развиваемая в последние годы для внесения примеси – инжекторы пылевой струи, в которых порошкообразная примесь ускоряется под действием гравитации. Скорость пылевых частиц при этом будет составлять единицы метров в секунду, так что их испарение будет происходить на периферии плазмы. Одна из их разновидностей представлена в [26], другая разрабатывалась в ходе подготовки данной диссертации и будет подробно описана в разделе 2.1.4.

1.1.2 Моделирование испарения инжектированных макрочастиц.

Для прогнозирования эффектов, возникающих в плазме при внесении примеси, необходимо оценить, где и сколько будет высажено вещества, содержащегося в

макрочастице. Для этого был разработан целый ряд моделей испарения, обзор которых можно найти в работе [27].

Собственно испарение происходит под воздействием потоков тепла, переносимых на макрочастицу электронами и ионами плазмы [22]. За счет испарения вокруг нее формируется облако вносимого вещества, которое в зависимости от расстояния от поверхности макрочастицы и параметров плазмы может изменяться по температуре, плотности и степени ионизации. Это облако частично экранирует потоки тепла, тем самым снижая скорость испарения. Экранирование можно разделить на несколько подпроцессов, вклад которых может быть различным. Основной его показатель, используемый при моделировании – фактор экранирования δ , показывающий отношение дошедшего сквозь облако до поверхности макрочастицы потока к исходному потоку из плазмы. По нему экранирование подразделяют на сильное ($\delta \ll 1$), как в случае водородных макрочастиц, слабое ($1 - \delta \ll 1$), характерное для тугоплавких веществ, и промежуточное.

В непосредственной близости от поверхности инжектированной макрочастицы формируется облако испаренных нейтральных атомов. Это экранирование называют нейтральным.

По мере отдаления от поверхности макрочастицы расширяющееся облако испаренного вещества начинает подвергаться ионизации, при этом образовавшаяся плазменная структура распространяется преимущественно вдоль магнитного поля. Она также принимает на себя некоторую долю потока энергии из плазмы, это экранирование называется плазменным [28].

На границе облака ионизированного пеллетного вещества и фоновой плазмы может возникать потенциальный барьер [29], оказывающий тормозящее воздействие на поток электронов на испаряющуюся макрочастицу. Этот эффект называется электростатическим экранированием.

Для испарения тугоплавких макрочастиц с незначительным экранированием в работе [9] была развита модель нейтрального экранирования, в [10] был представлен скейлинг для скорости испарения в таких условиях. Испарение водородных макрочастиц с сильным экранированием описывается в работах [22] и [30]. Работа [27] предлагает обобщенный скейлинг для условий нейтрального экранирования для произвольных значений δ .

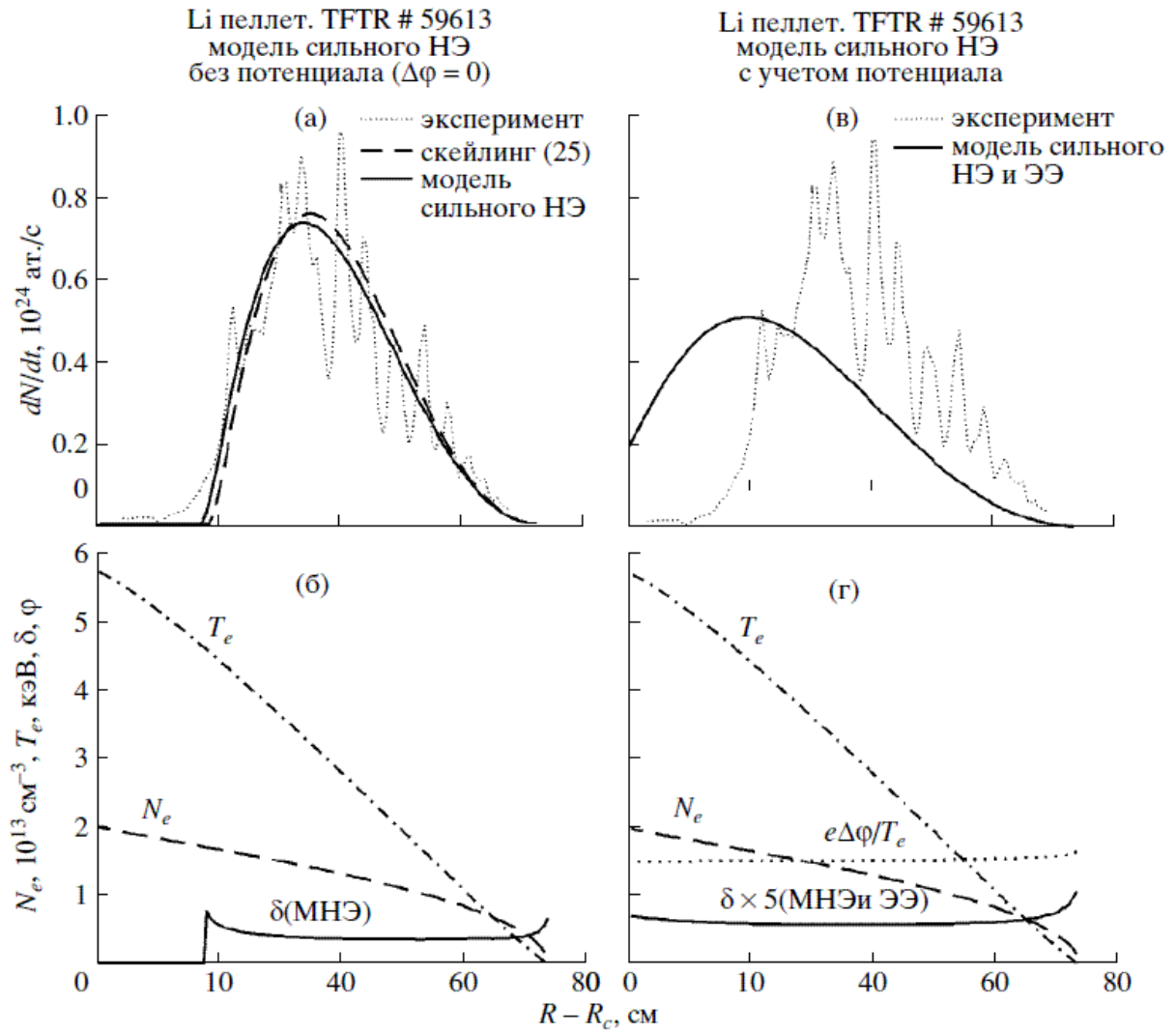


Рис. 1.1. Моделирование испарения литиевой макрочастицы в плазме установки TFTR [27]. а), в) – измеренные и рассчитанные по модели сильного нейтрального и электростатического экранирования и по обобщенному скейлингу радиальные профили скорости испарения, б), г) – измеренные профили плотности и температуры электронов, фактора экранирования δ и характеристики перепада потенциала $e\Delta\phi/T_e$, рассчитанные по модели электростатического экранирования. а), б) – без учета электростатического экранирования, в), г) – с учетом электростатического экранирования $e\Delta\phi/T_e \approx 1.5-1.7$.

Как показывает Рис. 1.1., взятый из работы [27], модель нейтрального экранирования без привлечения электростатического хорошо описывает испарение примесных макрочастиц, в связи с этим именно она (если не указывается иное) будет использоваться в последующих расчетах в данной работе.

1.1.3 Быстрый перенос при инжекции.

На целом ряде установок в ходе экспериментов, связанных с возмущением периферийной плазмы, был задетектирован так называемый феномен быстрого (нелокального) переноса: быстрый отклик в области плазмы, удаленной от зоны возмущения. Термины «быстрый» и «нелокальный» говорят о том, что временные масштабы наблюдаемых явлений оказываются заметно меньше характерных транспортных времен в направлении поперек магнитного поля. Такие явления впервые были описаны на токамаке TFR [31], затем – на установках TEXT [32], TFTR [21], LHD [33], HL-2A [34], Alcator C-Mod [20] и других. Методы возмущения периферии плазмы использовались весьма разнообразные: инжекция макрочастиц ([31], [33], [35]), различные приемы лазерного распыления ([20], [21], [32]), инжекция газовой струи ([34], [36]), периферийный нагрев плазмы [37].

В первых экспериментах на TFR, где макрочастица инжектировалась в плазму со скоростью до 660 м/с [31], эволюция электронной температуры измерялась по второй гармонике электрон-циклотронного излучения. При этом было обнаружено, что скорость продвижения вовнутрь шнура фронта охлаждения, оценивавшаяся по времени начала спада электронной температуры, оказывается примерно в 2 раза больше, чем скорость макрочастицы. Такое явление могло наблюдаться, если бы электронная теплопроводность χ_e внезапно выросла бы примерно на два порядка. В той же работе указывалась следующая характерная особенность: при примерно одинаковых условиях эксперимента быстрый отклик на периферийное возмущение наблюдался не всегда, но с ростом размера инжектированных макрочастиц переход в режим с быстрым переносом происходил с большой вероятностью.

В серии экспериментов, выполненных на токамаке TEXT и представленных в работах [32], [37], была предложена более сложная модель для моделирования наблюдаемого в экспериментах явления, когда при охлаждении периферийной плазмы начинался рост температуры в центральных областях. В связи с этим была предложена сложная форма эволюции коэффициента электронной теплопроводности χ_e : быстрый (с характерными временами ~ 0.1 мс) рост в несколько раз на периферии и снижение на 50% в области ближе к центру шнура. В случае же периферийного нагрева схема модификации теплопроводности инвертировалась. Кроме того, в экспериментах был подтвержден пороговый характер возникновения эффектов по значению вносимого периферийного возмущения.

В большинстве более поздних экспериментов внимание исследователей было сосредоточено на явлениях, аналогичных наблюдавшимся на TEXT, когда охлаждение периферии приводило к росту центральной температуры. При этом возмущающее плазму воздействие локализовывалось на самом краю плазменного шнура, что характерно для таких методов внесения примеси, как лазерное распыление; но даже в случае инъекции макрочастиц на LHD [33] они проникали только в область $r/a > 0.8$. Такие условия заметно отличались от работы [31], но в то же время подтвердили ряд сделанных еще тогда наблюдений и выявили новые особенности. Во-первых, было показано, что при увеличении возмущения, вносимого на периферию, увеличивается рост температуры в центральной части шнура (см., например, [36], [37]). Любопытное наблюдение сделано в работе [33] –при росте вносимого в плазму возмущения, наравне с более резким снижением периферийной температуры более резко нарастает температура в центре. В [34] продемонстрировано снижение амплитуды нарастания температуры в центре в наблюдаемых явлениях быстрого переноса при росте плотности фоновой плазмы. Можно добавить, что в работе [20] был представлен анализ выполненных ранее на других установках экспериментов. Его авторы суммируют, что при превышении фоновой плотностью некоего порогового значения, неявным образом зависящего от размеров установки, а также, возможно, от температуры и тока по плазме, явление нелокального переноса перестает наблюдаться. Ими было сделано предположение, что это связано с переходом в режим с высокой столкновительностью.

Вообще, несмотря на то, что данным вопросом научное сообщество занимается уже довольно долго, до сих пор нет однозначного ответа на вопрос о том, какой именно механизм ответственен за наблюдаемые явления. В работе [31] в качестве возможного кандидата предлагалось резкое нарастание микротиринг-неустойчивостей за счет возмущения электронной температуры при инъекции макрочастиц. Авторы [36] ассоциируют формирующуюся при явлении быстрого переноса структуру с вращающимся магнитным островом, подобным возникающему при развитии неоклассической тиринг-моды. Направленный вовнутрь тепловой пинч полагается причиной роста температуры в центре в [20], его же предлагают в качестве одного из альтернативных вариантов в [37]. Работы [34] и [35] связывают появление нелокальных эффектов с формированием заметных градиентов соответственно ионной и электронной температуры при охлаждении периферии. Было предложено также чисто теоретическое описание процесса [38], где учитывался обмен энергией между плазмой и магнитным полем, описываемый теоремой Пойнтинга.

С другой стороны, несмотря на широкие проведенные исследования быстрого переноса, некоторые вопросы остались не до конца проясненными. Среди них – быстрое по сравнению со скоростью макрочастицы снижение электронной температуры в глубине плазмы при инжекции макрочастиц [31]. При подготовке обзора литературы обнаружить подробные публикации, посвященные данной проблеме, не удалось. Лишь в [39] обращается внимание на ускоренное охлаждение центральной области плазмы при инжекции водородной макрочастицы, связываемое коллективом с формированием острова в области $q = 1$. В большинстве случаев авторы сосредотачиваются на инверсии возмущения температуры при охлаждении периферии. Это в целом понятно, так как рост центральной температуры выгоден для достижения условий зажигания термоядерной реакции. Но с точки зрения приложений, связанных с инжекцией топливных и примесных макрочастиц, тема оказывается в некоторой степени «подвисшей». Важность ее определяется тем, что возмущение параметров плазмы окажет влияние на глубину проникновения макрочастицы и, соответственно, на область высаживания вносимого вещества.

В связи с этим, исследование вопроса быстрой по сравнению со скоростью инжектированной макрочастицы перестройки профиля электронной температуры являлось одной из задач, которые следовало решить при подготовке данной диссертации. Кроме того, важно было построить модель испарения в таких условиях.

1.2 Литиевые технологии.

Одно из основных направлений по улучшению управляемости разряда в термоядерных установках – это улучшение условий взаимодействия между плазмой и первой стенкой установки. Для этого необходимо разработать пути решения целого комплекса проблем. Все они так или иначе связаны с взаимным обменом веществом и энергией между горячей плазмой и холодными обращенными к плазме элементами установки. Прежде всего, очевидно, что на обращенные к плазме элементы установки идет мощный поток частиц и энергии. Выходящие из плазмы частицы в большинстве случаев несут большую кинетическую энергию и могут физически распылять поверхность первой стенки. Кроме того, возможно также химическое взаимодействие выходящих из плазмы атомов с материалом стенки, приводящее к ее разрушению. Поток энергии из плазмы приводит к расплавлению и термическому распылению обращенных к плазме поверхностей. Генерирующийся за счет перечисленных эффектов

поток частиц вещества стенки в плазму в свою очередь приводит к охлаждению ее периферии и увеличению излучательных потерь. Здесь можно пытаться работать в двух направлениях: либо использовать в качестве элементов поверхности установки тугоплавкий металл типа вольфрама, уменьшая тем самым количественный выход примеси, либо, наоборот, использовать первую стенку из вещества с низким зарядовым числом. Так как литий весьма активно взаимодействует с атмосферными газами, то изготовление напрямую установки с литиевой стенкой невозможно. Поэтому обычно таким легким материалом для первой стенки является углерод с $Z=6$, но можно еще значительно уменьшить зарядовое число атомов, покрыв стенку литием ($Z=3$), бериллием ($Z=4$) либо бором ($Z=5$). Очевидно, что, исходя из этих соображений, литий является наиболее выигрышным покрытием, его влияние на излучательные потери и эффективный заряд плазмы будет минимальным. Причем таким же образом литий можно использовать для кондиционирования и металлической стенки установки, в том числе (при достаточно большой толщине покрытия) предотвращать распыление тяжелой примеси при нештатных ситуациях типа срыва. Таким образом, на целом ряде установок наблюдалось значительное снижение содержания примеси в плазме и связанное с этим снижение значений эффективного заряда, эти результаты будут рассмотрены подробнее далее в этом параграфе.

Одна из проблем, сопутствующих в особенности установкам с углеродными поверхностными элементами – это проблема рециклинга [40]. Этот процесс, связанный с последовательным поглощением и выделением изотопов водорода на этих элементах, играет важную роль в поведении периферийной плазмы. Его активность завязана на параметры не только текущих, но и предшествующих экспериментов и на общее состояние камеры установки. Таким образом, например, при высоком рециклинге после серии экспериментов с высокой плотностью плазмы будет невозможно провести разряд с низкой плотностью из-за неконтролируемого притока водорода со стенки. Целый ряд экспериментов, важнейшие из которых будут рассмотрены ниже, показал заметное снижение рециклинга и, следовательно, повышение управляемости разряда при использовании лития. Это важно не только в исследовательских установках. Было продемонстрировано, что при уменьшении рециклинга происходит заметный рост такого важного для программы УТС параметра, как время удержания энергии [41], [42]. Предположения о том, за счет чего происходит такой эффект, были высказаны в работе [43]. За счет снижения рециклинга уменьшается выход холодного водорода со стенки. Это ведет к росту температуры на периферии и уплощению ее профиля, что должно

снизить турбулентность, вызываемую температурными градиентами. Снижение турбулентности, вносящей значительную долю в аномальный перенос, ведет к улучшенному удержанию энергии и частиц.

В качестве ответа на возможный контраргумент о том, что литий будет захватывать дейтерий и особенно тритий, можно возразить, что при создании системы циркуляции лития по замкнутому контуру через, например, дивертор токамака, можно реализовать систему вывода изотопов водорода из лития. При этом используется экспериментально наблюдаемое свойство лития отдавать их при нагреве до температуры 450-550 °С (см., например, [44] и ссылки в ней). Таким образом, можно извлекать захваченные изотопы водорода, регенерировать литий и избавлять его от заражения радиоактивным тритием.

В установках с параметрами, близкими к термоядерным, встает еще одна важная проблема. Поток энергии на первую стенку установки, особенно в strike point дивертора, не должен превышать неких критических значений, для современных материалов и конструкторских решений в условиях стационарных нагрузок – не более 10 МВт/м², иначе это приведет к ее активному распылению [1]. Таким образом, хотелось бы достичь условий, когда основная часть энергии на периферии равномерно переизлучается на всю поверхность первой стенки, и при этом не происходит поступления тяжелой примеси в центральные области плазмы. Наиболее подходящим для этого веществом видится литий. Предложено организовать замкнутый цикл лития с инжекцией и сбором его в установке так, что при параметрах типа ITER и DEMO будут достигаться высокие уровни переизлучения энергии плазмы, при этом средний по объему плазмы эффективный заряд не превысит 1.7 [45].

И, наконец, в условиях мощного термоядерного реактора стенки установки будут подвергаться значительному воздействию высокоэнергетических частиц, которые будут приводить к эрозии поверхности [46]. В случае же наличия на обращенных к плазме поверхностях установки УТС жидкого лития, разрушения материала первой стенки и нарушения работоспособности установки можно избежать [47]. Таким образом, разработка литиевой защиты конструкционных элементов установки является одним из важнейших вопросов на пути создания термоядерного реактора.

С другой стороны, некоторые особенности физико-химических свойств лития создают ряд трудностей при работе с ним. Во-первых, это высокая химическая активность вещества – металлический литий реагирует с водой, атмосферными газами

и большим количеством металлов [48], причем скорость реакции возрастает с температурой. Это приводит к необходимости работать с литием в условиях осушенной, а еще лучше – инертной атмосферы, а также создает трудности в выборе конструкционных материалов для корпусов систем инжекции лития. Еще большую опасность представляет расплавленный литий. Экспериментально наблюдалось [49] быстрое охрупчивание стальных корпусов устройств, через которые протекает жидкий металл, в результате чего литий может обрести доступ к атмосфере, воде или экзотермически реагирующим с ним металлам (например, алюминию) и создать очаг возгорания. Также заметную опасность при работе могут нести пылевидные фракции металлического лития, обладающие развитой поверхностью и тем самым дающие возможность быстрого (в виде вспышки) протекания реакции с парами воды. В процессе реакции щелочного металла с водой выделяются взрывоопасный водород и едкую LiOH . В связи с перечисленными опасными свойствами работа с литием регулируется правилами, например, см. [50].

В данном разделе литобзора будут рассмотрены разработанные к настоящему времени методики литиизации и описаны полученные с их помощью результаты. Каждой из методик посвящается отдельный подраздел. Те из них, которые близко касаются данной диссертационной работы, анализируются более подробно, остальные излагаются достаточно кратко.

1.2.1 Покрытие стенок установки литием с помощью испарителя

Как уже было сказано, установка литиевых панелей на первой стенке токамака или стелларатора вместо углеродных или вольфрамовых выглядит проблематичной, приходится искать обходные пути для литиизации первой стенки. Для этого, например, предлагалось вносить в откачанную камеру установки источник атомов лития, обычно на основе испарителя. Таким образом, в зависимости от степени свободы перемещения испарителя внутри камеры, можно добиться частичного или почти полного покрытия обращенных к плазме элементов установки тонким слоем лития. В большинстве случаев такие испарители задействовали между разрядами, но некоторые конструкции позволяют использовать их и в ходе разряда.

Подобные эксперименты проводились на установках T-10 [51], NSTX [52], RFX-mod [53], EAST [54]. В данном параграфе сначала будет достаточно подробно

рассмотрены результаты Т-10 как непосредственно использовавшиеся при подготовке к описываемым в диссертации экспериментам, а затем достаточно скупое – результаты других установок.

1.2.1.1 Литиевый испаритель на Т-10.

Первые в России эксперименты по кондиционированию элементов первой стенки установки литием были начаты на установке Т-10 в 2006 году [51]. Характерные параметры токамака следующие: большой радиус 1.50 м, малый радиус, определяемый кольцевой диафрагмой – 0.38 м, характерный малый радиус плазмы – 0.30 м (определяется подвижным рельсовым лимитером), тороидальное поле до 2.5 Тл, ток по плазме до 300 кА, мощность ЭЦР нагрева с помощью гиротронов до 2 МВт. Схема эксперимента приведена на Рис. 1.2. Необходимо отметить, что литиевый испаритель размещался в том же сечении, что и система углеродных лимитеров токамака.

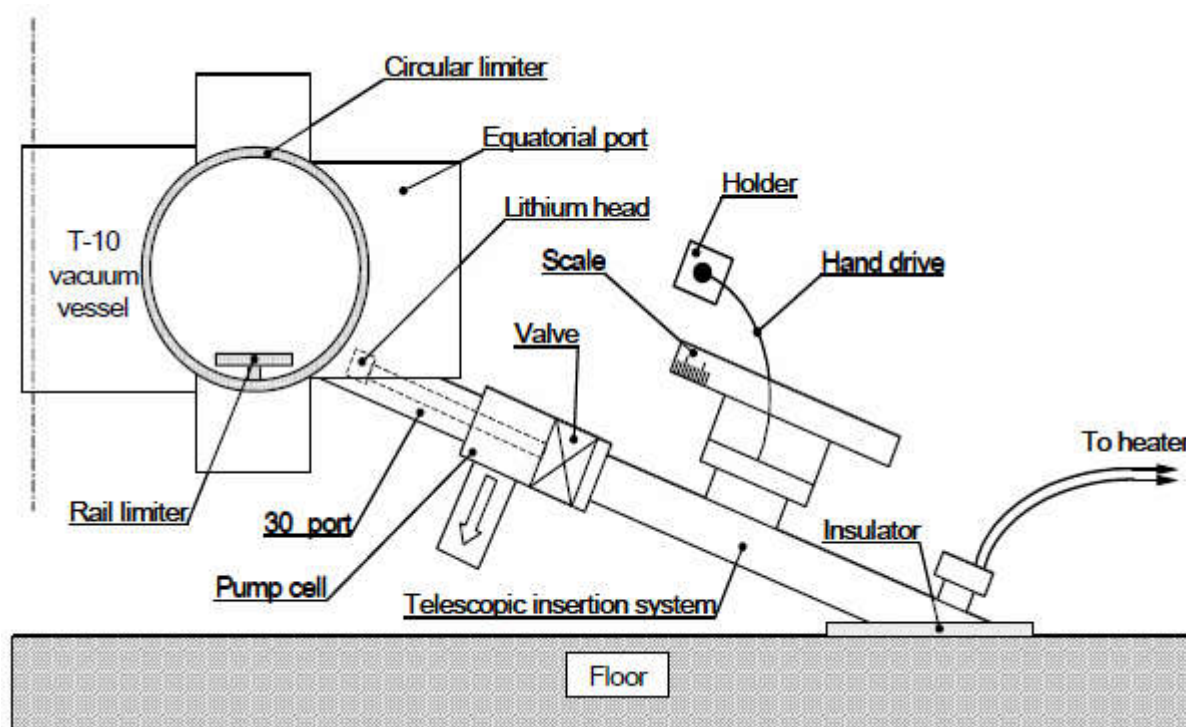


Рис. 1.2. Схема организации внесения лития в камеру токамака Т-10 с помощью литиевого испарителя [51]. Основные элементы конструкции: T-10 vacuum vessel – вакуумная камера Т-10, lithium head – головка испарителя с литиевой КПС, circular limiter – кольцевая диафрагма, rail limiter – рельсовый лимитер, telescopic insertion system – телескопическая система ввода.

В ходе описываемых экспериментов искали ответы на целую серию вопросов, как предполагавших значительное улучшение параметров разряда в результате кондиционирования, так и ставивших под сомнение возможность использования литиевой системы на токамаке. С одной стороны, например, литиевое покрытие углеродного лимитера должно было снизить содержание примеси в плазме и уменьшить рециклинг рабочего газа. С другой стороны, высаживание металлического напыления на гиротронных окнах, находящихся в том числе и в сечении лимитеров, могло привести к их разрушению.

В ходе подготовки к серии экспериментов головка испарителя с наполненной литием капиллярно-пористой структурой (КПС) в начале дня вдвигалась в камеру T-10 с помощью телескопической системы ввода (см. Рис. 1.2.) и выдерживался при температуре 450 °C на протяжении 20 минут. При этом испарялся примерно 1 грамм лития. Затем головка испарителя выдвигалась, и начиналась серия экспериментальных разрядов. В результате литиизации уменьшались эффективный заряд плазмы, радиационные потери и коэффициент рециклинга рабочего газа. Интенсивность излучения на линии кислорода снижалась в 7 раз, тяжелых примесей – в 3.5 раз, а углерода (основной примеси T-10) – в 2 раза. Необходимо подчеркнуть, что выраженность и продолжительность сохранения этих явлений оказывалась очень чувствительной к предварительной очистке камеры перед литиизацией.

Интерес представляет и тот факт, что в вертикальном сечении камеры токамака, в котором расположен литиизатор, изменение интенсивности излучения на линиях рабочего газа (дейтерия) и основной примеси (углерода) происходят на значительно меньшем временном масштабе, чем в сечении, отстоящем от него на 180°. Это свидетельствует о весьма узкой «области действия» испарителя и о слабом перераспределении лития в разряде из зоны литиизации в другие области. Эта особенность была подтверждена и после вскрытия камеры на атмосферу, когда за счет взаимодействия с атмосферными газами осажденный на элементах первой стенки металлический литий за две недели превратился в хорошо заметное соединение Li_2CO_3 белого цвета. Авторы [51] полагают, что препятствовать распространению лития вдоль большого обхода может кольцевая диафрагма (см. Рис. 1.2.).

Пропускающая способность гиротронных окон после литиизации камеры не ухудшилась.

Несколько насторожить на в целом успешном фоне эксперимента может факт обнаружения после вскрытия камеры большого числа белых зерен коррозировавшего

лития на рельсовом лимитере [55]. Их размер составлял от 0.1 до 1 мм, и располагались они только в сечении, где находился литиевый испаритель. Однозначно определить причину происхождения таких брызг не удалось. Возможно, что они происходили в тех разрядах, когда литиевый испаритель располагали вблизи стенки камеры во время разряда, и испарение продолжалось в течение всего рабочего дня. Такой режим работы кратко упоминался только в данной публикации.

Необходимо обратить внимание на разночтения в определении коэффициента рециклинга. В значительной части работ, например, в [40], рециклинг определяется как отношение потока рабочего газа с материальной стенки к потоку газа на эту стенку. В ряде других работ ([53], [54], [56]) под этим названием понимается отношение R_D потоков рабочего газа, вычисленных на сепаратрисе, а именно отношение потока частиц, доходящих со стенки в основной объем плазмы (внутри сепаратрисы) к потоку частиц, выходящих из основного объема в SOL. Он оценивается в этих работах из времени удержания частиц, измеряемого по распаду плотности плазмы при модуляции газонапуска (более подробно см. Главу 4. данной диссертации). В общем случае коэффициент R_D не тождественен коэффициенту рециклинга, но имеет с ним связь в зависимости от параметров пристеночной плазмы и условий отражения потока на материальных поверхностях. Поэтому здесь и далее в случае, если в рассматриваемой работе коэффициент рециклинга определяется через распад плотности, или метод его численной оценки неясен, то слова «коэффициент рециклинга» приводятся в кавычках.

В работе [57] были представлены результаты анализа характеристик рециклинга рабочего газа в экспериментах с литиизацией T-10. С помощью видеокамеры, оснащенной светофильтром на линию водорода $D\alpha$, регистрировались источники дейтерия в ходе разряда. Было показано, что основным источником его поступления являются лимитеры, что подтверждает разумность расположения литиизатора вблизи них. Кроме того, для каждого импульса была оценена величина «коэффициента рециклинга». Из Рис. 1.3. видно, что процедура позволяет снизить коэффициент до уровня 0.86, но эффект литиизации сохраняется лишь на протяжении примерно первых пяти разрядов после работы испарителя, затем параметр возвращается к характерному значению около 0.92. Таким образом, можно сделать вывод о том, что такие важные параметры разряда, как, например, плотность, могут довольно заметно меняться от импульса к импульсу после литиизации.

Таким образом, серия экспериментов с использованием испарителя Li на токамаке T-10 подтвердила основные характерные особенности использования лития

на установках с магнитным удержанием: положительное влияние использования лития на параметры и управляемость разряда, зависимость результата от предварительной подготовки камеры, краткосрочность получаемых эффектов. Проявились и отрицательные черты методики: локальный характер внесения лития, «изменение» параметров от разряда к разряду в ходе экспериментального дня после утренней литиизации, образование капель лития на стенках в сечении расположения литиевого испарителя.

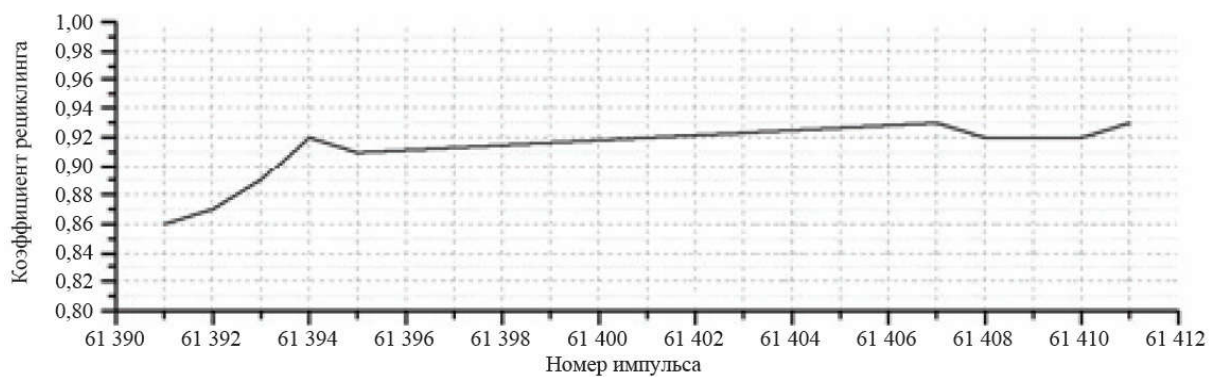


Рис. 1.3. Значение «коэффициента рециклинга» для импульсов после литиизации [57].

1.2.1.2 Литиевые испарители на других установках.

Так же, как и для T-10, на других установках мотивацией для использования литиевых испарителей являлся высокий коэффициент рециклинга рабочего газа на первой стенке с углеродным покрытием (NSTX [52], RFX-mod [53], EAST [54]). Ожидалось, что наилучший эффект будет достигнут при максимально возможной площади напыления. Литиизацию производили обычно перед началом рабочего режима, но в некоторых случаях и между разрядами. В качестве средств литиизации использовали как узконаправленные испарители (LITER на NSTX [58], двунаправленная печь на EAST [54]), так и ненаправленная прогреваемая током капиллярно-пористая структура (RFX-mod [53]). В условиях сферического токамака NSTX ($R = 85$ см, $a = 65$ см) двух испарителей было достаточно для расчетного полного покрытия литиевой пленкой нижнего дивертора установки. На более крупной установке EAST ($R = 190$ см, $a = 50$ см) литий наносился с пяти направлений, доля литиизированной площади первой стенки составляла до 85%. На обратном пинче RFX-mod ($R = 200$ см, $a = 46$ см), не оборудованном ни дивертором, ни лимитером, прогреваемая КПС с литием вводилась в одном месте; предполагалось, что испаренное

вещество перераспределится равномерно по стенке во время последующих плазменных разрядов.

Количество вносимого вещества также разнилось: за одну процедуру в NSTX испарялось от 20 до свыше 1000 мг (обычно около 200 мг) лития, на RFX-mod – около 1 г, на EAST – от 10 до 50 г. Суммарно за экспериментальную кампанию на первую стенку NSTX было нанесено 110 г лития [58], на EAST – 1.5 кг [54].

Общим для всех достигнутых результатов было снижение рециклинга. На NSTX коэффициент рециклинга упал с 0.98 до 0.90 (оценки по излучению на линии D_α [59] и моделированию пристеночной плазмы по коду SOLPS). На RFX-mod «коэффициент рециклинга» снизился с диапазона (0.98÷1.01) до (0.94÷1.00), на EAST он же – с уровня, близкого к 1, до 0.89 (в обоих случаях – оценки по сопоставлению эволюции плотности с включенным и выключенным газонапуском [53], [54]). В условиях EAST этот результат являлся наиболее обнадеживающим, так как предпринятые ранее попытки покрыть стенки бором или кремнием с помощью тлеющего разряда не оказывают положительного воздействия на «коэффициент рециклинга» [43]. Кроме того, отмечалось подавление примесей: на NSTX – кислорода; на RFX-mod наблюдалось снижение излучения на линиях примесей, особенно углерода; на EAST интенсивность излучения на линиях углерода, кислорода и молибдена после нескольких литиизаций снизилась в 3-30 раз, эффективный заряд при средней плотности не превышал 2.

Были отмечены и другие положительные эффекты. Например, с увеличением количества испаряемого лития на NSTX наблюдались такие положительные эффекты, как подавление ELM и рост энергетического времени жизни τ_E [59]. На EAST за счет снижения рециклинга понизился порог по мощности для перехода в H-моду [54]. Вышеперечисленное является весьма важным результатом с точки зрения планирования работы токамака-реактора.

Важной особенностью являлось лишь кратковременное влияние литиевых покрытий на рециклинг. На NSTX в [58] было отмечено, что без обновления литиевое покрытие функционирует только на протяжении одного – двух разрядов, после чего его эффективность заметно уменьшается. В EAST в ходе последовательности импульсов после литиизации по мере насыщения литиевого слоя рабочим газом «коэффициент рециклинга» рос с 0.89 до 0.96. На протяжении примерно первых 30 разрядов газонапуск, необходимый для достижения заданной плотности, весьма резко снижается от разряда к разряду. Это свидетельствует о процессе насыщения нанесенной литиевой пленки дейтерием.

В связи с этим в [59] и [60] были приведены результаты анализа механизма удержания дейтерия литием в углеродных элементах первой стенки установок. Выяснено, что захват дейтерия на их поверхностях происходит не только за счет формирования связей D-C (до литиизации) и D-Li (после нее), но и в виде связей типа D-C-Li, а также с остаточными атомами атмосферных газов. Таким образом, химический базис процессов удержания дейтерия является весьма сложным, и перспективным видится исследование этого процесса экспериментальными методами. Для этого образец углерода, аналогичный материалу первой стенки NSTX, подвергали покрытию литием, высаживая его слой разной толщины. После этого на образец направлялся поток ионов дейтерия, моделирующий воздействие плазмы. Было обнаружено, что для эффективного воздействия на рециклинг водорода требуется толщина литиевого слоя на поверхности порядка 300-500 нм [59]. Таким образом можно сделать оценку минимально необходимого количества лития, которое требуется внести в установку.

На RFX-mod, несмотря на положительные эффекты с точки зрения кондиционирования первой стенки и улучшения управляемости разряда, режима с улучшенным удержанием, аналогичным полученному, например, на EAST [43] и FTU [61], достичь не удалось. Авторы [53] связывают это с сильной неравномерностью покрытия литием первой стенки. Эффективной редепозиции лития по установке не наблюдается. Позднее, в работе [62], это было подтверждено исследованием образцов, размещенных в разных тороидальных положениях относительно испарителя, когда даже спустя несколько сотен разрядов по завершении литиизации характер тороидальной асимметрии сохранялся.

Размышляя о будущих токамаках-реакторах, авторы работы [54] подчеркивают возможность насыщения испаренного лития тритием. Делается вывод о том, что в этом смысле выгоднее использовать не напыление, а системы с проточным литием, оснащенные блоками очистки его от изотопов водорода.

1.2.2 Литиевые лимитеры с открытой поверхностью.

Еще одной из идей реализации литиизации камеры является создание литиевого лимитера. Наиболее простой метод при этом – это расположить в камере заполненную твердым или жидким литием емкость. За счет потока энергии на нее во время разряда с

поверхности лимитера испаряется некоторое количество вещества, которое перераспределяется по периферии плазмы и равномерно покрывает обращенную к плазме поверхность. В целом такие эксперименты в большей или меньшей степени моделируют установку с жидким покрытием первой стенки. При этом, однако, необходимо решить несколько проблем – как заполнить лимитер, как избежать выброса с него больших количеств лития в плазму и др.

В данном разделе кратко рассматриваются несколько работ, посвященных этому направлению. Они выполнялись в условиях установок DIII-D [63]; CDX-U [64]; HT-7 [42], [65]. Практическая реализация систем в значительной степени отличалась друг от друга. В диверторном токамаке DIII-D ($R = 170$ см, $a = 60$ см) в качестве литиевого лимитера использовался графитовый контейнер с выборкой в нем, в которую помещалась чашка из нержавеющей стали с 300 мг лития [63]. Площадь поверхности лития составляла ~ 5 см² при площади дивертора около 2 м². Контейнер выставлялся в нижней части установки таким образом, чтобы его поверхность находилась вровень с поверхностью графитовых пластин дивертора. На токамаке CDX-U ($R = 34$ см, $a = 22$ см, вытянутость 1.6) применялся кольцеобразный поддон из нержавеющей стали площадью 2000 см² и глубиной 0.5 см [64]. На токамаке HT-7 ($R = 122$ см, $a = 27$ см) был задействован не только стационарный литиевый лимитер (прямоугольная емкость из нержавеющей стали с площадью поверхности 377 мм² и глубиной 3 мм [42]), но и два варианта лимитеров с протеканием лития. В одном из них расплавленный металл под действием силы тяжести стекал по пластине из нержавеющей стали размерами 15×50 см [66], в другом – протекал по специальным каналам под действием термоэлектрического тока, возникающего из-за разности температур между обращенной к горячей плазме открытой поверхности лития и охлаждаемой подложкой, скрещенного с тороидальным полем в токамаке [67]. Обращенная к плазме поверхность лития имела при этом площадь 36 см².

На DIII-D, где поверхность лития была минимальной, никакого влияния на рециклинг эксперимент не оказал [63]. На токамаке CDX-U, напротив, положительный эффект был очевиден: если до установки литиевого лимитера дейтерий напускался только перед началом импульса, и плотность поддерживалась только за счет рециклинга, то в ходе литиизации потребовалось полностью открыть клапаны подачи рабочего газа, чтобы попытаться достичь необходимую плотность разряда [64]. Для развития успеха было предложено совместить системы литиевого лимитера с открытой поверхностью и литиевого испарителя [41]. Для этого в верхней части камеры

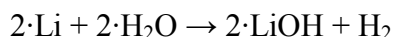
установки был размещен ввод электронного пучка, испаряющего перед разрядом вещество с поверхности литиевого лимитера. В результате литиизации было достигнуто снижение коэффициента рециклинга до 0.3, что было оценено из излучения на линии D_α в предположении, что в разрядах с пустым литиевым поддоном, когда газонапуск производился лишь перед началом разряда, а затем плазма поддерживалась только за счет выхода газа со стенок, коэффициент рециклинга равен 1 [68]. В условиях НТ-7 при использовании всех типов лимитеров также детектировались признаки снижения рециклинга (необходимость увеличения газонапуска для достижения требуемой плотности [42], снижение излучения на линии D_α [66]), но численные оценки не проводились.

Из прочих положительных эффектов необходимо отметить снижение содержания кислорода и углерода в несколько раз и увеличение времени удержания энергии с уровня $0.7 \div 1.1$ мс до $1 \div 6$ мс на CDX-U [64]. В свою очередь на НТ-7 излучение на линиях CIII и OV снизилось на 10-20% [42], а время удержания энергии выросло в наилучшем случае на 25% [6].

Но были отмечены и отрицательные стороны литиевых лимитеров с открытой поверхностью. Основная из них – это неконтролируемые выбросы расплавленного металла. На DIII-D любые МГД-процессы в плазме приводили к генерации сил $j \times B$ в жидком литии, в результате которых он ударялся в стенку чашки и выплескивался из нее. С помощью камеры регистрировалась инжекция литиевого фонтана со скоростью в несколько метров в секунду в вертикальном направлении [63]. Это приводило к частым срывам разряда. Как показали более поздние исследования [69], комбинация характерного размера области жидкого лития и возможных плотностей тока для условий литиевого лимитера в токамаке DIII-D оказывается нестабильной к воздействию электромагнитных сил. На НТ-7 при использовании стационарного литиевого лимитера также возрастало количество разрядов со срывами, а после вскрытия установки обнаружилось, что значительное количество лития покинуло поддон и оказалось разбрызгано на прилегающих поверхностях [70]. В случае лимитера с протеканием лития в первых опытах наблюдалась массовая эжекция капель с поверхности в направлении плазмы под действием электромагнитных сил $J \times B_T$ [65], приводящая к срыву разряда. Только в случае предварительно отоженной и обработанной литием поверхности подложки удавалось получить равномерное течение расплавленного металла по ней с эжекцией лишь отдельных капель малого размера. Исключением оказался токамак CDX-U, где съемки быстрой камерой показали

отсутствие возмущений на поверхности лития в поддоне во время разряда [64], что было связано с малыми значениями напряженности магнитного поля и тока по плазме.

В заключение необходимо отметить еще некоторые отрицательные черты данных техник. Например, в случае CDX-U внутри установки малого объема находится большое количество лития (масса до 300 г [68]). Если предположить, что в результате некоей аварии в вакуумную камеру начнет поступать вода, то в результате реакции лития с ней:



будет выделяться водород. Получившееся при этом в вакуумной камере давление можно рассчитать по формуле:

$$p = q_{\text{Li}} \frac{m_{\text{Li}}}{V_{\text{ves}} \rho_{\text{Li}}}$$

где $q_{\text{Li}} = 15 \text{ кДж/см}^3$ – тепловыделение лития при реакции с водяным паром [48], m_{Li} – масса лития, V_{ves} – объем вакуумной камеры, оцененный из чертежа установки, приведенного в [41], ρ_{Li} – плотность лития при рабочей температуре лимитера. Отсюда получается, что давление внутри камеры составит свыше 50 атм, что является совершенно недопустимой величиной с точки зрения безопасности [71].

Вообще, в случае лимитеров без протекания лития отсутствует простая методика обновления загрязненного расплава в поддоне по мере накопления в нем как изотопов водорода, так и более тяжелых примесей. В случае лимитеров с протеканием в системе установки можно организовать литиевый контур с возможностью очистки [72]. Однако сложности с равномерным покрытием направляющей подложки литием по состоянию на 2017 год окончательно не преодолены [73]. Также сложно оказывается задать скорость течения лития по ней: в случае лимитера с гравитационным механизмом на НТ-7 она оказалась примерно в 100 раз ниже ожидаемой (до 2.5 мм/мин вместо расчетных 0.5 – 1 см/с) [66].

В условиях высокой тепловой нагрузки на лимитер разработанная для НТ-7 система с протоком лития требует серьезного усовершенствования. Как показано в ряде работ (см., например, [74]), выход лития с поверхности экспоненциально растет с ростом температуры. Условия установки НТ-7 (периферийная температура 40 эВ [65], характерное значение потока частиц на стенку $4.4 \times 10^{21} \text{ 1/м}^2\text{с}$ [6]) достаточно близки к тем, при которых проводились измерения, представленные в работе [74] (температура 60 эВ, поток $8 \times 10^{21} \text{ 1/м}^2\text{с}$). В связи с этим, взяв значения выхода лития при рабочей температуре 350 °С из графика 6 работы [74] (см. Рис. 1.4.), можно легко оценить

уменьшение толщины слоя лития при прохождении им поверхности описываемого лимитера. Действительно, количество уходящих с поверхности лимитера атомов лития $N_{Li} = \Gamma_{Li} S_{lim} t = \Gamma_{Li} l_{lim} w_{lim} \cdot l_{lim} / v_{fl}$, где Γ_{Li} – выход лития, S_{lim} – площадь поверхности лимитера, t – время экспозиции потоку из плазмы, l_{lim} и w_{lim} – вертикальный и горизонтальный размеры лимитера соответственно, v_{fl} – скорость течения лития.

Толщину испаренного слоя можно оценить по плотности: $h_{abl} = \frac{N_{Li}}{n_{Li} l_{lim} w_{lim}} = \frac{\Gamma_{Li} l_{lim}}{n_{Li} v_{fl}}$.

Здесь n_{Li} – атомарная плотность лития, которая рассчитывалась с помощью формулы (2.3) из работы [48]. Полученное значение в 80 мкм приближается к расчетной полной толщине слоя лития на лимитере в 0.1 мм. Таким образом, лимитер работает в режиме, близком к критическому, и, например, при небольшом повышении температуры весь протекающий литий может уйти в плазму.

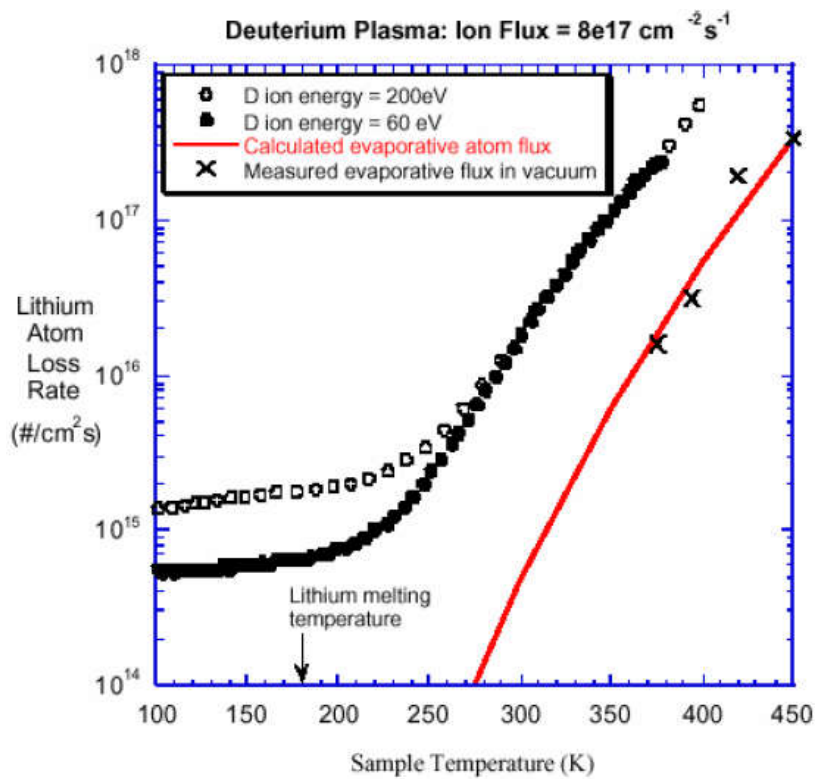


Рис. 1.4. Уход лития с поверхности: только за счет нагрева (красная кривая и черные крестики) и под действием потока ионов дейтерия (белые и черные круги) [74].

Тем не менее, разработчиками конструкция с протеканием лития по металлической направляющей поверхности была признана удачной, в связи с чем подобная система предлагается и для установки на токамак EAST [75]. В этой системе

будет совместно использоваться ряд технологий, ранее протестированных на токамаке НТ-7. Для повышения безопасности системы предполагается лимитирование используемого в инжекторе объема лития до 2.5 литров, подзарядка его по мере необходимости будет производиться в специальной камере. Поток лития протекает по покрытой нержавеющей сталью пластине размерами 300×350 мм, наклоненной под углом 13.4° к вертикали, под действием силы тяжести. Ожидается, что скорость протекания будет довольно мала и составит не более 10 мм/с. Тепловой баланс пластины достигается за счет использования электрических нагревателей и каналов охлаждения потоком гелия.

Тестирование на токамаке EAST показало в целом положительные результаты. Продемонстрирована работоспособность системы, не наблюдалось ее значительного перегрева, обнаружены признаки снижения рециклинга на периферии, при NBI разряд переходил в H-моду с короткими периодами без ELM. Однако сохранились и общие для метода проблемы: эжекция отдельных капель лития в плазму, неравномерное покрытие литием поверхности лимитера [73]. Сам лимитер в процессе эксперимента из-за контакта с плазмой получил повреждения, причиной этого, как предполагается, стал дефект изготовления конструкции [76].

1.2.3 Литиевые лимитеры на основе капиллярно-пористых структур (КПС).

В связи с перечисленными выше достаточно очевидными проблемами, главная из которых – трудность удержания лития на поверхности во избежание эжекции капель в разряд, был предложен вариант конструкции лимитера, который позволил бы справиться с данным недостатком. Для этого устройство изготавливается в виде капиллярно-пористой структуры (КПС, CPS), в большинстве случаев собранной из достаточно тугоплавкой проволоки, слабо подверженной коррозирующему воздействию лития (нержавеющая сталь, вольфрам). Перед инсталляцией в вакуумную камеру установки структура наполняется литием, который выходит на ее поверхность за счет капиллярных сил в виде очень тонкого слоя толщиной порядка размера пор, и продолжает поступать на нее по мере ухода атомов в плазму. Если снабдить такое устройство системой контроля температуры и охлаждения, то можно избежать возможного перегрева и связанного с ним экспоненциального роста выхода лития в плазму. На различных установках тестировались различные конструкции таких

лимитеров, были отработаны методики обновления их поверхности, при их использовании наблюдались положительные эффекты, связанные как с кондиционированием разряда, так и с переизлучением тепловой энергии равномерно по всей поверхности первой стенки вместо локализованных «горячих» областей.

Анализируемые ниже эксперименты проводились на установках T-11M [77], FTU [78], HT-7 [70], NSTX [79]. На токамаке T-11M ($R = 70$ см, $a = 25$ см) основное внимание сосредотачивалось на исследовании циркуляции лития внутри установки. Здесь была выбрана конструкция в виде вытянутой прямой молибденовой трубки, покрытой капиллярно-пористой структурой толщиной 0.6 мм, расположенной вдоль большого радиуса установки [77]. Внутри трубки располагалась система управления рабочей температурой. За счет того, что длина конструкции сравнима с малым радиусом плазмы, расстояние от центра шнура до различных участков КПС неодинаково. Таким образом, участок системы, наиболее приближенный к плазме, является «горячей точкой», и с него происходит испарение лития, наиболее удаленные участки являются «холодными», и на них должна наблюдаться конденсация. Интенсивность испарения оценивалась по излучению на линии LiI. Уход лития с горячей точки частично компенсируется приходом с холодных за счет капиллярных сил. Так в данной системе предполагалось продемонстрировать возможность организации замкнутого цикла лития. Позже для развития эксперимента число лимитеров с КПС было доведено до двух, а также был добавлен лимитер-мишень для сбора лития с возможностью охлаждения [80].

На FTU ($R = 93.5$ см, $a = 31$ см) [81] использовался трехсекционный литиевый лимитер [78] с возможностью управления рабочей температурой, который располагался в тени основного тороидального лимитера, так что расстояние от него до последней замкнутой магнитной поверхности могло изменяться в пределах от 0 до 4 см. Это расстояние влияло на значения падающего на лимитер потока частиц и тепла, тем самым оказывая влияние на поток лития в плазму с поверхности КПС из-за процессов физического распыления и испарения [82].

На HT-7 ($R = 122$ см, $a = 27$ см) на первом этапе применялась сборная КПС из двух слоев сетки размером 130×290 мм из нержавеющей стали с порами 150 мкм, укладываемой на поверхности утопленной в литии стальной пластины с большим количеством отверстий (см. [70], [83]). Система поддерживалась при температуре 230 °C за счет нагревателя. На следующем этапе экспериментов была отtestирована новая система подвижного литиевого лимитера на основе КПС из сетки из

нержавеющей стали с порами диаметром 100 мкм. Габаритные размеры лимитера остались практически без изменений (145×285 мм), но к нему была пристроена система для наполнения его свежим литием без вывода из вакуумной камеры НТ-7. Рабочая температура могла быть повышена до 350 °С.

Весьма оригинальный подход к реализации капиллярно-пористой системы был использован при создании литиевого лимитера на установке NSTX ($R = 85$ см, $a = 65$ см). Здесь предполагалось провести серию экспериментов с пониженной на 25-50% плотностью [84] для достижения условий, необходимых для генерации тока. Описанные в разделе 1.2.1.2. испарители лития давали положительный эффект, но сохранялся он на протяжении лишь 1-2 разрядов за счет связывания лития углеродом и поверхностного насыщения дейтерием. Для обновления литиевого покрытия было решено применить испаритель для наполнения расположенных под ними диверторных пластин. В качестве КПС в них использовался слой молибдена толщиной в 0.17 мм, напыленный с пористостью 45% (характерный размер пор 10 мкм, оценочная емкость 37 г лития) на пластины из нержавеющей стали. Они могли поддерживаться при заданных температурах в пределах 20-400°С. Такое устройство должно было дать возможность жидкому литию смочить дивертор и равномерно растечься по капиллярам. При этом ожидалось, что силы его поверхностного натяжения окажутся выше электромагнитных и позволят избежать разбрызгивания лития [79].

В результате экспериментов были зарегистрированы следующие положительные эффекты. Оценки показывают, что рециклинг рабочего газа на Т-11М снизился до 0.3-0.5 [77], уменьшился коэффициент рециклинга и на FTU [78], на НТ-7 [83] и NSTX [79] также отмечены признаки снижения рециклинга в виде необходимости повышения газонапуска для достижения требуемой плотности плазмы. Уменьшилось также содержание примеси: например, в Т-11М эффективный заряд в центре плазмы снизился до 1.1 [77]. В FTU эффективный заряд плазмы снизился до характерных значений около 1.5 [78], а в случаях разрядов со средней плотностью свыше $1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ – до 1.0 [61] по сравнению с уровнем 1.8, достигнутым после боронизации. При этом линии основных примесей установки (О, Мо, Fe) подавляются в 2-4 раза. На НТ-7 также заметно снизилось излучение на линиях кислорода и молибдена [83]. На NSTX увеличилось время удержания энергии [79]. Подтверждено предположение о высокой эффективности лития как вещества, способного переизлучить тепловую нагрузку. Тестовые эксперименты с плазменной пушкой показали, что в наиболее критической ситуации – в условиях срыва переизлучению подвергается 97-99 % идущей на лимитер

энергии [77]. В токамачном эксперименте при срыве излучение на линиях материала КПС находится практически на нулевом уровне, что свидетельствует об отсутствии повреждений сетки. Близкие результаты были получены и на FTU [85].

Были отмечены и отрицательные явления. Основной проблемой снова являлось разбрызгивание расплавленного лития, хотя и меньшее, чем в предыдущем случае. На T-11M ее удалось частично побороть: при характерном размере поры КПС более 30 мкм значительная доля лития попадает в плазму в виде капель диаметром до 1 мм, разлетающихся со скоростями 0.1-10 м/с [86], при меньших размерах при нормальном течении разряда разбрызгивания нет. В случае срывов, однако, полностью подавить разбрызгивание не удалось. С другой стороны, авторы [77] полагают, что это разбрызгивание не приводит к ухудшению параметров плазмы в последующих разрядах. На FTU также наблюдались кратковременные вспышки линий лития в плазме, а при визуальном обследовании камеры FTU после вскрытия было обнаружено множество литиевых капель. Авторы [78] связывают их появление со срывами и с возможными механическими вибрациями. На HT-7, так же, как и на T-11M, было показано, что при уменьшении размера пор и толщины слоя лития на поверхности лимитера возрастает его устойчивость к эжекции капель [65], [83].

В целом очевидно, что литиевые лимитеры с использованием капиллярно-пористых структур выглядят надежнее лимитеров с протеканием лития. Однако некоторые особенности системы выглядят проблематичными. Например, объемы лития в КПС предполагаются небольшими, в связи с этим они достаточно быстро окажутся насыщенными изотопами водорода, в результате чего система окажется еще одним источником рабочего газа, оказывающим влияние на глобальный коэффициент рециклинга. Прокачка лития через КПС для организации его циркуляции пока в должной мере не отработана. Проекты КПС, соединенных с литиевыми резервуарами, рассматриваются в настоящее время (например, [87]).

Кроме того, в условиях энергетического реактора возможны проблемы выбора материала КПС, не поглощающего нейтроны.

1.2.4 Инжекция литиевых макрочастиц

Избежать трудностей, связанных с неконтролируемым поступлением лития в плазму с лимитеров, можно с помощью инъекции его в виде металлических литиевых крупинок (макрочастиц или пеллетов). Инжекторы макрочастиц развиты достаточно

широко и успешно используются как для ввода топлива [22], для диагностических целей [88] и для выключения разряда [89]. Таким образом можно вносить заранее известное количество вещества. Испаряясь, макрочастица заполняет литием в плазму, после чего ионы вышедшие через сепаратрису, двигаясь вдоль силовых линий магнитного поля, имеют возможность выйти как раз на те элементы поверхности первой стенки, которые характеризуются максимально активным взаимодействием с плазмой. Если количество лития, попадающего на них из плазмы, превышает уход с них за счет эрозии и за счет диффузии в глубину вещества, то можно ожидать, что через некоторое время на поверхности сформируется литиевая пленка. По мере распыления вещества пленки под действием потоков из плазмы и насыщения ее примесями чистый литий можно добавлять, инжেকтируя новые макрочастицы.

1.2.4.1 TFTR

Токамак TFTR был оборудован графитовой стенкой и лимитером. Поэтому в эксперименте были важны проблемы снижения плотности, определяемой в основном процессом рециклинга рабочего газа, а также уменьшения притока ионов С за счет физического распыления лимитера. Эти задачи предполагалось решить с помощью пневматической инжекции литиевых макрочастиц диаметром 2 мм и такой же длины [90], которые содержали около $3 \cdot 10^{20}$ атомов. Макрочастицы влетали в плазму со скоростью 400-600 м/с [91].

На первом этапе инжекция производилась по одной макрочастице в гелиевые чистящие разряды, после чего в следующем разряде исследовалась плотность плазмы и излучение на линиях лития и углерода [3]. В ходе этой последовательности от разряда к разряду наблюдалось нарастание излучения LiII и снижение СИ, что свидетельствовало о постепенном накоплении лития на лимитере и подавлении им выхода углерода. Важно отметить, что содержание лития в плазме при этом оставалось незначительным, к концу серии его концентрация оказалась в 30 раз меньше концентрации углерода, что свидетельствует о малом загрязнении плазмы Li с лимитера. Зарегистрирован также спад интегральной плотности, причем с литием очистка стенки шла на порядок более эффективно, чем простым гелиевым разрядом.

Затем инжекция одиночной макрочастицы проводилась в DT разряды за 1 с перед началом NBI, чтобы у лития было достаточно времени для высаживания на лимитер. За этот отрезок плотность разряда, равно как и интенсивность излучения

углерода, снижались по сравнению с исходными значениями, плотность за счет убывания рециклинга со стенки приобрела более пикированную форму. Отмечено повышение на 5-14% времени удержания энергии.

Для проверки стойкости накопленного на лимитере покрытия после 25 разрядов с инъекцией внесение лития прекратили. После этого на протяжении 4 разрядов параметры плазмы вернулись к доинжекционному уровню.

Следующая попытка усилить эффект литиизации основывалась на методике preconditionирования: сначала в подготовительный омический разряд вносилось 2 литиевые макрочастицы, затем в целевой разряд перед NBI встреливалось еще две [90]. В результате удалось еще больше поднять время удержания энергии и нейтронный выход. Более поздние расчеты с использованием современного математического аппарата [92] показали, что в ходе серии из 4 разрядов с инъекциями приток дейтерия в плазму за счет рециклинга, оцененный по излучению на линии $D\alpha$, снизился более чем в 2 раза. Однако эффект оказался все так же недостаточно продолжительным: после 6-7 разрядов без инъекции как излучение на линии лития, так и время удержания энергии вернулись к исходным значениям (см. Рис.5, 6 в [90]).

Наконец, в работе [91] число внесенных в DT разряд TFTR перед началом NBI литиевых макрочастиц достигло 4. Статистическое исследование, результаты которого представлены на Рис.2 в этой публикации, показало для условий TFTR явную зависимость энергетического времени жизни от количества внесенного лития: без инъекции – 120-200 мс, с 1-2 инъекциями – 130-240 мс, с 4 – 200-330 мс. Для достижения указанных результатов в ходе разряда положение шнура поддерживали таким, чтобы минимизировать эрозию лития с внутреннего лимитера.

В результате были получены следующие результаты: снижен приток вещества со стенки, времена удержания энергии составили ~ 0.3 с. В пользу подавления потока углерода и водорода с лимитера говорят снизившиеся в 2-3 раза по сравнению с реперными разрядами интенсивности излучения на линиях Na и Ca . Особое внимание следует обратить на то, что на протяжении первых примерно 300 мс разряда возрастания периферийной плотности практически не отмечалось. После этого вместе с ее медленным нарастанием синхронно начали увеличиваться излучение водорода и углерода, замедлился рост τ_E , то есть произошло явное снижение эффективности литиевого покрытия. Следовательно, возможности литиизации при таком подходе внесения используются не полностью, и авторами было высказано предположение, что

одним из дальнейших методов развития литиевой инжекции может быть устройство для постоянного обновления лития на лимитере.

Таким образом, проведенные на TFTR эксперименты впервые показали применимость литиевой инжекционной технологии к плазме с параметрами, близкими к термоядерным. Они дали толчок к развитию целого комплекса направлений, где литий вносился в виде крупинки различного размера, ряд из которых будет описан ниже.

1.2.4.2 NSTX

Описанные выше успехи на TFTR стало толчком для начала литиевой программы на сферическом токамаке NSTX. В описываемых экспериментах в разрядах с NBI нагрузка на углеродные стенки установки составляла до 10 МВт/м^2 , при этом температура пластин поднималась до $300\text{--}400^\circ\text{C}$. Это создавало условия для активного захвата пластинами рабочего газа. Ранее на данной установке применялся целый ряд методик, направленных на снижение содержания примесей и уменьшения рециклинга дейтерия, так как контроль роста плотности и управление формой ее профиля необходимы для достижения длительной H-моды [52]. Комбинированием отжига, боронизации и использования различных чистящих гелиевых разрядов удалось разработать процедуры, поддерживающие приемлемый уровень примесей и темп роста плотности в достаточно коротких разрядах – до 1 с. Для достижения лучшего контроля плотности требовалось эффективнее управлять рециклингом на периферии плазмы, что и являлось мотивацией для проведения литиевых экспериментов.

В ходе эксперимента для ускорения литиевых частиц использовался 400-ствольный инжектор патронного типа, описанный в [93]. Он позволял вносить в разряд макрочастицы массой около 2 мг с достаточно низкими значениями скорости – около 100 м/с, обеспечивающими испарение вблизи от границы плазмы. В ходе разработки процедуры подготовки камеры для получения разрядов с низким рециклингом литий вносился как в омические разряды, так и в разряды с NBI, как до, так и во время нейтральной инжекции. Также проводилась инжекция лития в разряды, предшествующие изучаемым разрядам с NBI. Частое варьирование используемых режимов разряда требовалось для того, чтобы внесенный в результате инжекции литий высаживался на различных областях первой стенки установки (центральная колонна, нижний дивертор, верхний дивертор) в зависимости от реализуемой магнитной

конфигурации [41] и мощности нагрева, определяющей глубину проникновения макрочастиц.

Спектроскопические измерения показали, что на протяжении первой серии из 16 инъекций наблюдалось постепенное подавление излучения на линиях кислорода. С другой стороны, в первых экспериментах по инъекции литиевых макрочастиц ожидаемое снижение плотности за счет падения рециклинга получено не было.

На втором этапе перед литиизацией, по аналогии с экспериментами на TFTR [91], проводилась тщательная очистка камеры гелиевыми кондиционирующими разрядами и промерялись реперные импульсы. Затем в следующие 9 производилась инъекция литиевых макрочастиц с массами от 2 до 5 мг (суммарно 30 мг), в которой было отмечено дополнительное снижение излучения $D\alpha$ еще на 25%. Затем началась новая серия реперных дейтериевых импульсов. В результате в них удалось зарегистрировать снижение средней плотности на треть при том же уровне газонапуска в первом разряде после серии литиевых инъекций. Однако уже в следующих 1-2 разрядах плотность возвращалась к стандартным уровням [52], что подтверждает тот факт, что литий очень быстро насыщается дейтерием и перестает оказывать влияние на рециклинг рабочего газа. Подобная методика отработывалась для различных параметров разряда, результаты воспроизводились с незначительными вариациями, уменьшение усредненной по объему плотности в первом разряде после литиизации по сравнению с реперным не превышало 50%.

Таким образом, эксперименты по инъекции литиевых пеллетов в плазму NSTX показали некоторое уменьшение как содержания примесей в плазме, так и рециклинга, причем эффект уверенно наблюдался лишь в первых одном-двух импульсах. Кроме того, в работе [58] отмечается склонность омических разрядов NSTX к срыву по инъекции при глубоком проникновении макрочастицы в плазму.

1.2.4.3 RFX-mod

В условиях уже упоминавшейся в разделе 1.2.1.2. установки RFX-mod проводились также серии экспериментов по управлению параметрами первой стенки установки методом инъекции литиевых макрочастиц. Это было связано с тем, что системы с использованием литиевого испарителя не давали возможности покрыть обращенные к плазме поверхности равномерно [53]. В результате за счет высокого рециклинга со стенки, а также выбросов водорода и углерода при характерных для

системы локализованных актов взаимодействия плазмы со стенкой, наблюдались неконтролируемый рост плотности и охлаждение периферии плазмы. Инжекция литиевых макрочастиц предполагалась как метод, позволяющий внести в плазму контролируемое количество лития; ожидалось, что атомы его после выхода из плазмы равномерно распределятся по поверхности первой стенки.

В первой из серий экспериментов [94] использовался инжектор, позволяющий вносить в плазму один раз за разряд макрочастицу диаметром 1.5 мм и длиной 4.5 мм, что соответствовало объему около 8 мм^3 и весу около 4 мг. Таким образом, можно рассчитать содержание атомов лития в одной макрочастице, которое близко к $3.5 \cdot 10^{20}$. Устройство позволяет вносить макрочастицы со скоростями в пределах 50-400 м/с [95], при этом в эксперименте скорость подбиралась так, чтобы при заданных параметрах плазмы основное испарение происходило вблизи центра плазмы. Соответственно в условиях $T_e = 700 \text{ эВ}$, $n_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $I_p = 1\text{-}1.2 \text{ МА}$ необходимая скорость составляла 130 м/с. Испаренное в центральной части шнура вещество выносилось на стенку за счет постоянной МГД-активности плазмы в RFX-mod. Ожидалось, что подвижность точек взаимодействия плазмы со стенкой в этой безлимитерной установке позволит равномерно распределить литий по поверхности стенки.

В результате серии экспериментов было показано, что после литиизации улучшаются условия управляемости плотностью разряда по сравнению как с чисткой тлеющим гелиевым разрядом, так и с боронизацией. Однако, как и на других установках, эффект держался на протяжении всего нескольких разрядов, после чего литий насыщался водородом и переставал оказывать воздействие на рециклинг рабочего газа. Было продемонстрировано снижение уровня основных примесей (углерода и кислорода). За счет уменьшения выхода газа с первой стенки плотность приобрела более пикированный вид, а периферийная температура возросла. На 10-20% повысилось и время удержания частиц.

Для усиления детектированных положительных эффектов авторами [62] было принято решение увеличить ввод лития в установку. В следующей серии экспериментов использовался частотный инжектор литиевых макрочастиц [4], разработанный для токамака EAST с целью управления ELM. С его помощью литиевые шарики диаметром 1 мм инжектировались в плазму с частотой 250 Гц, создавая поток лития 70 мг/с ($6 \cdot 10^{21} \text{ ат/с}$), или примерно 25 мг в разряд. Это в 6-7 раз превышало массу лития, вносимую в разряд в случае однократной инъекции.

Для усиления предполагаемого эффекта накопления лития на стенках RFX-mod инжекция производилась в виде двух серий. В первой из них очередь макрочастиц инжестировалась в 40 идущих подряд подготовительных гелиевых разрядов, внося тем самым 1.1 г лития примерно за 2 дня, а затем инжекция проводилась уже в водородные разряды для исследования влияния литиизации на поведение плазмы. Суммарно за кампанию было внесено 2.3 г вещества.

Результаты, полученные в результате литиизации, к сожалению, не сильно превысили таковые, достигнутые в ходе однократной пеллет-инжекции. Было отмечено снижение рециклинга рабочего газа, уменьшение содержания примесей углерода и кислорода, а также незначительное на фоне высоких погрешностей оценки увеличение времени удержания частиц. Положительной стороной метода оказалось формирование 50 нм слоя лития на поверхности помещенных вовнутрь установки графитовых образцов, причем тороидальная равномерность создаваемого покрытия как в случае однократной, так и многократной инжекции макрочастиц оказалась на приемлемом уровне. Для достижения более четко выраженного результата авторы предлагают повысить внос лития для превышения уровня в 1 грамм в день. Для этого планируется использование макрочастиц диаметром 1.5 мм с более высокой частотой повторения.

1.2.5 Лазерное распыление лития.

Как видно из предыдущего подраздела, инжекция литиевых макрочастиц обладает определенной привлекательностью за счет того, что системы инжекции расположены вне установки, что упрощает как управление ею, так и технологический процесс пополнения запаса лития. С другой стороны, весьма спорной особенностью является то, что макрочастицы лития проникают достаточно глубоко в плазму. Испарение их в центральных областях шнура снижает температуру и повышает содержание примеси. Хотелось бы, чтобы вносимый для управления параметрами разряда литий оставался на периферии как области, играющей определяющую роль в поступлении примеси и рециклинге рабочего газа. Очевидно, что инжекция макрочастиц меньшего размера приведет к их неглубокому проникновению. С этой точки зрения оказывается наиболее выгодным вносить вещество в качестве пылевой струи.

Одна из первых попыток реализовать подобный метод инжекции была предпринята на токамаке TFTR [21]. Мотивация этих экспериментов уже описана в

разделе 1.2.4.1., где было обращено внимание и на достигнутые при этом положительные результаты. Было решено попытаться добиться сходного эффекта менее возмущающими центральную плазму методами. Для этого внутри вакуумной камеры в ее нижней части в 15 см ниже лимитера была установлена небольшая (17.5 см^3) емкость с литием. Емкость нагревалась за счет пропускания тока по танталовому проводу до 250°C . После отжига контейнер не производил возмущения вакуума внутри камеры установки. В направлении плазмы вещество распылялось с помощью сфокусированного на поверхности лития лазерного луча, подающего импульсы длительностью 8 нс с частотой 30 Гц. Количество распыляемого лития зависело от настроек фокусировки лазерного луча. При оптимальной по потоку фокусировке в вакууме капли лития, размер которых авторами оценивался в 0.1-0.5 мм, выбрасывались на высоту свыше 1 м над поверхностью. Отсюда нетрудно рассчитать, что скорость капель на выходе из тени лимитера составляла 4 м/с. Поток при оптимальной фокусировке оценивался в 20 мг/с ($2 \cdot 10^{21}$ ат/с).

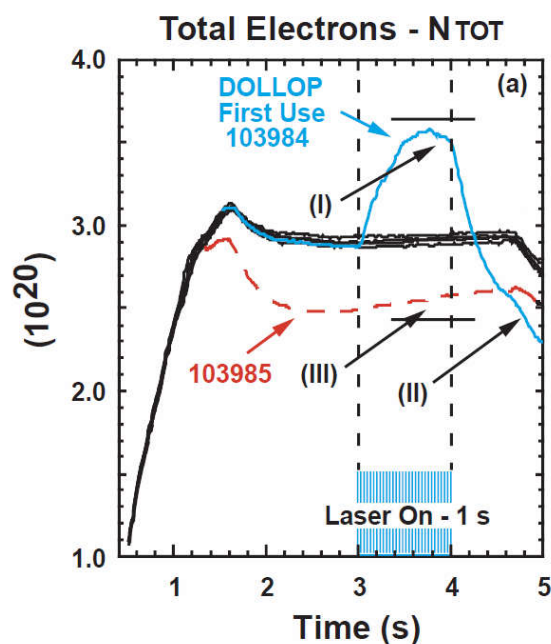


Рис. 1.5. Эволюция содержания электронов в TFTR в реперных разрядах (черные кривые), разряде с распылением лития с помощью лазера (103984) и последующем разряде без распыления лития (103985) в зависимости от времени.

В первую очередь были выполнены тестовые эксперименты, в которых в омическом режиме система распыления работала на протяжении 0.5-1 с. Наблюдаемые эффекты сравнивались с реперным разрядом до литиизации, где плотность

поддерживалась только за счет рециклинга с графитового лимитера. Во время инъекции наблюдался сначала быстрый рост содержания частиц в разряде, связанный с внесением вещества, а затем за счет связывания литием рабочего газа эволюция плотности стабилизировалась, и ее значение начинало слабо убывать, несмотря на приток вещества (Рис. 1.5.). После отключения лазера распад плотности ускорился. В следующем импульсе, где инъекция не производилась и плотность снова поддерживалась только за счет рециклинга, квазистационарный уровень содержания частиц оказался примерно на 15% ниже, чем в реперном, и слабо рос по ходу разряда, что можно было связать с постепенным насыщением лития дейтерием.

В ходе второй стадии эксперимента авторы стремились получить максимально возможный эффект от литиизации. Для этого сначала проводилась серия из примерно 20 подготовительных разрядов, в которых литиевые макрочастицы (суммарной массой 10 мг) инжестировались в омическую плазму для создания кумулятивного эффекта лития на лимитере. Затем в рабочий разряд на его начальной стадии востреливалось еще 2 макрочастицы по 3 мг каждая. Система же распыления лития в этом случае функционировала на протяжении всего разряда.

В результате были отмечены следующие положительные эффекты. Были достигнуты рекордные для дейтериевых разрядов TFTR значения времени удержания энергии 270 мс, причем в течение разряда эта величина возрастала, в отличие от падающей в реперном разряде. Авторы связывают это с эффективным подавлением выхода водорода с лимитера. Одновременно с этим произошло подавление примесей, эффективный заряд в центральной области плазмы составлял 1.2-1.3. Это свидетельствует также в пользу того, что литий не проникает в глубину плазмы с периферии. С помощью линейки фотодиодов, направленных на углеродный лимитер, было отмечено, что внесенное вещество высаживается в основном в областях максимальных потоков энергии и частиц на обращенные к плазме поверхности. Это дает основание рассчитывать на аккумуляцию внесенного в результате периферийной инъекции лития именно на требующих защиты участках, а не на равномерное распределение покрытия по всей первой стенке.

1.2.6 Инжекторы пылевой струи.

Был предложен еще один привлекательный метод внесения лития в плазму установок с магнитным удержанием. Он обладает, с одной стороны, простотой работы

с расположенным полностью вовне вакуумной камеры инжектором. С другой стороны, равно как и лазерное распыление, он позволяет вносить литий в виде мелких частиц регулируемым потоком в периферийные области плазмы, где будет происходить их испарение, ионизация и перемещение вдоль силовых линий магнитного поля на обращенные к плазме элементы первой стенки токамака. Было предложено две разновидности данного метода. В первом варианте производится инжекция струи расплавленного лития, которая распадается под действием неустойчивостей на отдельные капли, влетающие в плазму. Во втором варианте происходит инжекция струи из заранее изготовленной литиевой пыли с помощью различных дозаторов.

1.2.6.1 Литиевый дроппер на NSTX и DIII-D.

В описываемых ниже экспериментах на токамаках NSTX и DIII-D для внесения в плазму использовался порошок из крупинок металлического лития средним диаметром 44 мкм с пассивированной поверхностью. Более подробно параметры этого вещества будут рассмотрены в Разделе 2.1.5.1. Непосредственная инжекция субстанции происходила с помощью дозатора («дроппера») на основе пьезокристаллической мембраны, описанного в работе [26]. Поток порошка через отверстие в мембране зависел от частоты и амплитуды приложенного к пьезоэлементу напряжения. Таким образом, параметры вносимой в плазму пылевой струи можно было менять в пределах от 1 до 120 мг/с, что соответствует потокам примерно $(0.1-10) \cdot 10^{21}$ атом/с. Дроппер размещался над вакуумной камерой каждой из установок, и выходящий из него литий влетал в плазму под действием силы тяжести.

В ходе экспериментов была продемонстрирована устойчивость разряда NSTX к инжекции литиевой пылевой струи сначала на потоках до 40 мг/с [58], а затем, после инсталляции второго такого же источника, и до 220 мг/с [26]. Такой результат был отмечен как весьма выигрышный по сравнению с литиевыми макрочастицами, когда разряд демонстрировал повышенную частоту срывов при инжекциях [58]. В той же работе подчеркивалось и более эффективное действие лития: дозы ~ 10 мг лития, внесенные в плазму на начальной стадии разряда, приводили к тому же эффекту в терминах увеличения времени удержания частиц, который достигался после литиевого напыления в несколько сотен миллиграммов. Постоянный с момента начала разряда внос литиевой пыли 220 мг/с приводил к подавлению рециклинга, что видно по 2-3-кратному снижению излучения на линии $\text{D}\alpha$ на протяжении практически всего

разряда по сравнению с реперным. Кроме того, начиная примерно с 500 мс разряда наблюдалось подавление ELM, что приводило к некоторому росту запасенной в шнура энергии за счет повышения электронной и ионной температуры. Кроме того, видеокамера зарегистрировала создание излучающего литиевого слоя на периферии плазмы и в области дивертора. Это может являться дополнительным подтверждением возможности использования лития как вещества, способного равномерно распределять тепловой поток, идущий из плазмы на элементы первой стенки, за счет переизлучения.

На токамаке DIII-D основной целью эксперимента также являлось подавление ELM [5]. Дроппер здесь работал в единственном экземпляре, создавая потоки лития 9-90 мг/с или $(0.8-8) \cdot 10^{20}$ ат/с. В результате было обнаружено подавление примесей – как углерода, так и более экзотического никеля. Соответственно снизился уровень излучаемой из плазмы мощности. Вносимый в ходе экспериментов в одной точке литий формировал не только равномерно излучающий на линии LiII слой в периферийной области плазмы, но и проникал в центральные области, что регистрировалось с помощью перезарядки. Стоит отметить, что в работе [21] отмечалось как раз, что в случае лазерного распыления литий в центр плазмы не поступает. Рециклинг рабочего газа – дейтерия остался на прежнем уровне. Эффект оказался нестойким: несмотря на то, что спектральные линии лития регистрировались в последующих разрядах без инъекции, поведение разрядов после завершения литиевых экспериментов оказалось таким же, как и в реперных разрядах до литиизации. Относительно основной цели эксперимента в работе были определены необходимые для управления ELM потоки лития. Для условий DIII-D потоки в 9 мг/с незначительно снижали частоту неустойчивости, в 18 мг/с создавали свободные от ELM паузы длительностью до 300 мс в ходе разряда, а потоки в 36 мг/с в ряде случаев переключали разряд в L-моду с низким удержанием. Оптимум эффекта авторы работы связывали с достижением выгодной с точки зрения МГД-стабильности формы профиля периферийного ионного давления.

1.2.6.2 Литиевый дроппер на EAST.

Первые эксперименты с литиевым дроппером, аналогичным используемому на NSTX [26], на токамаке EAST описаны в работе [43]. В ходе осенней кампании 2010 года инъекция производилась в основном со следующими стандартными параметрами: поток лития 30-50 мг/с инжектировался на протяжении 1 с. После трех разрядов с

инжекцией измерялось остаточное давление газов в камере и сравнивалось с давлением до инъекции. После каждой из таких серий давление уменьшалось в среднем на 25%. Кроме того, в ходе разряда во время и после инъекции наблюдалось уменьшение плотности плазмы при том же уровне газонапуска, а также снижение излучения на линии $\text{H}\alpha$. Все это свидетельствует о том, что первая стенка становится усиленным стоком водорода, уменьшая тем самым его рециклинг.

Было также отмечено, что инъекция литиевой пыли в разряд приводит к подавлению МГД-активности плазмы [74]. Авторы связывают это с тем, что при использовании лития значительно снижаются излучательные потери на периферии из-за уменьшения потока примеси со стенки. В результате профиль электронной температуры плазмы по окончании инъекции оказывается шире, чем таковой до начала инъекции. Это расширение может быть связано и с понижением рециклинга. Аналогичная взаимосвязь между ростом периферийной электронной температуры и подавлением периферийной МГД-активности была указана и в [61], [85].

В экспериментах 2012 года инъекция лития производилась с потоками 30-60 мг/с и длительностью до 30 секунд [6]. Скорость литиевых пылинок на входе в плазму составляла около 10 м/с. В данных экспериментах инъекция пыли производилась в разряды с Н-модой. Здесь, так же, как и в экспериментах на NSTX [26], [58], наблюдалось подавление ELM во время инъекции по сравнению с разрядами без инъекции. Одновременно с этим наблюдалось снижение примерно на 25% излучения на линии MoI , что является весьма важным моментом для установки с молибденовой первой стенкой. Авторы [6] предполагают, что именно это может являться причиной подавления ELM.

Кроме того, из-за инъекции литиевой пыли заметно выросло излучение на периферии плазмы в районе дивертора. Тем самым в условиях горячей плазмы это может помочь перераспределить и снизить тепловую нагрузку на отдельные элементы первой стенки, что особенно важно при разработке ее конструкции в термоядерном реакторе (см., например, [45]).

Таким образом, литиевая пылевая инъекция видится как современный метод, позволяющий управляемо вносить струю вещества именно в периферийные области плазмы, создавая тем самым наиболее благоприятные условия для его распространения в SOL и высаживания на обращенные к плазме поверхности первой стенки. Тем самым достигается снижение выхода с них как рабочего газа, так и более тяжелых примесей – то есть улучшается как контроль плотности, так и чистота центральной плазмы.

Создание периферийного излучающего слоя для равномерного перераспределения тепловой нагрузки, идущей на strike point дивертора, на более широкую область, а также подавление ELM, являются важными преимуществами, позволяющими предвидеть использование систем такого типа на установках типа токамака-реактора.

1.2.7 Проблема сбора лития в камере установки.

В конце данного параграфа хотелось бы кратко остановиться на еще одной проблеме, связанной с литиевыми технологиями. Она проявляется на всех установках и связана с тем, что рано или поздно вакуумная камера открывается на атмосферу, что приводит к достаточно быстрой коррозии лития с переходом его в хрупкую пористую структуру, состоящую в основном из Li_2CO_3 . Количество внесенного в камеру вещества может измеряться килограммами [79], так что проблема может иметь серьезный масштаб. Перед началом следующей экспериментальной кампании карбонат необходимо удалить во избежание поступления в плазму как атмосферных газов из пор, так и самих соединений лития, осыпающихся при вибрациях установки.

Основным методом удаления карбоната в настоящее время является ручной способ. В случае углеродных поверхностей оказывается разумным использовать механическую очистку. В условиях углеродных стенок токамака NSTX для этого производилась шлифовка панелей [59]. После экспериментов по напылению на EAST [6] пленка Li_2CO_3 удалялась также вручную мокрой тряпкой (тут необходимо отметить умеренную растворимость соединения в воде). В случае нахождения лития на развитой металлической поверхности применялись химические методы. Например, напыленный на пористую структуру в диверторной зоне NSTX литий выдерживался неделю во влажной атмосфере, после чего покрытые Li_2CO_3 пластины помещали на 20 минут в уксусную кислоту CH_3COOH , где карбонат преобразовывался в растворимый ацетат, удаляемый затем промыванием. В токамаке HT-7 подвергшиеся забрызгиванию литием в ходе неудачных экспериментов с лимитером с открытой поверхностью стальные и углеродные участки очищались от Li_2CO_3 сначала вручную, затем омывались уксусом, водой и этанолом [70], что удивительно в плане нерастворимости карбоната в последнем.

В плазменных установках меньшего размера прямой доступ к первой стенке камеры обеспечить не удастся, поэтому с образованием соединений лития приходится бороться сложными методами. В пинче RFX-mod для подготовки вскрытия камеры

после литиизации применяется аргоновая чистка и боронизация, кроме того, время вскрытия минимизируется [53]. Поэтому для установок, отличающихся небольшими размерами, проблема вскрытия камеры после литиизации стоит весьма остро. Одним из методов производства кратких, например, аварийных работ на камере, является временное создание в ней повышенного давления инертного газа. В случае длительного вскрытия токамака вопрос пока до конца не решен.

Из-за сложности процесса очистки поверхности первой стенки от соединений лития после вскрытия вакуумной камеры установки необходимо проведение тщательных оценок оптимального количества вносимого лития и исследование областей его высаживания на обращенных к плазме элементах.

1.3 Выводы из обзора литературы и постановка задач.

Исследование взаимодействия примесных веществ с плазмой установок с магнитным удержанием до сих пор является весьма актуальным направлением исследования, так как внос примеси может использоваться как для диагностики плазмы, так и для управления разрядом. С точки зрения достижения УТС самым важным является создание оптимальных условий для взаимодействия плазмы со стенкой, не приводящих к значительном загрязнению первой и разрушению последней. Были рассмотрены существующие методики внесения примеси в плазму, а также известные модели для расчета скорости испарения внесенной в виде макрочастиц примеси.

Внесение примеси в плазму приводит к явлениям, которые оказывают значительное воздействие на испарение и соответственно распределение внесенного вещества вдоль малого радиуса. Среди них можно выделить явление быстрого (нелокального) переноса. Одно из его проявлений – возникновение в центральной области плазмы при изменении температуры на периферии противоположного по знаку возмущения, причем развиваться оно начинает значительно раньше, чем до его области локализации доходит воздействие с края шнура за счет обычного переноса тепла. Еще одно проявление, наблюдавшееся при инъекции макрочастиц – более быстрое охлаждение внутренних областей плазмы по сравнению со скоростью внесенной макрочастицы. Наблюдаемые в эксперименте явления должны учитываться при расчете внесения примеси в плазму.

Было рассмотрено множество предложенных в последнее время методов внесения лития в плазму. Литиизация использовалась в двух подходах – либо как

напыление слоя лития до разряда, в котором требовалось получить улучшенные параметры рециклинга, меньшее содержание тяжелой примеси и т.д., либо как непосредственно внесение лития во время текущего разряда. В ряде случаев совмещались оба подхода.

В результате использования литиевых технологий на различных установках достигались положительные результаты. Практически во всех случаях наблюдалось уменьшение рециклинга рабочего газа и снижение содержания основной примеси установки в плазме. Эти явления, особенно подавление за счет уменьшения рециклинга выхода холодного газа с обращенных к плазме поверхностей, имели и вторичные, не менее важные, последствия: увеличивалось удержание энергии в плазме, улучшались условия нагрева, подавлялись ELM и т.д. Все это свидетельствует в пользу того, что у литиевых технологий как метода управления параметрами разряда установок с магнитным удержанием плазмы есть широкие перспективы.

Каждая из рассмотренных технологий применения лития для управления разрядом в установках с магнитным удержанием обладает, наряду с положительными, и своими отрицательными сторонами.

Использование литиевых испарителей с большими локализованными потоками покидающих устройство атомов затруднено в установках, оптические окна которых не оборудованы шторками (например, [94]). То же самое можно отнести и к портам ввода электромагнитной мощности, металлизация которых недопустима. Также было экспериментально подтверждено [62], что создаваемое покрытие характеризуется сильной зависимостью от расстояния до источника лития. Это значит, что для создания равномерного покрытия стенки с помощью испарителя требуется создание сложной системы перемещения его внутри установки при подготовке к разрядам либо размещение в ней нескольких испарителей. Кроме того, такие системы не дают возможности в реальном времени компенсировать изменение параметров покрытия за счет насыщения его рабочим газом и примесями.

Лимитеры с открытой литиевой поверхностью можно создавать достаточно больших размеров, что должно обеспечить значительное влияние на рециклинг рабочего газа. Однако этот эффект окажется непродолжительным, так как по мере насыщения лимитера дейтерием его свойства будут ухудшаться. При переходе к системам с протекающим литиевым потоком возможно реализовать постоянно обновляющееся покрытие лимитера. Его площадь можно наращивать в больших пределах, приближаясь к условиям полностью литиевой стенки без ограничения

длительности эффективной работы из-за накопления в литии рабочего газа и примесей при создании замкнутой петли циркуляции лития через систему очистки. Однако на настоящем этапе пока технически сложно реализовать протекание однородного литиевого потока по поверхности. Неравномерность смачивания основы, а также влияние магнитных полей плазмы приводят к случаям эжекции капель из потока в плазму, что грозит срывом. Кроме того, контуры с большим запасом лития несут в себе угрозу крупных нештатных ситуаций при возможном прорыве в камеру воды из системы охлаждения (подобные случаи уже случались на установках с использованием лития, но в меньших масштабах [6]).

Капиллярно-пористые системы также дают возможность создать литиевый лимитер и тем самым оградить плазму от соприкосновения с другими элементами стенки. Одновременно они формируют более тонкий слой лития, который можно довести всего до единиц микрон [96], что уменьшает вероятность разбрызгивания крупных капель. Если совместить лимитер с литиевым резервуаром посредством трубки, на поверхности КПС, несмотря на постоянное испарение под действием плазмы, будет находиться слой свежего лития. Однако выход лития из такой системы в плазму зависит от тепловой нагрузки на нее, при росте температуры КПС выше 450°C литий начинает активно испаряться и насыщать собой плазму. При невозможности быстро компенсировать уход лития возможно повреждение самой структуры КПС. В связи с этим устройства подобного типа необходимо оснащать сложными системами поддержания рабочей температуры. При этом таковые системы должны обладать весьма низкой инерционностью, так как тепловое воздействие, например, в случае ELM может меняться в десятки раз за характерные времена порядка десятков миллисекунд. При работе КПС в качестве испарителей лития между разрядами управление их тепловым режимом упрощается, но идея приобретает отрицательные стороны, свойственные прочим испарителям.

Инжекторы литиевых макрочастиц подкупают простотой обслуживания за счет того, что они располагаются с наружной стороны установки, и не требуют сложных систем стабилизации температур. Оборудование для внесения лития может быть при необходимости использовано также и для инъекции других примесей, находящихся в твердом состоянии при комнатной температуре, например, с диагностическими целями. Стандартные инжекторы позволяют вносить литий в достаточно больших диапазонах масс и скоростей, современные системы отличаются и достаточно высокой частотой инъекций до сотен Гц. Главный их минус заключается в том, что принцип инъекции

крупных макрочастиц в разряд является значительно возмущающим плазму процессом [21], ассоциируемым с мощными краткосрочными прироста плотности электронов, чреватых срывом. В результате этого инъекцию литиевых макрочастиц в основном можно рассматривать как метод подготовки внутренней поверхности установки по аналогии с чистящими режимами. Сделанное в [91] важное наблюдение, показывающее, что даже после продолжительной литиизации в последующих импульсах без инъекции положительный эффект начинает уменьшаться через ~ 300 мс, говорит о том, что для дальнейшего улучшения параметров разряда необходимо организовать непрерывный приток лития.

Инъекция литиевых пылевых струй может проводиться на протяжении практически всего разряда, и происходит непосредственно в пристеночную плазму и приводит к минимальным пертурбациям центральной плазмы. Например, в [21] вовнутрь последней замкнутой магнитной поверхности проникало не более 5% вносимого лития, а испарившееся на периферии вещество высаживалось на лимитере в области максимальных потоков на него. Связывание рабочего газа и атомов лимитера на его поверхности с помощью литиизации должно оказать большое воздействие на рециклинг дейтерия в частности и соответственно управляемость разрядом в целом.

Таким образом, методика внесения лития непосредственно в разряд выглядит наиболее приемлемой. Исходя из имеющихся технических возможностей, было принято решение действовать в двух направлениях: попытаться использовать имеющееся в распоряжении оборудование для инъекции литиевых макрочастиц, и в параллель разрабатывать технологию доставки в плазму литиевой пылевой струи.

На основании вышеизложенного были сформулированы следующие задачи диссертационной работы:

1. Экспериментальные исследования физических процессов при инъекции углеродных макрочастиц в плазму стелларатора Wendelstein 7-AS и токамака T-10.
2. Разработка аппаратуры для инъекции 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.

2. Экспериментальные установки и оборудование.

Данная глава работы посвящена как собственно термоядерным установкам по магнитному удержанию плазмы, на которых производились описываемые в работе эксперименты, так и оборудованию, с помощью которого вносилась в плазму примесь. Первый параграф рассказывает об экспериментах, выполненных на токамаке T-10. Описание его самого и действующего на нем комплекса основных диагностик приведено в достаточно сжатом формате и снабжено ссылками на более детальные публикации. Новые устройства и технологии, разработанные в процессе выполнения работы, представлены более развернуто. Второй параграф дает общее представление о стеллараторе Wendelstein 7-AS и его диагностическом комплексе, установленный на нем диагностический инжектор макрочастиц описан скупом из-за его схожести с использовавшимся на токамаках T-10 [97], Asdex Upgrade [98].

2.1 Система инжекции примеси в токамак T-10.

В ходе подготовки данной диссертационной работы на токамаке T-10 проводились эксперименты по инжекции углеродных и литиевых макрочастиц, а также литиевых струй. Для регистрации результатов экспериментов использовался как основной диагностический комплекс токамака, так и система регистрации испарения примеси, разработанная специально для этих целей.

2.1.1 Токамак T-10 и его диагностический комплекс.

Установка T-10 была запущена в 1975 году [99], и в настоящий момент является крупнейшим действующим токамаком на территории Российской Федерации. С другой стороны, по мировым стандартам он классифицируется как токамак средних размеров с металлической камерой без дивертора. Его большой радиус составляет 150 см. Малый радиус плазменного шнура, обладающего круглым сечением, в описываемых экспериментах ограничивался подвижным углеродным лимитером и менялся в пределах 30-33 см. Кроме того, на установке была предусмотрена кольцеобразная диафрагма, зафиксированная на 37 см. Омический ток по плазме варьировался в пределах от 200 до 300 кА, тороидальное магнитное поле составляло около 2.5 Тл.

Характерные значения средней плотности в описываемых экспериментах находились в пределах $(1.5-6) \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при центральной электронной температуре в 900-1100 эВ в омических разрядах и до 1400 эВ в разрядах с дополнительным электрон-циклотронным нагревом (ЭЦН). Мощность ЭЦН составляла до 1.5 МВт.

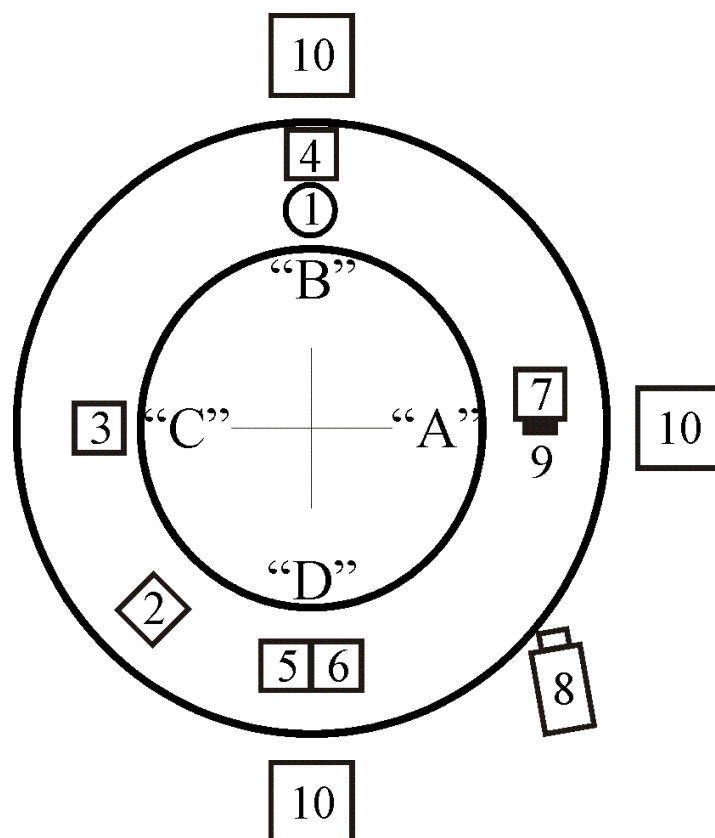


Рис. 2.1. Расположение основных компонентов и диагностик на токамаке T-10. 1 – инжектора примесных макрочастиц и пылевых струй, 2 – приемник ЭЦИ, 3 – СВЧ-интерферометр, 4 – лазерный интерферометр, 5 – пирозлектрические болометры, 6 – детекторы AXUV, 7 – МГД-зонды, 8 – видеокамера, 9 – лимитер, 10 – гиротроны.

Размещение основных компонентов и диагностик установки показано на Рис. 2.1. Установка условно подразделяется на 4 сечения от «А» до «D». Каждое сечение оборудовано патрубками и окнами для размещения диагностик. Инжектора примесных макрочастиц и литиевых пылевых струй (поз. 1) располагались в сечении «В», там же монтировалась и система регистрации испарения макрочастиц, описываемая в следующем параграфе. Эволюция профиля электронной температуры контролировалась с помощью приемника излучения на второй гармонике электрон-циклотронной частоты (ЭЦИ) (поз. 2) (см. [100] и ссылки в ней), за счет расширенного

диапазона частот можно было получать сведения и о надтепловой компоненте электронов. Профиль электронной плотности можно было получить по данным двух диагностик: СВЧ-интерферометра (поз. 3) [101] и лазерного интерферометра (поз. 4) [102], оптимизированного для работы в том числе в условиях резких скачков плотности при инжекции [103]. В каждом из интерферометров имелось по 8 хорд, однако из-за технических проблем отдельные каналы время от времени теряли работоспособность. Таким образом, для получения достаточно качественного профиля плотности использовались данные обеих диагностик, сведенные вместе с помощью системы сбора, архивизации и обработки данных DAS Tools [104]. Для исследования радиационных потерь из плазмы также использовались две болометрические диагностики – на основе линеек пирозлектрических болометров (поз. 5) и быстродействующих полупроводниковых детекторов AXUV (поз. 6) [105], [106], состоящих из 14 и 16 хорд соответственно. Магнитогидродинамическая активность моды $m/n = 2/1$ разряда контролировалась МГД-зондами (поз. 7) [107]. Ток разряда и напряжение на обходе плазменного шнура контролировались стандартными электротехническими методами. В ходе ряда экспериментов использовалась видеокамера со сменным светофильтром (поз. 8) [57], с помощью которой в режиме реального времени получали данные о двумерном распределении излучения из плазмы в видимом диапазоне в сечении «А». В дополнении к ней, излучение в видимом спектре на линиях дейтерия, углерода и лития регистрировалось с помощью целого ряда датчиков, расположенных на различных окнах установки. Кроме того, на рисунке отмечено расположение углеродного лимитера в вакуумной камере токамака (поз.9), а также элементы гиротронного комплекса Т-10 (поз.10) [108].

2.1.2 Оценки параметров инжекции лития для токамака Т-10

Для планирования экспериментов по инжекции литиевых макрочастиц и струй в плазму токамака Т-10 использовались результаты, описанные в первой главе данной работы. Таблица 2.1. суммирует их важнейшие параметры.

Таблица 2.1. Внесение лития в разряд, рассчитанное для различных установок. R и a – большой и малый радиус плазмы соответственно, N_{nl} – содержание частиц в плазме в рассматриваемых экспериментах, N_{Li} – количество внесенных в разряд атомов лития, F_{Li} – вносимый поток лития.

Установка, метод внесения	R / a , см	N_{nl}	N_{Li}	F_{Li} , ат/с	Результаты
TFTR, инжекция макрочастиц [3], [90], [91]	250 / 80	$(3 \div 5) \times 10^{20}$	$(3 \div 12) \times 10^{20}$	10^{23}	Снижение рециклинга, снижение содержания С, улучшенное удержание энергии
NSTX, инжекция макрочастиц [52]	85 / 65	$(4 \div 6) \times 10^{19}$	$(2 \div 4) \times 10^{20}$	10^{23}	Небольшое снижение рециклинга и содержания примеси
RFX-mod, инжекция макрочастиц однократная [94]	200 / 46	2.5×10^{20}	3.5×10^{20}	10^{23}	Снижение рециклинга, снижение содержания С и О, улучшенное удержание энергии
RFX-mod, инжекция макрочастиц с частотой 250 Гц [62]	200 / 46	2.5×10^{20}	2×10^{21}	5×10^{21}	Снижение рециклинга, снижение содержания С и О
TFTR, лазерное распыление [21]	250 / 80	$(3 \div 5) \times 10^{20}$	$(1 \div 10) \times 10^{21}$	2×10^{21}	Снижение рециклинга, снижение содержания С, улучшенное удержание энергии
NSTX, инжекция Li пылевой струи [26], [58]	85 / 65	4×10^{20}	До 2.5×10^{22}	$(0.1 \div 20) \times 10^{21}$	Снижение рециклинга, снижение содержания С, подавление ELM
DIII-D, инжекция Li пылевой струи [5]	170 / 60	1×10^{21}	$(0.8-8) \times 10^{21}$	$(0.8 \div 8) \times 10^{21}$	Снижение содержания С, подавление ELM
EAST, инжекция Li пылевой струи [6], [43]	190 / 50	2×10^{20}	До 8×10^{22}	$(3 \div 5) \times 10^{21}$	Снижение рециклинга, снижение содержания Мо, подавление ELM

Исходя из данной таблицы, можно было предварительно оценить параметры инъекции лития в плазму токамака Т-10, обладающего большим радиусом $R = 150$ см и малым радиусом плазмы $a = 30$ см при содержании частиц в омическом разряде до 8×10^{19} . В случае инъекции макрочастиц можно было бы ориентироваться на установку

NSTX, параметры плазмы которой в этих экспериментах были сравнимы с T-10. Однако количество вносимого лития в этом случае определялось не только параметрами токамака, но и используемой системой примесной инжекции, основные характеристики которой будут представлены в следующем параграфе. Таким образом, предполагалось использовать макрочастицы диаметром 0.75 мм и длиной до 1.2 мм, что давало количество вносимых атомов лития до $2.5 \cdot 10^{19}$, при длительности испарения в 0.5 мс создавался поток до 5×10^{22} ат/с.

В случае инжекции литиевой пылевой струи плазма NSTX оказалась устойчива к потокам лития до 20×10^{21} ат/с, но содержание частиц в ней при этом было в 5 раз больше характерных для T-10 значений. На токамаке EAST при содержании частиц в 2.5 раз больше использовались потоки лития до 5×10^{21} ат/с. В связи с этим было желательно, чтобы разрабатываемое устройство для инжекции литиевой пыли в условиях T-10 могло выдавать выходные потоки в пределах $(0.1 \div 10) \times 10^{20}$ атомов лития в секунду. Для анализа влияния инжекции на параметры плазмы она должна осуществляться на квазистационарной стадии разряда, что ограничивает длительность до 500 мс.

2.1.3 Система примесной инжекции токамака T-10 и система регистрации испарения макрочастиц.

Диагностический инжектор макрочастиц ДИМ-6 (поз. 1 на Рис. 2.1.) располагался в сечении «В» установки. Инжекция производилась в общем направлении сверху вниз к центру плазменного шнура. Углеродные или литиевые макрочастицы с характерными размерами 0.2-0.7 мм влетали в плазму со скоростями 100-600 м/с.

На расположенном в области экваториальной плоскости токамака с небольшим смещением вверх оптическом окне были закреплены компоненты системы регистрации испарения макрочастиц, которая включала в себя широкообзорный фотодетектор для регистрации зависимости излучения из плазмы на линиях инжектированного вещества от времени, линейку узкоколлимированных фотодетекторов для привязки сигнала широкообзорного фотодетектора к пространству, и видеокамера. Была предусмотрена возможность установки сменных узкополосных светофильтров перед широкообзорным фотодетектором и видеокамерой.

2.1.3.1 Система примесной инжекции токамака T-10.

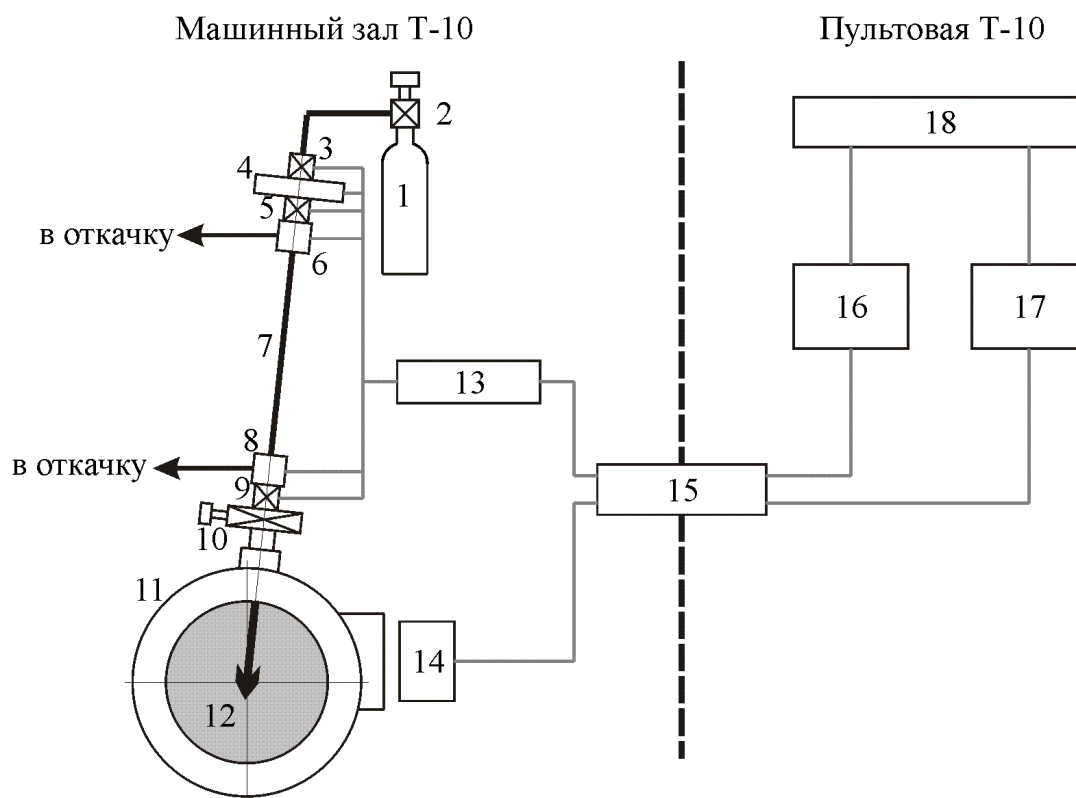


Рис. 2.2. Система примесной инжекции на токамаке T-10. 1 – баллон с гелием, 2 – газовый редуктор, 3 – газовый клапан, 4 – зарядное устройство, 5 – электромагнитный шиберный затвор, 6 – камера диагностики и откачки, 7 – направляющая трубка, 8 – камера диагностики и откачки, 9 – электромагнитный шиберный затвор, 10 – ручной затвор, 11 – вакуумная камера T-10, 12 – плазма, 13 – блок управления ДИМ-6, 14 – система регистрации испарения макрочастиц, 15 – кабельная магистраль, 16 – блок управления инжекцией, 17 – система сбора данных, 18 – пульт ведущего экспериментатора T-10.

Система примесной инжекции на токамаке T-10 была создана на основе газодинамического инжектора макрочастиц ДИМ-6. Основные параметры такой системы описываются в работе [23], поэтому в данном разделе будут пояснены лишь в краткой форме. Инжектор размещен в сечении «В» токамака на патрубке, расположенном под углом 6° к вертикали и направленном к центру плазмы.

Устройство системы представлено на Рис. 2.2. Жирными черными линиями на рисунке обозначены газовые и вакуумные магистрали, серыми – кабельные линии. Ускорение макрочастиц происходило под действием расширения ускоряющего газа

гелия. Гелий напускается из баллона 1, оборудованного редуктором 2, в газовую магистраль, на выходе которой расположен быстродействующий газовый клапан 3. Макрочастицы в количестве до 90 штук заранее помещаются в зарядное устройство 4 барабанного типа. При выстреле после открытия газового клапана и электромагнитного шиберного затвора 5 макрочастица ускоряется в стволе инжектора. Ее выход из ствола регистрируется оптическим барьером внутри камеры диагностики и откачки 6. Через направляющую трубку 7, играющую также роль вакуумного сопротивления, и вторую камеру диагностики и откачки 8, макрочастица подходит к выходному электромагнитному шиберному затвору 9, предназначенному для отсечки ускоряющего газа. По временной задержке между сигналами оптронов в камерах 6 и 8 можно рассчитать скорость макрочастицы. С помощью ручного вакуумного затвора 10 ДИМ-6 отсекается от вакуумной камеры Т-10 (поз. 11). Макрочастица влетает в плазму (поз. 12), где испаряется. Работа инжектора контролируется с помощью блока управления ДИМ-6 (поз. 13) с которого подается также питание на систему регистрации испарения макрочастиц 14, которая будет более подробно рассмотрена в следующем параграфе. Через кабельную магистраль 15 ДИМ-6 связан с расположенными в пультовой Т-10 блоком управления инъекцией 16 и системой сбора данных 17 на основе компьютера с АЦП с частотой оцифровки до 2.5 МГц. Синхронизация с работой токамака осуществляется по сигналам с пульта ведущего экспериментатора Т-10 (поз. 18).

Для понимания особенностей работы инжектора имеет смысл более подробно рассмотреть работу блока зарядки и инъекции, в который входят быстродействующий газовый клапан, зарядное устройство, электромагнитный шиберный затвор и узел ствола инжектора. Его чертеж приведен на Рис. 2.3. Зарядное устройство фиксируется винтами на установочном диске 1. Диск подачи образцов 2, в отверстия-позиции которого закладываются макрочастицы, вращается внутри состоящего из нижнего и верхнего дисков 3 и 4 корпуса зарядного устройства. Вращение на диск передается с шагового двигателя (на чертеже не показан) через ось 5 с системой подшипников. Шаговый двигатель по заранее написанной программе совмещает позицию в диске подачи образцов 2 с макрочастицей с входом в узел ствола 6. Во время выстрела нож 7 шиберного затвора открывается под действием электромагнита 8, под действием потока ускоряющего газа из газового клапана 9 макрочастица входит в ствол и ускоряется в нем на базе в 115 мм, после чего летит далее по инерции.

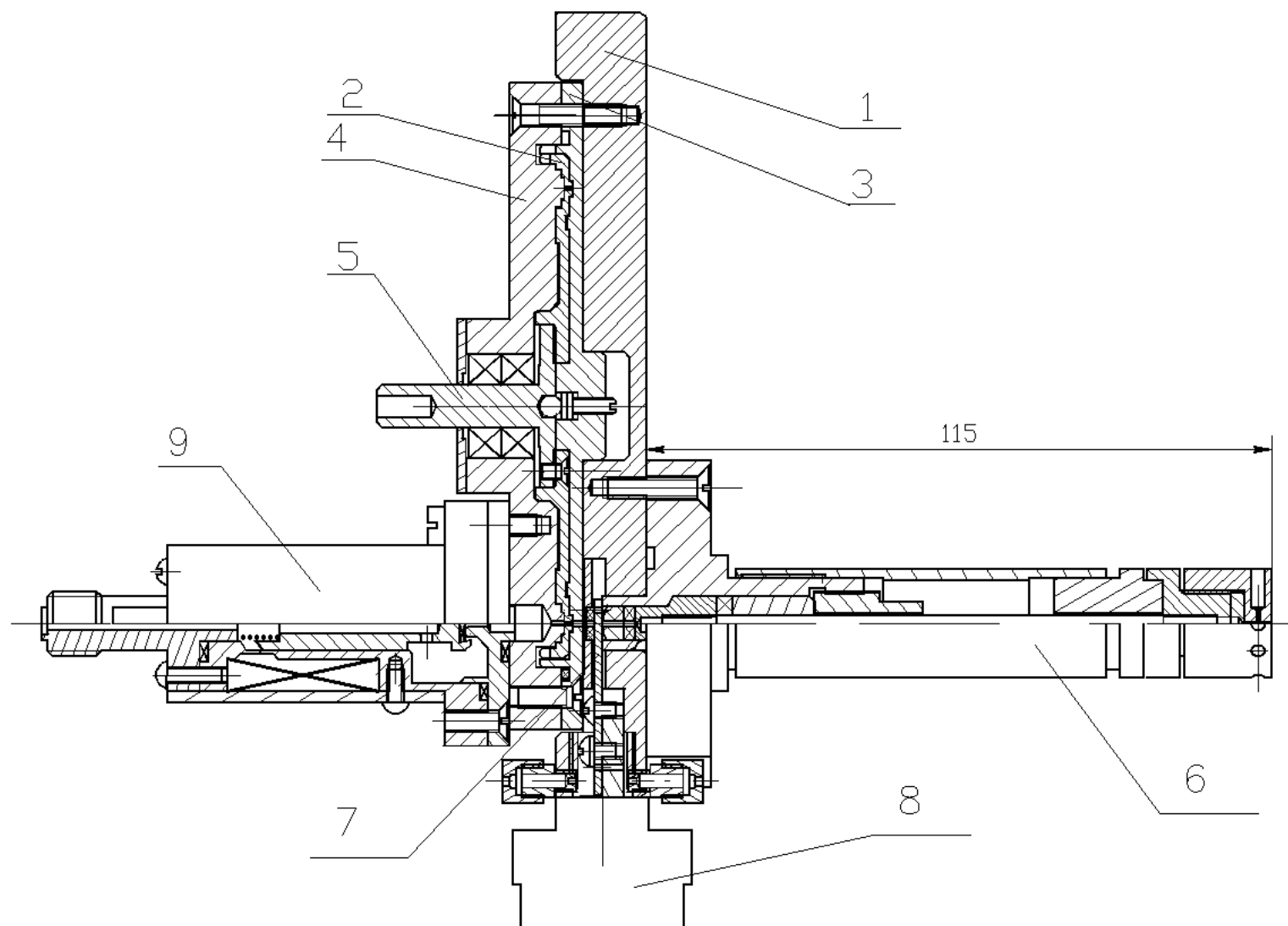


Рис. 2.3. Блок зарядки и инъекции ДИМ-6. 1 – установочный диск, 2- диск подачи образцов, 3, 4 – нижний и верхний диск корпуса зарядного устройства, 5 – ось, 6 – узел ствола, 7 – нож затвора, 8 – электромагниты затвора, 9 – газовый клапан.

2.1.3.2 Система регистрации испарения макрочастиц для T-10.

Система регистрации испарения макрочастиц на токамаке T-10 установлена в сечении «В» установки на расположенном в области экваториальной плоскости токамака с небольшим смещением вверх оптическом окне. Ее блок-схема и характерные данные с диагностик представлены на Рис. 2.4. Конструктивно она состоит из трех устройств: широкообзорного фотодетектора (ШОД), линейки узкоколлимированных фотодетекторов (ЛУКД) и видеокамеры (CCD). Перед ШОД и CCD устанавливались узкополосные (ширина пропускания в пределах от 2.3 до 2.9 нм для разных фильтров из набора) светофильтры на одну из наиболее сильных линий инжектированного вещества (например, CII 723 нм для углерода). Широкообзорный фотодетектор регистрировал излучение из плазмы на протяжении всего испарения. Предполагая пропорциональность излучения скорости испарения макрочастицы [109], таким образом получали зависимость скорости испарения от времени. Высокочастотная оцифровка получаемого с ШОД сигнала позволяла записать тонкую структуру кривой с высокой точностью, что было важно для экспериментов, описываемых в разделе 3.1. данной диссертации. С другой стороны, видеокамера, синхронизированная с инжектором и оборудованная светофильтром, аналогичным установленному перед ШОД, регистрировала интегральную интенсивность излучения за все время испарения. Полученный кадр привязывался к пространству по результатам калибровочной съемки, проведенной заранее. Привязать сигнал ШОД к пространству можно было с помощью расположенной вертикально линейки узкоколлимированных фотодетекторов. На каждый из них излучение попадало только из заранее определенной горизонтальной плоскости сечения плазмы толщиной около 1 см через щелеобразный коллиматор. При засвечивании каждого из диодов линейки вырабатывался прямоугольный импульс уникальной для канала амплитуды. Таким образом, сигнал ШОД можно было привязать к пространству. Точность привязки определяется указанной выше шириной коллимации и составляет около 1 см.

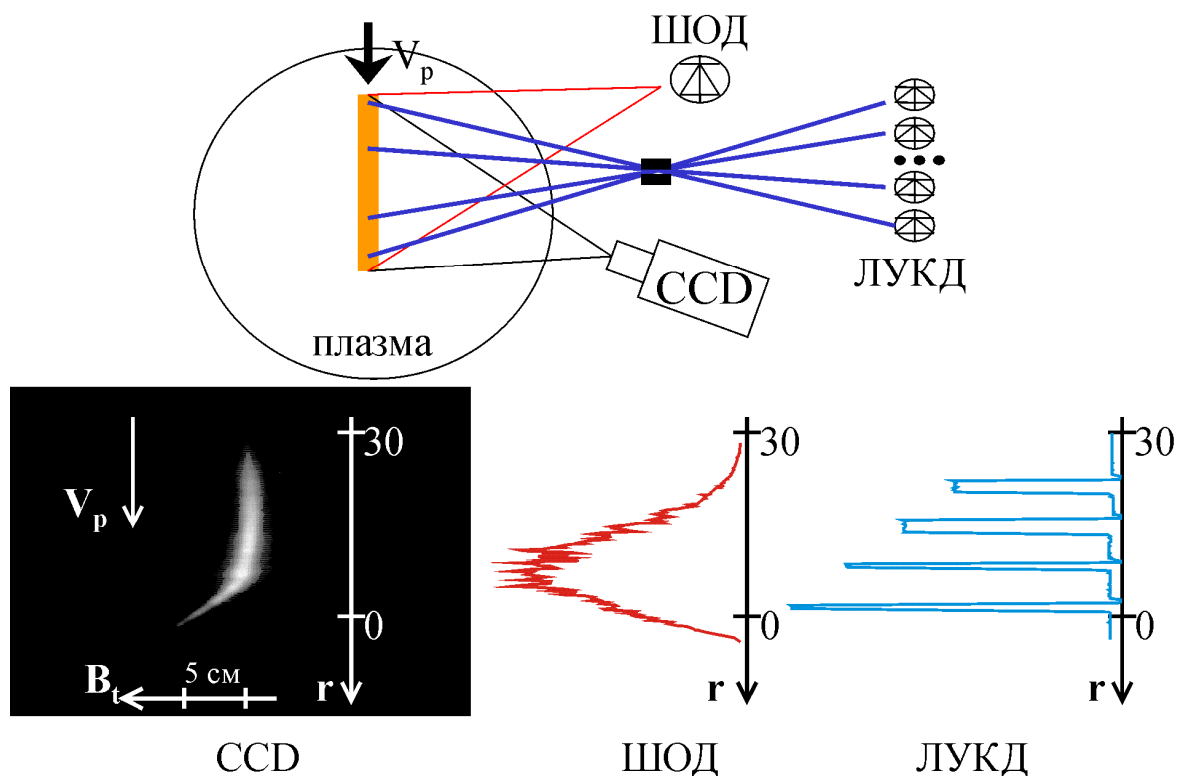


Рис. 2.4. Система регистрации испарения макрочастиц на токамаке T-10. ШОД – широкообзорный фотодетектор, ЛУКД – линейка узкоколлимированных фотодетекторов, CCD – видеокамера.

2.1.3.3 Макрочастицы для системы примесной инжекции T-10.

В качестве материалов, инжектируемых в плазму токамака T-10 с помощью ДИМ-6, в описываемых экспериментах использовались углерод и литий. Углеродные макрочастицы представляли собой шарики диаметром 0.2-0.7 мм, изготовленные промышленно [25]. Перед экспериментом шарики сортировались на фракции с помощью сита, измерялись и закладывались в зарядное устройство инжектора. Никаких особенных требований к их хранению не предъявлялось, так как углерод является стойким к взаимодействию с атмосферными газами и материалами инжектора веществом.

Литий, в свою очередь, обладает значительной химической активностью, в том числе и к атмосфере. В связи с этим металлический литий поставляется в герметично закрываемых емкостях, покрытый парафиновым маслом или другими подобными веществами. Для подготовки его к использованию в эксперименте была разработана

специальная технология, позволяющая минимизировать коррозирующее воздействие на изготавливаемые макрочастицы.

Как известно (см., например, [110]), чистый литий в условиях влажности ниже 80% при взаимодействии с воздухом преобразуется в основном в Li_3N , при более высокой влажности – в смесь Li_2CO_3 и LiOH . Примеси в литии, повышение температуры и влажности приводят к ускорению взаимодействия. Авторы [110] утверждают, что дистиллированный литий в нормальных условиях практически не взаимодействует с воздухом, длительное время сохраняя металлический блеск. Так как в описываемых ниже работах использовался менее чистый литий марки ЛЭ-2 (содержание $\text{Li} > 99\%$), в нормальных условиях его поверхность на срезе в течение примерно 10 минут покрывалась Li_3N , а через несколько часов – LiOH . В связи с этим было принято решение проводить работы по изготовлению литиевых макрочастиц в перчаточном боксе в осушенной атмосфере, где влажность понижалась до 30-40% с использованием адсорбента.

В начале работы необходимое количество лития извлекалось из заводской тары и обрезалось с помощью скальпеля, чтобы очистить от масла и поверхностных пленок литиевых соединений. Дальнейшие работы производились при регулярном смачивании открытых поверхностей металла керосином.

Так как позиции для макрочастиц в диске подачи образцов зарядного устройства ДИМ-6 (см. Рис. 2.3.) были выполнены в форме цилиндрических отверстий диаметром 0.8 мм и длиной 1.8 мм, то было принято решение изготавливать макрочастицы в виде цилиндров диаметром 0.75 мм. Разброс используемых длин цилиндров составил от 0.2 до 1.2 мм ($0.4 - 2.5 \times 10^{19}$ атомов). Нижняя граница определялась прочностными характеристиками лития (во избежание разрыва тонкой литиевой пластины при ускорении), верхняя – устойчивостью разряда токамака Т-10 к срывам при резком росте плотности после инжекции. Макрочастицы вырезались из литиевого листа с помощью тонкостенной трубочки из нержавеющей стали, для чего использовалась игла для шприца, обрезанная и со снятой фаской. Литиевый лист получался расплющиванием небольших литиевых заготовок сначала молоточком, затем заготовка дожималась до требуемой толщины прессом из нержавеющей стали. После этого из пластины с помощью иглы, надетой на предварительно заполненный керосином шприц, поочередно вырезались цилиндры требуемого размера, и выдавливались нажатием на поршень шприца в пробирку. Основные инструменты, используемые при изготовлении литиевых макрочастиц, показаны на Рис. 2.5.

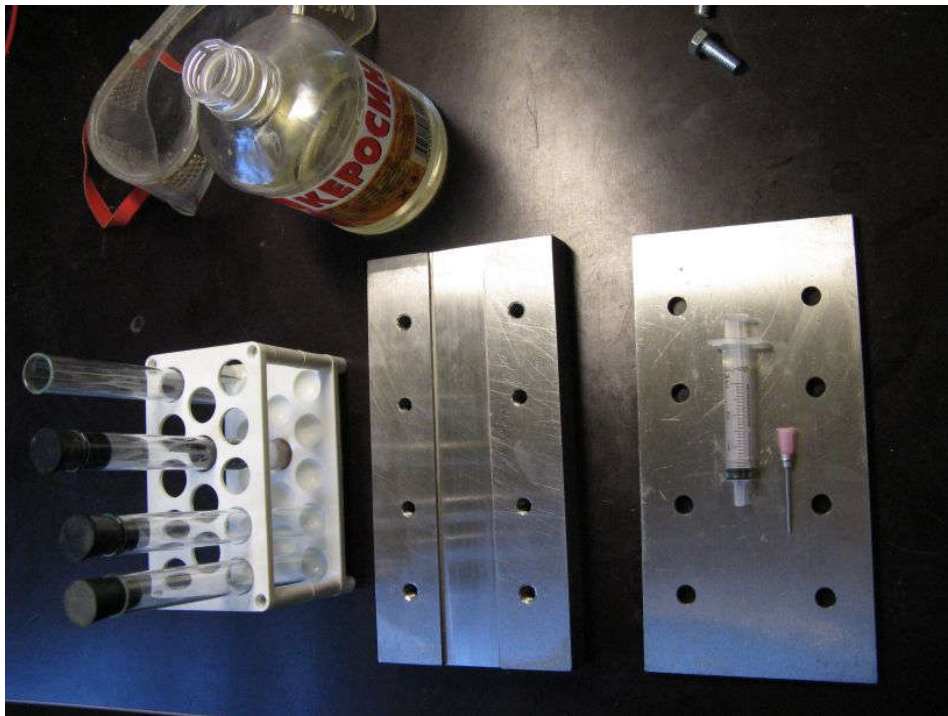


Рис. 2.5. Инструментарий для изготовления литевых металлических макрочастиц: пресс для лития, полая игла для вырезания цилиндров, шприц для выдавливания полученных образцов из иглы, комплект пробирок.

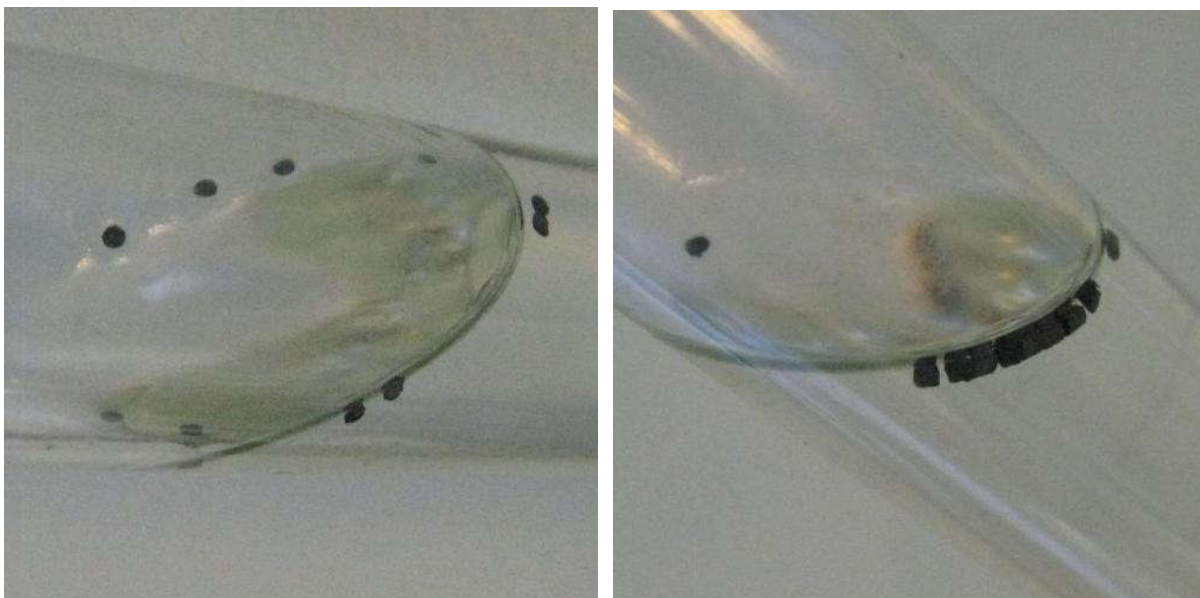


Рис. 2.6. Цилиндрические металлические литевые макрочастицы в керосине; слева – высотой 0.35 мм ($7 \cdot 10^{18}$ атомов лития), справа – высотой 0.75 мм ($1.5 \cdot 10^{19}$ атомов).

Затем на протяжении примерно 10 минут макрочастицы выдерживались в осушенной атмосфере. Осушение воздуха связывает молекулы H_2O . Молекулы азота сохраняются и при комнатной температуре медленно взаимодействуют с поверхностью лития, образуя на них пленку нитрида Li_3N толщиной в несколько микрон [111]. Процесс контролируется визуально, при этом поверхность макрочастиц теряет металлический блеск и чернеет. Такое покрытие в значительной степени способствует пассивации лития по отношению к парам воды в условиях комнатной температуры. Покрытые макрочастицы складываются в пробирку, заполненную керосином, и она герметизируется. В таком виде готовые образцы могут храниться несколько дней. На Рис. 2.6 представлены снимки цилиндрических макрочастиц диаметром 0.75 мм, слева – высотой 0.35 мм, справа – высотой 0.75 мм. Перед зарядкой макрочастицы осушаются с помощью фильтровальной бумаги.

Зарядное устройство инжектора примесных макрочастиц (Рис. 2.3.) содержит внутри себя полости, предназначенные для закладывания в него макрочастиц, в нем также имеются зазоры между вращающимся диском подачи образцов и неподвижным корпусом устройства. Зарядное устройство само по себе не откачивается. Таким образом, внутри него оказывается запертым некоторое количество атмосферного воздуха, с которым может реагировать металлический литий. Стендовые эксперименты показали, что по прошествии 8 часов 50% заложенных в устройство макрочастиц не выходят из него под давлением ускоряющего газа 20 атм. При вскрытии устройства было обнаружено, что эти частицы покрылись слоем белого гидроксида лития, из-за чего увеличились в объеме и плотно примкнули к стенкам отверстия диска подачи образцов. Отсюда было выработано требование к зарядке ДИМ-6 перед экспериментом: литиевые макрочастицы закладываются непосредственно перед проведением инъекций, в начале рабочего дня и в обеденный перерыв, в результате чего время их нахождения в зарядном устройстве не превышает 4 часов. Такой режим работы не позволяет литию успеть в заметной степени прокорродировать под воздействием остаточных атмосферных газов, тем самым снижая вероятность невыхода макрочастицы из инжектора, а также уменьшая внесение нежелательных примесей в установку в виде соединений LiOH и Li_2CO_3 .

Необходимо отметить, что близкие по смыслу технологии изготовления, хранения и зарядки литиевых макрочастиц использовались в ходе экспериментов на установке RFX-mod [94]. Отличие состояло в том, что после зарядки лития на атмосфере в инжекторе на RFX-mod зарядное устройство помещается вовнутрь

герметизированного объема, за счет этого не требуется производить пассивацию поверхности макрочастиц, что обеспечивает еще большее снижение поступления с макрочастицей примесей в плазму установки.

Таким образом, в ходе подготовки экспериментов по инжекции металлического лития в плазму токамака Т-10 была отработана технология изготовления и использования литиевых макрочастиц в инжекторе ДИМ-6.

2.1.4 Шприцевой инжектор литиевой струи на Т-10

Первые попытки инжекции литиевой струи были произведены на токамаке Т-10 в конце 2007 года. Для этого использовался инжектор литиевой струи, построенный на принципе шприца [112], на Рис. 2.7. представлена его упрощенная схема. Внутри вакуумно-прочного корпуса 4 из нержавеющей стали размещалось до 300 мм³ лития 6, который расплавлялся с помощью катушечного нагревателя 5, температура при этом контролировалась термопарой 8. После достижения рабочего диапазона температур с помощью шагового двигателя 1 через систему передачи движения в вакуум 2 поршень 3 шприца начинал давить на литий, и из сопла 7 вылетала струя расплавленного металла 9, который двигался в сторону плазмы, распадаясь на капли и частично кристаллизуясь. Параметры струи определялись как скоростью движения поршня, так и диаметром сменного сопла от 50 до 250 мкм. Предполагалось, что капли будут проникать при скоростях 20 м/с на глубину до 5 см в плазменный шнур, испаряться и высаживать вещество на углеродный лимитер установки. За счет этого рассчитывали достигнуть снижения рециклинга рабочего газа.

Однако проведенные на токамаке Т-10 эксперименты [45] к выраженному положительному результату не привели. Разряды заканчивались срывами с характерной задержкой после начала инжекции около 30 мс. Это свидетельствовало о том, что потоки лития порядка 100 мг/с ($8.5 \cdot 10^{21}$ ат/с), что дает количество за время инжекции $2.5 \cdot 10^{20}$ атомов, оказываются неприемлемыми для параметров данной установки. Сильное воздействие при срыве на обращенные к плазме поверхности первой стенки нивелировали литиизацию, не позволяя веществу накопиться на них.

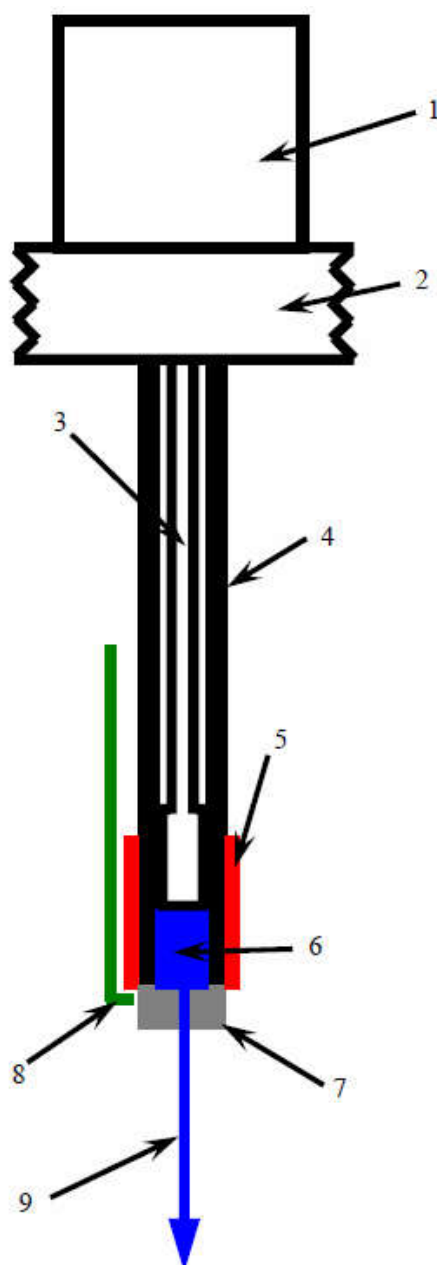


Рис. 2.7. Схема инжектора струи расплавленного лития. 1 – шаговый двигатель, 2 – система передачи движения в вакуум, 3 – поршень, 4 – корпус, 5 – нагреватель, 6 – литиевая камера, 7 – сменное сопло, 8 – термопара, 9 – литиевая струя.

Дальнейшие эксперименты натолкнулись на неразрешимые технические трудности. При попытке уменьшить поток лития струя 9 за счет поверхностного натяжения переставала отрываться от сопла 7 и формировала на нем каплю, которая затем падала под действием силы тяжести. Кроме того, не был найден материал, способный уплотнить зазор между поршнем 3 и внутренней поверхностью ствола корпуса 4 (см. Рис. 2.7.), так что существовали потери лития вверх в обход поршня, что

приводило к его заклиниванию. С уменьшением размера сопла при постоянной площади зазора эти потери росли.

Таким образом, по комплексу проблем данная конструкция оказалась несовместима с установкой Т-10, и программа была свернута, взамен нее была предложена следующая система.

2.1.5 Система инъекции металлической литиевой пыли для токамака Т-10.

Систему инъекции металлической литиевой пыли, применявшуюся на токамаке Т-10, можно условно разделить на два подблока: источник пылевой струи, формирующей саму струю и определяющий ее поток, и подсистему доставки пыли в токамак, которая не только перенаправляет струю в патрубок установки, но и в значительной степени влияет на ее параметры.

Причин, по которым источник пылевой струи не может быть расположен непосредственно на входном порте токамака Т-10, несколько. Во-первых, габариты самого источника не позволяют разместить его непосредственно над входным шиберным затвором токамака, не перекрыв доступ к соседним шиберам и окнам. Большая масса инжектора (12 кг) также требовала разработки поддерживающих его кронштейнов, которые также мешали бы доступу к соседним диагностикам. Во-вторых, требовалось обеспечить горизонтальное расположение источника литиевой струи на используемом для инъекции патрубке вакуумной камеры Т-10, который наклонен на угол 6° от вертикали. В связи с этим была разработана система перенаправления струи, падающей под действием силы тяжести, в порт токамака. Также необходимо было реализовать возможность быстрой отсечки струи.

2.1.5.1 Литиевый порошок *SMLPTM*.

В качестве инжектируемого литий-содержащего вещества был выбран промышленно изготавливаемый американской компанией FMC Lithium порошок *SMLPTM* [113], отличающийся наличием пассивирующего покрытия Li_2CO_3 на поверхности каждой частички. Средний диаметр частичек составляет около 40 мкм, при этом содержание металлического лития в ее внутренней части составляет не менее

97%. Таким образом, толщина оболочки составляет около 0.2 мкм. Средняя масса одной частицы составляет около $2 \cdot 10^{-8}$ грамм при плотности лития при комнатной температуре 0.534 г/см^3 .

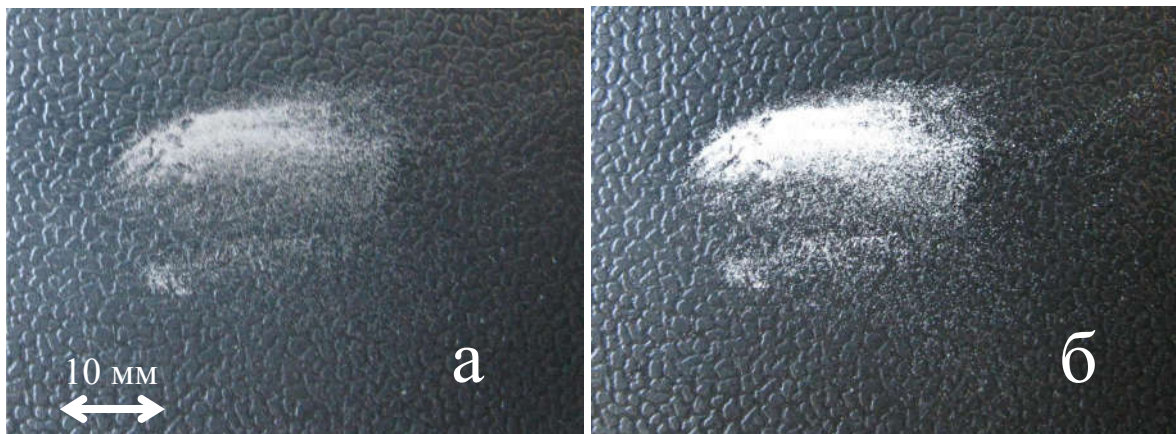


Рис. 2.8. Фотографии литиевого металлического порошка SMLP™ с пассивированной поверхностью, а – при вскрытии емкости, б – через 3 часа в условиях влажности 60%.

В работе [114] данный литиевый порошок позиционируется как устойчивый при работе в сухой атмосфере. Это позволяет производить зарядку инжектора без использования перчаточной камеры с аргоновой атмосферой либо других изолирующих от воздействия воздуха сред. Однако можно ли подвергать литиевый порошок воздействию атмосферы при стандартных условиях для рабочих помещений? Для этого был проведен эксперимент по выдерживанию его в лаборатории при влажности около 60%.

Изначально порошок представляет собой светло-серое вещество, под микроскопом его частицы выглядят как шарики правильной формы, обладающие немного замутненным металлическим блеском (см. Рис. 2.8а и Рис. 2.9а). По прошествии часа порошок начал заметно белеть, при рассмотрении под микроскопом обнаружилось, что большинство частиц металлический блеск потеряли, что свидетельствовало об их корродировании. Еще через два часа порошок побелел полностью (Рис. 2.8б), на пробе вещества под микроскопом было отмечено увеличение размера частичек из-за того, что их поверхность покрывалась рыхлым слоем гидроксида лития, а также появление отдельных лопнувших шариков (обозначены на Рис. 2.9б). Это происходило из-за того, что процесс коррозии лития под воздействием атмосферной влаги продвинулся в глубину пылевых частиц, и расширяющаяся масса

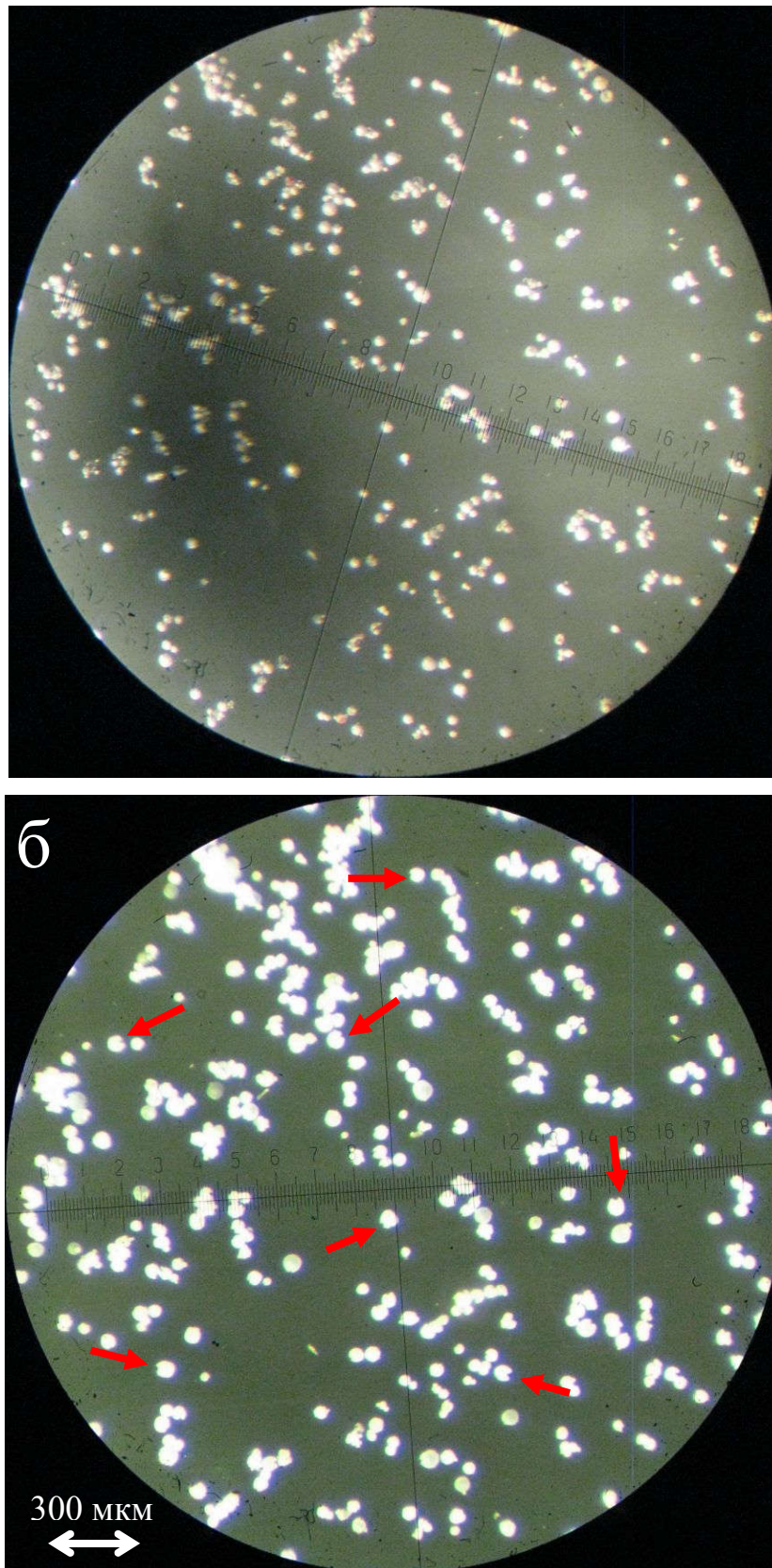
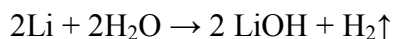


Рис. 2.9. Фотографии SMLPTM под микроскопом, а – при вскрытии емкости, б – через 3 часа при влажности 60% (стрелками отмечены частички, лопнувшие от коррозии). Одно малое деление шкалы окуляра соответствует 14 мкм.

соединений лития рвала оболочку карбоната лития. Еще два часа спустя доля лопнувших частиц достигла примерно половины, в результате чего был сделан вывод о том, что по прошествии этого времени SMLPTM перешел в непригодное для проведения экспериментов состояние. С учетом того, что для зарядки инжектора достаточно около 10 минут, после чего объем герметизируется и откачивается, можно сделать вывод о том, что в ходе подготовки к эксперименту заметного загрязнения лития продуктами его коррозии за счет взаимодействия с атмосферными газами не происходит.

Необходимо отметить важную особенность, на которую следует обратить повышенное внимание при работе с SMLPTM. Это опасные свойства лития, которые могут привести к травмированию экспериментатора. Во-первых, несмотря на наличие пассивирующей оболочки, литий внутри частиц порошка сохраняет свою высокую химическую активность, что еще более усугубляется развитой поверхностью пылеобразной среды. В связи с этим в ходе проведения описываемых в данной работе экспериментов непрерывно отслеживалось недопущение попадания воды на оборудование, находящееся в контакте с литиевой пылью. Даже попадание незначительного количества влаги приводит к бурной реакции:



с выделением щелочи и водорода. В одном случае при разборке инжектора для очистки из-за попадания капли пота произошла кратковременная вспышка литиевой пыли. В связи с этим работы были перенесены в условия зала с негорючей обстановкой. После разборки инжектора покрытые порошком элементы на сутки оставлялись в безопасном помещении на воздухе для уменьшения содержания в них лития за счет взаимодействия с атмосферной влагой. После этого они промывались в спиртовом растворе в пропорции 1:1, что позволило обезопасить выполнение работ. Кроме того, для защиты глаз, органов дыхания и кожи от вредного воздействия летучей пыли лития и его продуктов использовались очки, одноразовые маски и медицинские перчатки.

2.1.5.2 Источник пылевой струи.

Схема устройства источника пылевой струи приведена на Рис. 2.10. Принцип его работы заключается в переходе от трения покоя между частичками пыли, наполняющими барабанный бункер инжектора 6, к трению скольжения при включении двигателя. Вращение в вакуумную камеру 4 передается посредством ввода вращения в

вакуум с помощью муфты 14, соединенной с дном бункера 7. Двигатель юстируется и поддерживается фиксаторами 8, 9, 10. Носик бункера 6а, в свою очередь, юстируется поддержками 12 с подпружиненными фторопластовыми вставками 13. Вакуумная камера устанавливается на подвижную пластину 1, закрывается крышкой 5 и зажимается двенадцатью стойками. Подвижная пластина может наклоняться относительно неподвижной пластины 3 за счет перемещения юстировочных гаек 15 по резьбе болтов фиксации наклона. Вакуумную плотность подвижной компоновки обеспечивает сильфон с фланцами 2. Юстировочное окно камеры перекрывается малой крышкой 11. Для удовлетворения условиям «магнитной гигиены» установки все массивные детали выполнены из немагнитных материалов. Для предотвращения воздействия рассеянных магнитных полей вблизи установки на двигатель и ввод вращения они защищены экранами (экраны на чертеже не показаны). Масса устройства составляет около 12 кг. Габаритные размеры источника - 480×250×200 мм.

Для того, чтобы осуществлять регулируемое воздействие на разряды с различными параметрами плазмы, необходимо в достаточно широком диапазоне менять поток (скорость подачи) пыли на выходе из бункера. Для этого было предусмотрено две возможности для регулировки. Во-первых, плавная регулировка, которая достигается методом изменения скорости вращения барабанного бункера с литиевой пылью. Так как в качестве электродвигателя применялся шаговый мотор с угловым шагом 1.8° , то изменение скорости вращения барабана производилось методом регулирования частоты шагов двигателя, 200 шагов соответствовали одному полному обороту.

Чем с большей скоростью вращался бункер, тем больше становился поток пыли через трубку. Увеличение частоты вращения в полтора раза приводило примерно к такому же росту скорости подачи порошка системой. Так как при конструировании предполагалось, что источник можно будет, в принципе, использовать и для выключения разряда, то была предусмотрена возможность и более грубой регулировки потока методом наклона подвижной пластины 1 относительно неподвижной пластины 3 на Рис. 2.10. При положительном наклоне (когда носик бункера 6а наклонен вниз относительно горизонта), поток возрастает, при отрицательном – уменьшается вплоть до полного прекращения. Соответственно на время простоя заряженного источника пылевой струи во избежание несанкционированного высыпания порошка его подвижной пластине придавался отрицательный угол около 5° .

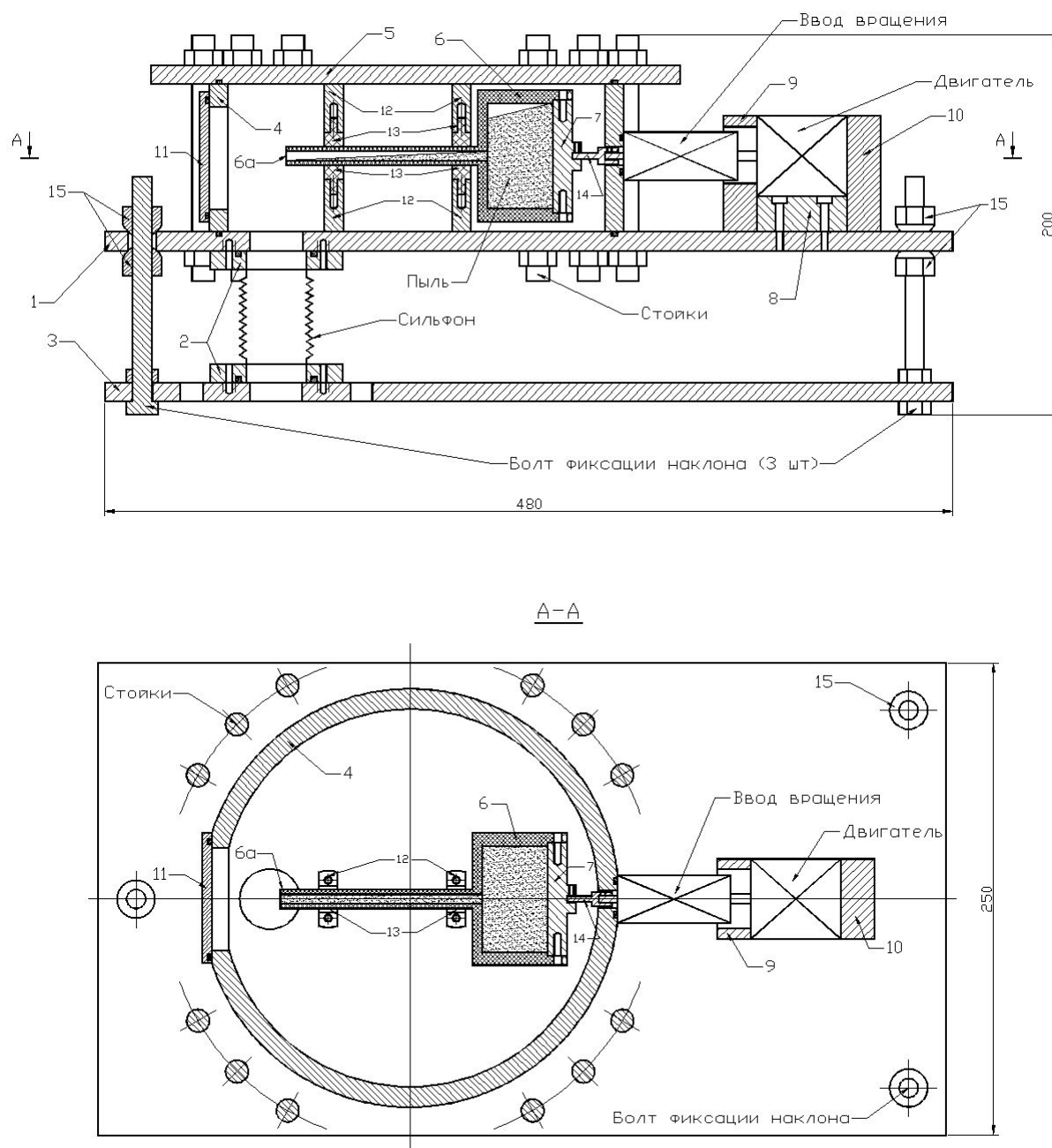


Рис. 2.10. Устройство источника пылевой струи, вид сбоку (а) и сверху (б). Используемые обозначения расшифровываются в тексте.

Разработанный источник может применяться для инъекции в установку не только литиевой пыли, но и любой другой порошкообразной субстанции, например, углерода для исследования поведения пыли в токамаке. Были проведены стендовые эксперименты с различными сыпучими веществами: углеродная пыль разной степени дисперсности, и литиевый порошок SMLPTM. Таблица 2.2. суммирует полученные результаты.

Таблица 2.2. Скорость подачи при инъекции различных порошков в зависимости от угла наклона и скорость вращения барабана. В скобках указан средний размер пылинок.

Параметры инъекции	Угол наклона, °	0	0	2	4,5	8	8
	Скорость вращения барабана, об./с	2	3	2	3	2	3
Скорость подачи, мм³/с	Углерод (100 мкм)	2	2	23	38	48	77
	Углерод (10 мкм)	5-8	7-11				46-51
	SMLP TM (40 мкм)	42	69				

Кроме того, в ходе стендовых экспериментов методом измерения потока порошка на выходе из источника в зависимости от длительности подачи пыли, а также с помощью видеосъемки оценены значения переходных характеристик при включении и выключении системы. Характерные переходные времена составляют не более 60 мс.

Главными недостатками данной системы являются невозможность регулировать скорость падающих частиц пыли, так как она определяется лишь гравитацией, и то, что из-за той же особенности размещать инжектор можно лишь непосредственно над плазменным шнуром.

2.1.5.3 Подсистема доставки пыли в токамак.

Для совмещения выхода источника пылевой струи с входным портом камеры токамака Т-10 была разработана подсистема доставки пыли в токамак, играющая роль многофункционального переходника между источником и токамаком. Ее конструкция приведена на Рис. 2.11. Она выполняет следующие задачи: подключение блока дифференциальной откачки системы инъекции, управление длительностью инъекции, блокировка системы инъекции, перенаправление и «обжатие» потока пыли, диагностика потока пыли, защита вакуумного затвора входного порта токамака.

Подсистема имеет габаритные размеры 170×200×530 мм (без электромагнитов быстродействующего шиберного затвора), массу около 8 кг, и состоит из следующих основных компонентов (Рис. 2.11.): 1 – узел откачки, 2 – узел отсечения потока, 3 – сильфонный узел, 4 – диагностический узел. У каждого из узлов имеется свое предназначение.

Узел откачки 1 с откачным патрубком под разъем KF25 1a предназначен для организации независимой откачки объемов инжектора и переходника.

Узел отсечения потока 2 снабжен быстродействующим шиберным затвором 2a, управляемым парой электромагнитов, навинчивающихся на трубки 2b. В правом (как на Рис. 2.11.) положении отверстие в средней части затвора совпадает с осью подсистемы, и литиевая пыль проходит сквозь него. В левом положении затвор закрыт, и литий собирается в расположенном в узле съемном сборном стаканчике 2c. Время срабатывания электромагнитов затвора составляет около 5 мс, что позволяет при необходимости регулировать длительность инъекции, «вырезая» импульсы из потока, покидающего источник пылевой струи. В тех разрядах, когда инъекция не требуется, затвор также держится закрытым.

Сильфонный узел 3 обеспечивает механическую развязку инжектора и камеры токамака для недопущения повреждения системы при откачке токамака и при срывах, так как во время этих процессов корпус вакуумной камеры T-10 может сдвигаться на величины до нескольких миллиметров. Гибкость сильфонов, кроме того, позволяет состыковать установленный горизонтально источник пылевой струи с расположенным под углом 6° к вертикали входным портом токамака.

Диагностический узел 4 снабжен двумя расположенными друг напротив друга патрубками с оптическими окнами 4a. На них устанавливалась диагностика потока пыли, реализованная в форме светового барьера: на одном патрубке – матрица излучающих в оптическом диапазоне светодиодов, на другом – линза и фотодиод с усилителем. Чем больше плотность потока пыли, тем сильнее снижение уровня засветки на фотоприемнике. Таким образом, можно оценить поток лития, проходящий через диагностический узел подсистемы доставки пыли в токамак.

Кроме того, для минимизации потерь пыли за счет расхождения потока внутри подсистемы располагается комплект коллимирующих воронок 2d, 4b, 4c. Установка воронок необходима, так как угол рассеяния литиевой пылевой струи на выходе из дозатора составляет $6-7^\circ$, и без них потери лития за счет оседания на стенках переходника были бы огромны. Первая из них, 2d, направляет порошок в отверстие быстродействующего шибера 2a в узле отсечения 2. Вторая, 4b, собирает пыль на ось нижней части переходника, после ее «перелома» в сильфонном узле 3, а также производит уплотнение потока между диагностическими патрубками узла 4 для улучшения соотношения сигнал-шум. Третья воронка, 4c, на выходе из диагностического узла 4, защищает внутренние элементы шиберного затвора порта

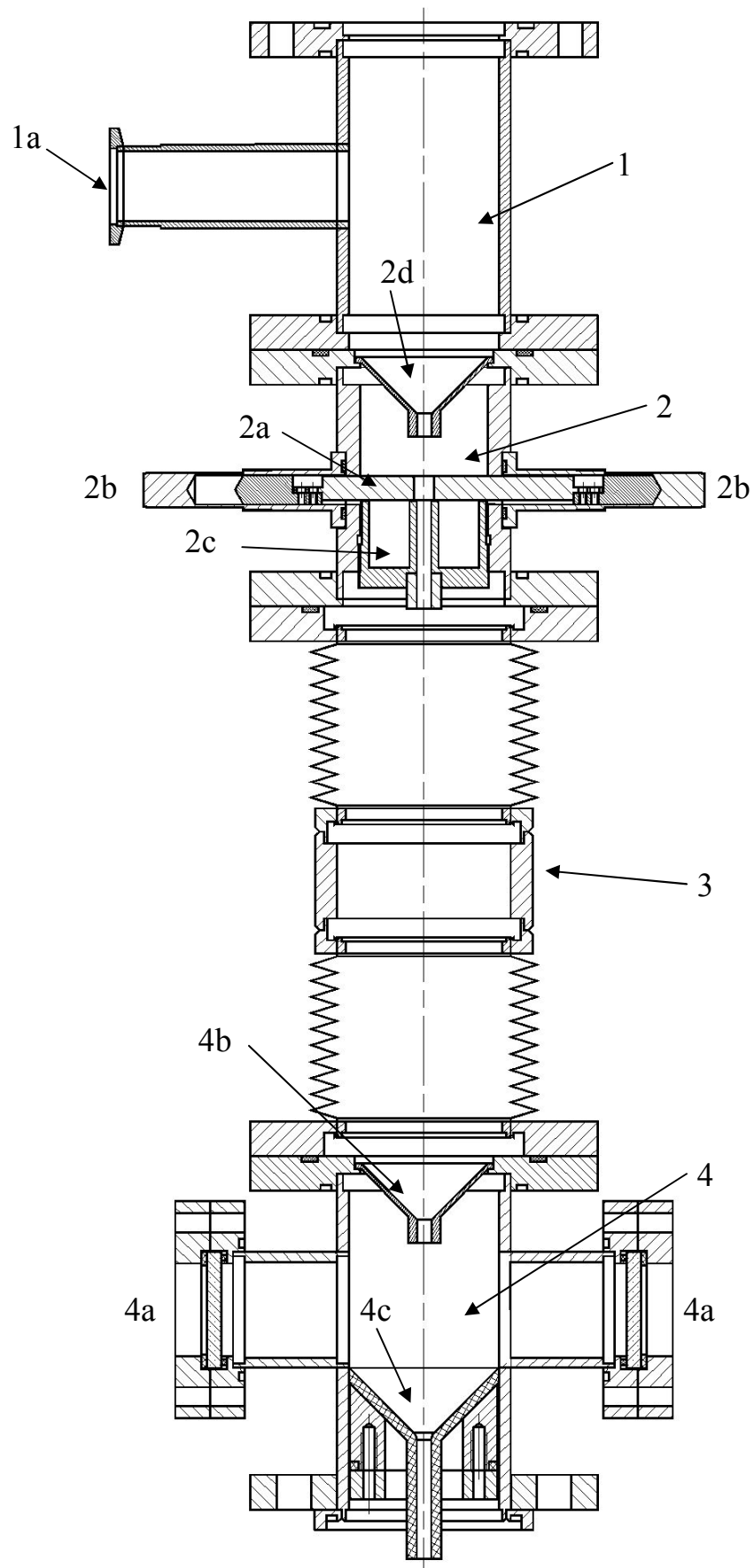


Рис. 2.11. Подсистема доставки пыли в токамак.

вакуумной камеры Т-10, расстояние от ее выходной трубки до ножа затвора составляло 5 мм. Поверхности выполненных из фторопласта воронок были заполированы для того, чтобы пылевые частицы не скапливались на микронеровностях и не формировали лавины.

Ожидалось, что в процессе падения значительная доля порошка за счет большого угла рассеяния литейной пылевой струи может тормозиться на поверхности каждой из воронок, сбрасывая свою вертикальную скорость практически до нуля. Тем самым оценочное время подлета литейной пыли от выхода из источника струи до попадания в плазму оказалось выше ожидаемого, и в результате было определено экспериментально. Для того, чтобы поток попадал в плазму на квазистационарной стадии разряда, приходилось производить запуск инжектора более чем за 1 секунду до пробоя плазменного разряда. Скорость пыли на входе в плазму также определялась расстоянием от последней из воронок до периферии шнура. При этом стоило ожидать также переформирования пылевого потока: та его часть, что попадала в центр воронки, пройдет ее без задержки, и, соответственно, чем дальше от центра отклонилась частица, тем большее время она затратит на сползание по поверхности воронки. В связи с этим для того, чтобы привести систему инъекции в работоспособное состояние, потребовалось провести серию описанных в следующем параграфе настроечных экспериментов.

2.1.5.4 Эксплуатация системы инъекции литейной пыли.

Разработанная в ходе настроечных экспериментов технология эксплуатации системы инъекции металлической литейной пыли заключается в следующем.

Система инъекции в составе источника пылевой струи и подсистемы доставки пыли монтировалась в ходе первоначальных опытах на откачиваемом стенде, в последующем – над вакуумной камерой токамака Т-10. Угол между подвижной и неподвижной пластинами источника выставлялся так, чтобы носик бункера (поз. ба на Рис. 2.10.) оказался задран на 2-3° во избежание самопроизвольного высыпания пыли.

Перед началом экспериментов в пожаробезопасном помещении с применением средств защиты рук, глаз и органов дыхания необходимое количество порошка отмеряется мензуркой и засыпается в бункер источника. В процессе засыпки бункер слегка встряхивается, чтобы добиться более плотной упаковки в нем пылевых частиц. Необходимо заполнить бункер полностью, чтобы минимизировать объем запертого в

нем газа. После этого носик бункера затыкается пробкой, сборка устанавливается внутри вакуумной камеры источника (см. Рис. 2.10.), и закрывается крышкой. Через юстировочное окно производится проверка правильного положения поддержек носика бункера, после чего из носика пробка вынимается, а окно герметизируется малой крышкой. Система инъекции собрана и готова к откачке (Рис. 2.12.).

Так как зарядка бункера инжектора производится на атмосфере, небольшое количество газа все же оказывается запертым между частичками литиевого порошка. Если включить откачку системы напрямую, то сформируется перепад давления, который выбросит часть пыли из бункера. В связи с этим откачка начиналась в режиме, приближенном к адиабатическому, через натекабель. После снижения давления в системе до уровня в несколько десятков торр натекабель постепенно открывался, откачка ускорялась. Как показала серия стендовых экспериментов, такая последовательность действий при откачке не приводит к нежелательным выбросам пыли.

После того, как инжектор откачивается до необходимых значений вакуума, производится серия включений привода источника пылевой струи, пока на сигнале с оптического барьера в подсистеме доставки пыли не будет получаться воспроизводимый сигнал. Это свидетельствует о том, что в носике бункера источника струи порошок распределился равномерно, и процесс инъекции установился.

Как уже упоминалось выше, поток пыли на выходе из источника является достаточно равномерным, и на тестовом стенде характерные длительности нарастания и снижения потоков при включении и отключении вращения барабанного бункера соответственно были оценены в пределах 60 мс. Тем не менее, форма сигнала с оптического барьера, расположенного через две воронки по ходу переходника между дозатором и плазмой, оказалась не прямоугольной, а треугольной (см. Рис. 2.13.). Сигнал нарастал на протяжении примерно 300 мс, после чего начинал постепенно спадать еще на протяжении около 500 мс. Причину этого показали стендовые эксперименты: на каждой из воронок лишь малая доля пыли проходит напрямую без задержки, а основная часть в значительной степени тормозится при скатывании по поверхности воронок. Такую же характерную форму имел и сигнал излучения из плазмы на линии LiII (самая правая кривая на Рис. 2.13.), зарегистрированного в сечении внесения лития, после того, как пылевой поток прошел третью воронку. Резкий характер спада этого сигнала в районе 2100 мс с момента включения источника связан с тем, что в это время происходит окончание разряда, и излучение на линии лития

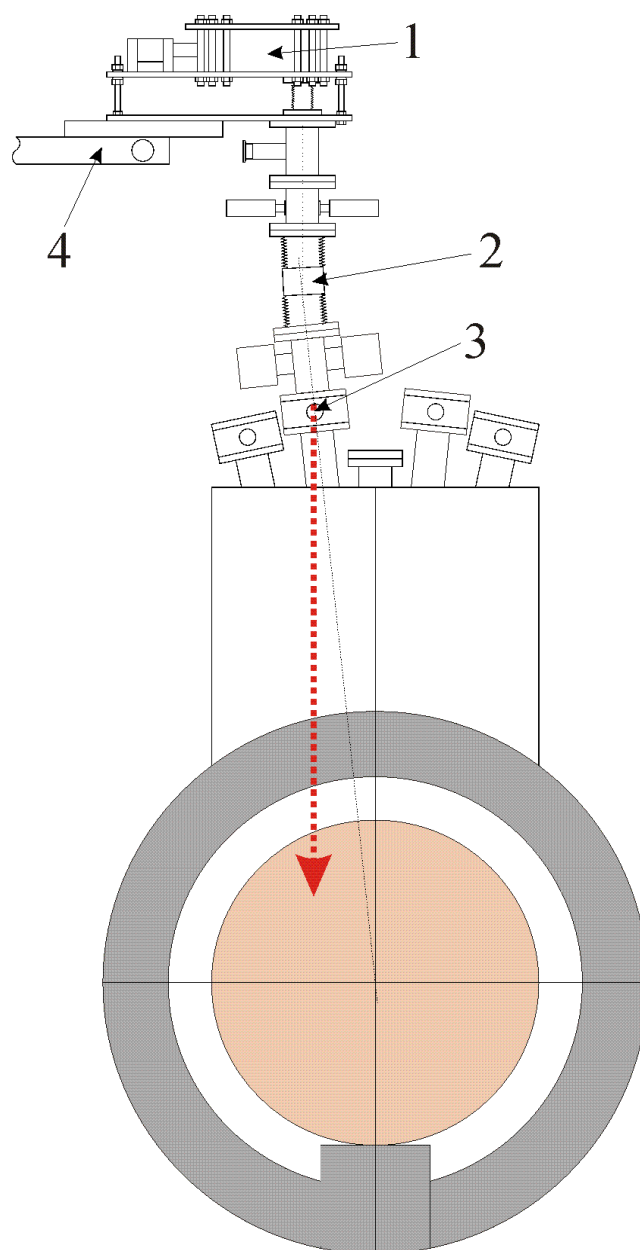


Рис. 2.12. Система инъекции литиевой пыли на Т-10. 1 – источник пылевой струи; 2 – подсистема доставки пыли в токамак; 3 – порт вакуумной камеры токамака Т-10; 4 – крепление инжектора к конструкции токамака. Красная пунктирная стрелка показывает направление инъекции пыли, розовый круг – плазма Т-10 (малый радиус 30 см), серым цветом выделены углеродные кольцевая диафрагма и рельсовый лимитер.

обрывается, происходящая при этом кратковременная вспышка в масштабе времени рисунка не показана. Важно подчеркнуть, что если бы падение пыли не задерживалось системой воронок, то под действием силы тяжести она пролетала бы 1.5 м от выхода издозатора до периферии плазмы за примерно 550 мс. Кроме того, не все вышедшее из дозатора вещество попадает в плазму. На подходе к оптическому барьеру небольшая

доля литиевого порошка (до 10%) теряется за счет рассеяния в сборнике 2с и на сильфоне 3 (см. Рис. 2.11.). В связи с этим интеграл под второй кривой на Рис. 2.13. меньше, чем под первой. Еще большая часть пыли (до 90% от вошедшего в вакуумную камеру количества) теряется за счет происходящих в SOL процессов зарядки и переноса пылевых частиц. Это обсуждается более подробно в параграфе 4.2.1.2. В связи с этим значения потока пыли на третьем графике Рис. 2.13. домножены на 10. Необходимо отметить еще, что некоторая часть пыли не успевает попасть в плазму до конца разряда, что также приводит к небольшому уменьшению количества вносимого в плазму вещества.

Для синхронизации с работой токамака система запускалась посредством сигнала с пульта ведущего экспериментатора Т-10 «Старт продольного поля» за 1700 мс до пробоя разряда, время начала внесения струи в плазму регулировалось с помощью блока управления инжекцией. Сбор и оцифровка сигнала с оптического барьера производилась с помощью той же системы сбора на основе АЦП, что использовалась и для диагностик инжектора примесных макрочастиц (см. Раздел 2.1.3.2.).

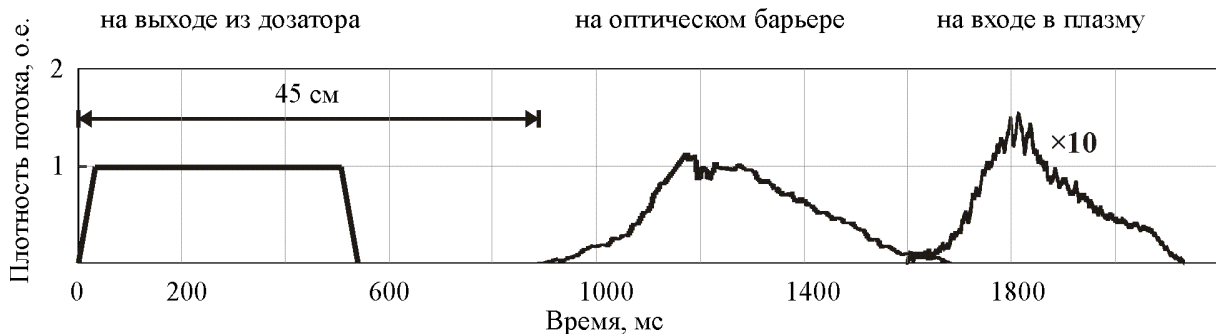


Рис. 2.13. Изменение потока пыли от выхода из дозатора до входа в плазму на примере разряда 61650. По оси абсцисс показано время от начала включения источника пылевой струи.

Таким образом, в ходе подготовки эксперимента была создана, оттестирована и настроена система инжекции пылевой струи для токамака Т-10 в составе источника пылевой струи и подсистемы доставки пыли в токамак. Разработана технология работы с порошком металлического лития с пассивирующей оболочкой SMLPTM. Оборудование установлено в диагностический комплекс Т-10 и введено в эксплуатацию.

2.2 Система инжекции примесных макрочастиц в стелларатор W7-AS.

Стелларатор Wendelstein 7-AS [115] работал в Институте физики плазмы им.Макса Планка в Гархинге, Германия. Его большой радиус составлял 205 см, эффективный малый радиус (с учетом отличающегося от круглого вида сечения магнитных поверхностей) – около 17 см. Он состоял из пяти идентичных секций, охватывающих угол в 72° в тороидальном направлении. Характерные параметры плазмы в рассматриваемых экспериментах были следующими: электронная плотность $(7-12) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, электронная температура 300-500 эВ, магнитное поле на оси плазмы 1.5 Тл. В качестве источников нагрева плазмы использовалась антенна ион-циклотронного резонансного нагрева, мощность излучения которого в рассматриваемых экспериментах составляла 0.1-0.5 МВт, а также инжектор нейтральных атомов с мощностью 1.75 МВт. Гиротронный комплекс в данных экспериментах не использовался.

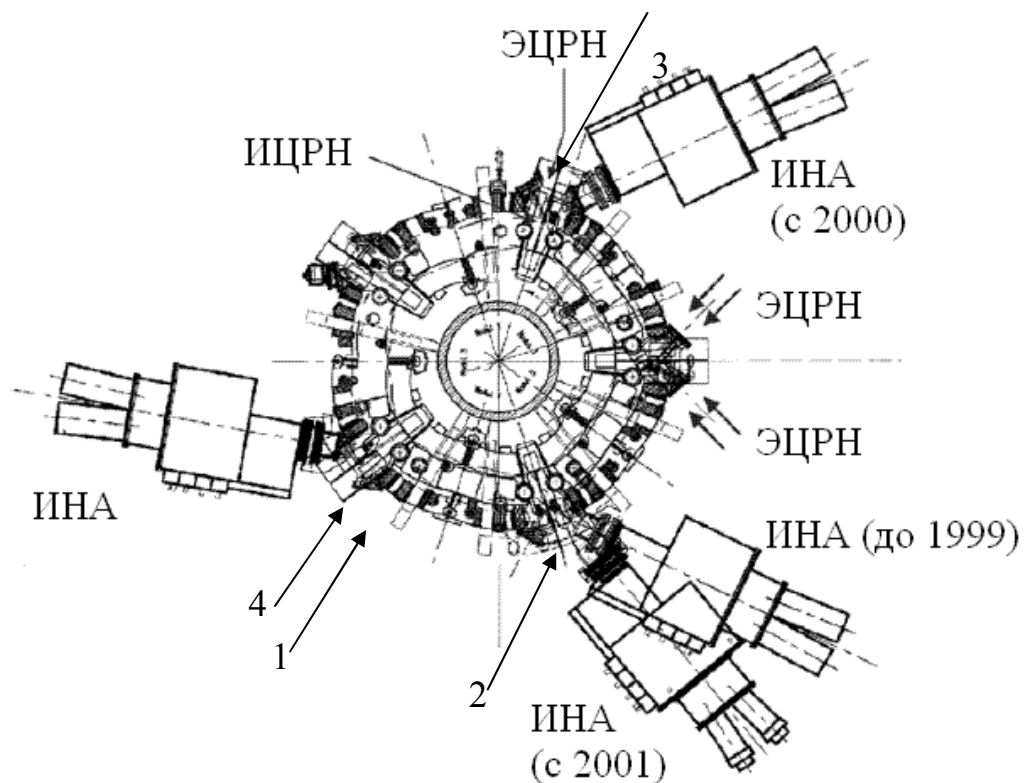


Рис. 2.14. Установка W7-AS, системы нагрева плазмы и основные диагностики [115]. ЭЦРН – электрон-циклотронный нагрев, ИЦРН – ион-циклотронный нагрев, ИНА – инжектор нейтральных атомов. 1 – инжектор примесных макрочастиц, 2 – многоканальный интерферометр, 3 – томсоновское рассеяние, 4 – многоканальный приемник ЭЦИ.

Расположение основных систем нагрева и использовавшихся диагностик приведено на Рис. 2.14. Аббревиатурами отмечены источники нагрева плазмы (ЭЦРН – электрон-циклотронный резонансный нагрев, ИЦРН – ион-циклотронный резонансный нагрев, ИНА – инжектор нейтральных атомов). Цифрой 1 указано расположение инжектора примесных макрочастиц с его системой диагностик. Отмечены также важнейшие диагностики установки: 2 – многоканальный интерферометр для измерения плотности плазмы, 3 – диагностика плазмы по томсоновскому рассеянию (температура, плотность), 4 – многоканальный супергетеродинный приемник ЭЦИ для измерения электронной температуры.

Эксперименты по инжекции углеродных макрочастиц в плазму стелларатора Wendelstein 7-AS проводились с помощью инжектора примесных макрочастиц типа ДИМ-6 [23], мало отличающегося от описанной в параграфе 2.1.3.1. модели.

Регистрация временной и пространственной динамики процесса испарения макрочастицы и фиксация формы облаков испаренного вещества на Wendelstein 7-AS производились с помощью видеокамеры, комплекта быстрых CCD-камер с изменяемой выдержкой, и широкообзорного фотодетектора. Расположение этих диагностик относительно оси, вдоль которой производится инжекция, показано на Рис. 2.15.

Здесь изображено полоидальное сечение установки в месте установки инжектора. Показано типичное для этого сечение плазменного шнура. Газодинамический инжектор (1) обеспечивал их ускорение в направлении магнитной оси плазменного шнура со скоростями 250-300 м/с. Излучение светящегося облака вокруг испаряющейся макрочастицы регистрировалось с двух направлений: со стороны нижнего патрубка, так что оптическая ось системы находилась под углом 46° в полоидальном направлении к оси инжекции, и сзади, вслед макрочастице. Сопоставляя полученные таким образом снимки макрочастиц в плазме с полученным заранее изображением калибровочной линейки с точно известным расположением внутри вакуумной камеры установки, можно было выполнить трехмерное позиционирование трека макрочастицы относительно карты магнитных поверхностей. CCD камеры, отмеченные цифрами 2 и 3, предназначались для регистрации интенсивности излучения с направления, примерно ортогонального траектории макрочастицы. Изображение на матрицы попадало через поворотное зеркало 5 и объектив 4, полупрозрачное зеркало 6 позволяло делить изображение на 2 камеры, которые могли работать в разном режиме по выдержке либо регистрировать излучение на разных линиях. Для реализации этого в специальные посадочные места вставлялись

светофильтры (позиция 7). В описываемых экспериментах использовались светофильтры, центры полос пропускания которых находились на длине волны 720 нанометров, ширина пропускания на половине высоты составляла 10 нанометров. Это позволяло регистрировать излучение на линии СП углерода (723 нм). С направления сзади, вслед траектории, испарение наблюдалось с помощью широкообзорного диода 8, еще одной CCD-камеры 9 и видеокамеры 10. Перед ними также устанавливались светофильтры.

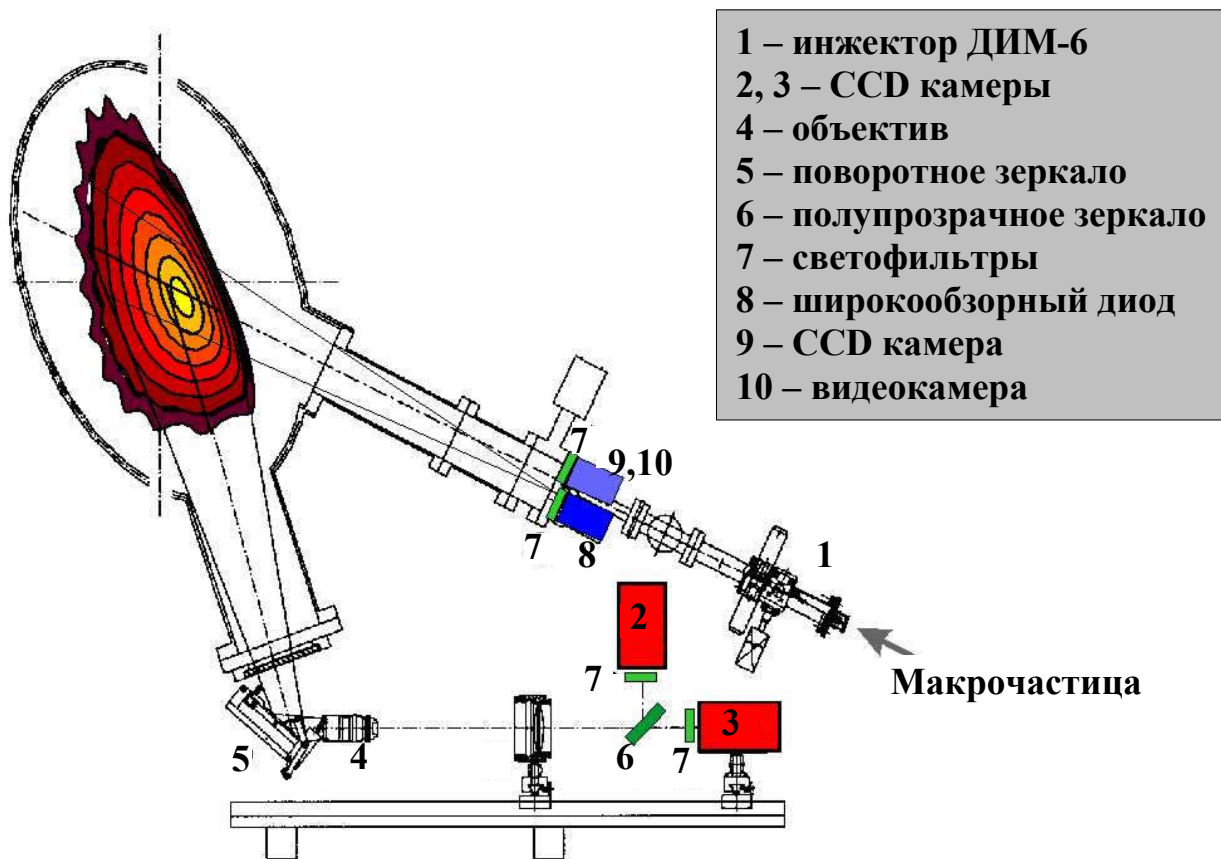


Рис. 2.15. Масштабная схема расположения диагностик системы инжекции примесных макрочастиц относительно Wendelstein 7-AS.

CCD-камеры в рассматриваемых экспериментах работали в интегральном режиме, накапливая излучение за все время испарения макрочастицы. С помощью фотографирования трека с двух направлений производилась пространственная привязка его к карте магнитных поверхностей, что было необходимо для моделирования испарения.

По фотографии, получаемой с CCD-камеры 3, можно получить скорости испарения макрочастицы методом интегрирования интенсивности излучения вдоль силовых линий магнитного поля. Таким образом определяется пространственная эволюция скорости испарения. Данные о соответствующей временной эволюции получаются с широкообзорного диода 8. Пространственная и временная картины могут быть связаны с использованием известной скорости макрочастицы. Фотодиод используется для исследования быстрых процессов при испарении, так как CCD камера является интегрирующим прибором с постоянной интегрирования $\sim r_0/V_p$ (здесь r_0 – радиус макрочастицы, V_p – ее скорость). В результате тонкая структура облаков при резких скачках скорости испарения может оказаться смазанной. В то же время она дает двумерную картину траектории пеллеты, которую невозможно зарегистрировать с помощью диода. В рассматриваемых экспериментах проводилось сопоставление данных, получаемых с обеих диагностик.

В результате диагностический комплекс примесной инжекции дает полный набор информации, необходимой как для моделирования скорости испарения макрочастицы, так и для получения широкого объема данных о процессах испарения и связанных с ними явлениях в плазме стелларатора Wendelstein 7-AS. Более детализированные сведения о комплексе примесной инжекции макрочастиц на данной установке приведены в работе [116].

3. Исследование особенностей испарения углеродных макрочастиц.

Разные приложения внесения примеси в разряд требуют разную глубину высаживания вещества: для управления рециклингом литий инжектируется на периферию, для выключения разряда однократной инъекцией тяжелая примесь вводится в центральные области плазмы, для диагностических приложений (например, [117]) или подавления убегающих электронов серией инъекций [14] необходимо получить максимум испарения именно в интересующем отрезке малого радиуса. Это показывает важность предварительного расчета профиля скорости испарения макрочастицы при подготовке эксперимента. Для решения этой задачи был разработан целый ряд моделей (например, модель нейтрального экранирования [9]) и скейлингов (например, [10]).

Однако, как показывает целый ряд перечисляемых ниже экспериментов, при инъекции макрочастицы в плазму далеко не во всех случаях глубину проникновения можно надежно предсказать с помощью подобных инструментов. Различные физические эффекты, которые не учтены в моделях и скейлингах, могут оказывать значительное воздействие на эволюцию скорости испарения вдоль траектории. Такие эффекты можно разделить на три типа. В первом из них расхождение между расчетной и экспериментальной скоростями испарения происходит под влиянием сложно учитываемых при моделировании параметров плазмы, таких, как, например, наличие в плазме надтепловых электронов [118]. Во второй тип можно объединить быстрые явления, происходящие в плазме за счет воздействия на нее испаряющейся макрочастицы. В первом параграфе данной главы продемонстрированы иллюстрирующее это экспериментальные результаты, а также предложена версия модели нейтрального экранирования, позволяющая описать наблюдаемые эффекты. В третий тип входят явления, связанные с особенностями поведения материала макрочастицы под воздействием плазмы. Во втором параграфе данной главы представлено испарение углеродных макрочастиц в условиях высокой плотности и мощного ионного нагрева, в результате чего с поверхности макрочастицы происходит эмиссия крупинок (микропеллетов), что приводит к заметному возрастанию общей площади испаряемой поверхности и, как следствие, к возрастанию скорости поступления углерода в плазму.

3.1 Быстрые МГД-процессы при испарении примесных макрочастиц.

Инжекция примесных макрочастиц достаточно давно уже была предложена как методика измерения различных параметров плазмы. Для диагностического использования необходимо, чтобы вносимое макрочастицей возмущение не оказывало значительного влияния на исследуемые параметры плазмы. Можно ожидать, что такое условие реализуется, если число электронов в макрочастице в несколько раз меньше, чем их содержание в плазме. Это накладывает ограничения на объем вносимого вещества.

Однако это условие является необходимым, но не достаточным. Как показали эксперименты, проведенные на ряде установок, при локальных возмущениях периферии плазмы, например, за счет внесения примесных макрочастиц ([31], [33]) или аэрозолей ([20], [21], [32]), может быть возмущен весь плазменный шнур. При этом, например, в работе [31] подчеркивался экспериментальный факт, что скорость проникновения возмущения в центральные области плазмы в несколько раз может превышать скорость инжектированной макрочастицы. Авторы большинства работ подчеркивают, что амплитуды наблюдаемых эффектов так называемого «нелокального переноса» тем больше (например, [31], [33], [36], [37]), а их характерные времена нарастания тем меньше [33], чем большее возмущение вносится на периферию плазмы. Возникает вопрос о том, как можно численно характеризовать возмущение и отклик на него для условий T-10. Для прояснения этого на этом токамаке было проведено несколько серий экспериментов по инъекции примесных (в основном углеродных) макрочастиц разных размеров. Предполагалось, что крупные макрочастицы за счет внесенного вещества могут приводить к развитию МГД-процессов, оказывающих воздействие на испарение инжектированной макрочастицы.

В связи с этим в задачи работы входило проведение анализа охлаждения плазмы при инъекции примесных макрочастиц, оценка зависимости характера возмущения от количества внесенного вещества, и описание происходящих при этом процессов с включением их в модель нейтрального экранирования.

В следующих подразделах сначала будут представлены полученные экспериментальные данные, затем предложена модель для их описания, а также проведено обсуждение полученных результатов.

3.1.1 Эксперименты по инъекции макрочастиц разных размеров в Т-10.

Сферические углеродные макрочастицы с диаметрами, изменявшимися в пределах от 0.20 до 0.62 мм, что соответствует содержанию от 1.9×10^{17} до 5.6×10^{18} атомов углерода, ускорялись до 350-450 м/с и инжектировались сверху в направлении оси плазменного шнура (см. Рис. 2.2.). При выбранных параметрах плазмы (омический нагрев, средняя плотность $2.2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (полное число электронов в разряде 5.8×10^{19} , что соответствует содержанию электронов в углеродной макрочастице диаметром 0.74 мм), электронная температура в центре около 1.2 кэВ, ток по плазме 270 кА) для диаметра макрочастиц более 0.5 мм наблюдалось их проникновение за центр плазмы, а при диаметре 0.62 мм макрочастица по данным диагностик системы примесной инъекции простреливала плазменный шнур практически навывлет. Испарение наблюдалось с помощью CCD-камеры, регистрировавшей трек макрочастицы за счет интегрирования излучения из углеродного облака за все время испарения, и широкообзорного фотодетектора с интерференционным фильтром, регистрирующего временную эволюцию сигнала излучения на линии углерода СII с разрешением в данных экспериментах около 1 мкс. Более подробно постановка эксперимента описана в разделе 2.1.3.

В экспериментах было обнаружено появление зон повышенного и пониженного испарения по сравнению с Моделью Нейтрального Экранирования (МНЭ) ([9], [27]) (в моделировании использовался экспериментально измеренный профиль плотности, который может быть аппроксимирован как $n(r) = n(0) \cdot \left(1 - (r/a)^2\right)^{1.2}$, профиль температуры электронов рассчитывался на основе центральных значений по скейлингу $T(r) = T(0) \cdot \left(1 - (r/a)^{2.3}\right)^2$) (см. работу [119]). Появление указанных зон имело четко выраженный пороговый эффект по размеру вносимых макрочастиц. Профили скорости испарения макрочастиц диаметром выше 0.3 – 0.35 мм (содержание электронов 3.8×10^{18} - 6.1×10^{18} соответственно) начинают демонстрировать локализованные всплески и провалы испарения, в то время как меньшие макрочастицы в большинстве случаев испарялись «гладко». В этом случае значения скорости испарения соответствовали предсказаниям МНЭ [27], как видно из Рис. 3.1. Более подробно скан по размеру макрочастицы от 0.2 до 0.62 мм приведен на Рис. 3.2. Здесь для наглядности экспериментально полученные профили скорости испарения приведены в одном

масштабе, линии уровня нуля разнесены по оси ординат во избежание наложения. Слева рядом с каждым графиком указан диаметр макрочастицы. Очевидно, что по мере увеличения размера частицы (и содержания в ней углерода) отклонение формы профиля скорости испарения от предсказаний стандартной МНЭ увеличивается.

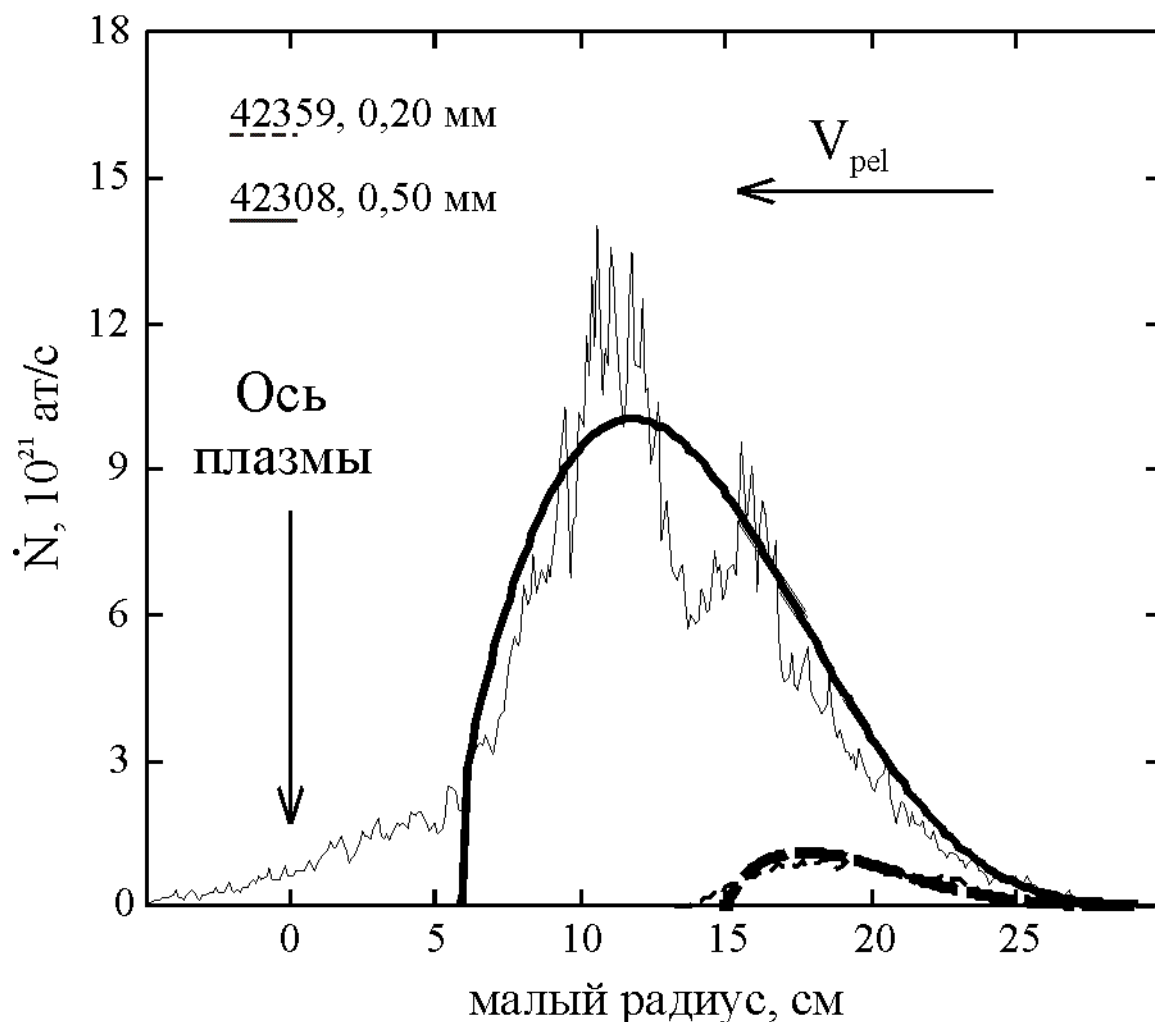


Рис. 3.1. Измеренная по излучению на линии углерода (ломаные линии) и рассчитанная по модели нейтрального экранирования [27] (гладкие кривые) скорость испарения для макрочастиц разных диаметров. Скорости макрочастиц: разряд 42359 – 393 м/с, 42308 – 383 м/с.

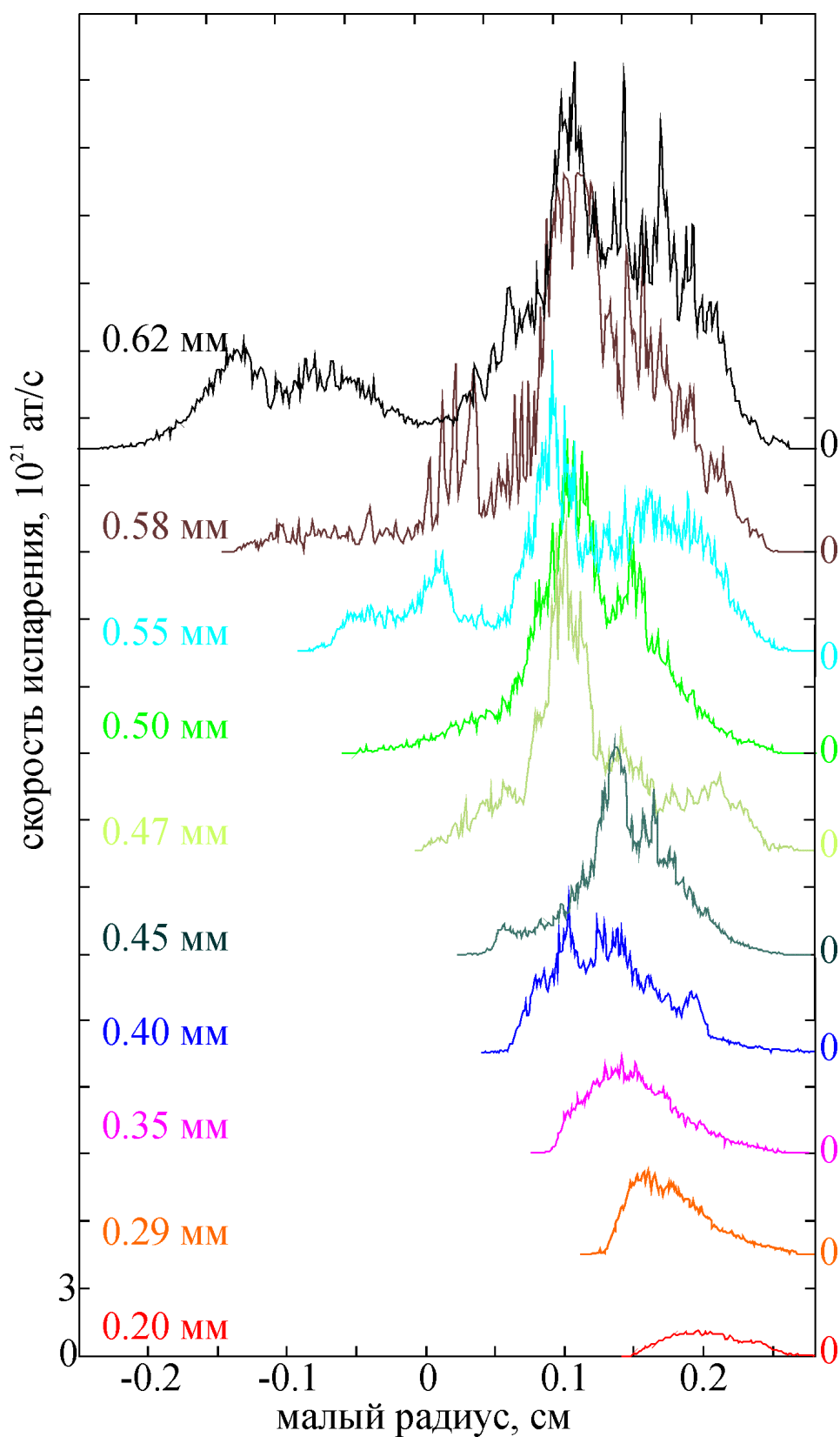


Рис. 3.2. Изменение характера экспериментально измеренных профилей скорости испарения макрочастиц при возрастании количества вещества в макрочастице. Во избежание излишнего наложения линии уровня нуля разнесены по оси ординат. Одно деление по оси ординат соответствует 3×10^{21} ат/с.

При попадании макрочастицы в плазму она начинает испаряться, за счет чего происходит снижение температуры и возрастание плотности. Для этих процессов можно легко оценить несколько характерных пространственных и временных параметров. Во-первых, это время, за которое макрочастица успевает сместиться на свой диаметр: $t_p = d_p/V_p = 1.7$ мкс. Вдоль магнитного поля тепловая скорость, время столкновений и длина свободного пробега оцениваются как 2×10^7 м/с, 6 мкс, 100 м соответственно. Поэтому можно считать, что функция распределения электронов за время t_p не возмущается. За это же время волна охлаждения в радиальном направлении сместится на расстояние $\sim \sqrt{\chi_{\perp} t_p}$, что для середины малого радиуса, где в условиях Т-10 $\chi_{\perp} \sim 0.2$ м²/с, составляет ≈ 0.5 мм. Таким образом, можно ожидать, что характерный масштаб волны охлаждения соизмерим с размерами макрочастицы и определяется скоростью макрочастицы. Но оказывается, что в некоторых случаях характерные времена снижения температуры плазмы при инжекции могут оказаться меньше времени, оцениваемого по скорости макрочастицы.

На Рис. 3.3. приведены сигналы второй гармоники электронного циклотронного излучения, которое пропорционально электронной температуре плазмы. Они нормированы на температуру на радиусе измерения непосредственно перед инжекцией, для случая углеродной инжекции в разряде 40775 (диаметр макрочастицы 0.5 мм). Каждая ломаная линия соответствует своему радиусу приемника ЭЦИ, расстояние между последовательными каналами которого в частотном диапазоне составляет 2 ГГц. С учетом зависимости тороидального поля от большого радиуса для рассматриваемых частот можно оценить пространственный интервал между каналами как слабо меняющийся от 1.8 до 2.1 см.

При обработке данных для радиального положения каждого канала r_i определялся момент времени t_i падения температуры ниже уровня шумов (т.е. на 15% по сравнению с невозмущенными значениями), по аналогии с работой [31]. Этот уровень показан горизонтальной пунктирной линией. Из Рис. 3.3. видно, что снижение температуры плазмы при продвижении макрочастицы вглубь происходит немонотонно (см. зависимость $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ между соседними каналами в зависимости от радиального положения канала r_i). Следует отметить, что быстрая перестройка температурного профиля наблюдалась не только при примесной инжекции, но и при инжекции крупных водородных макрочастиц [31].

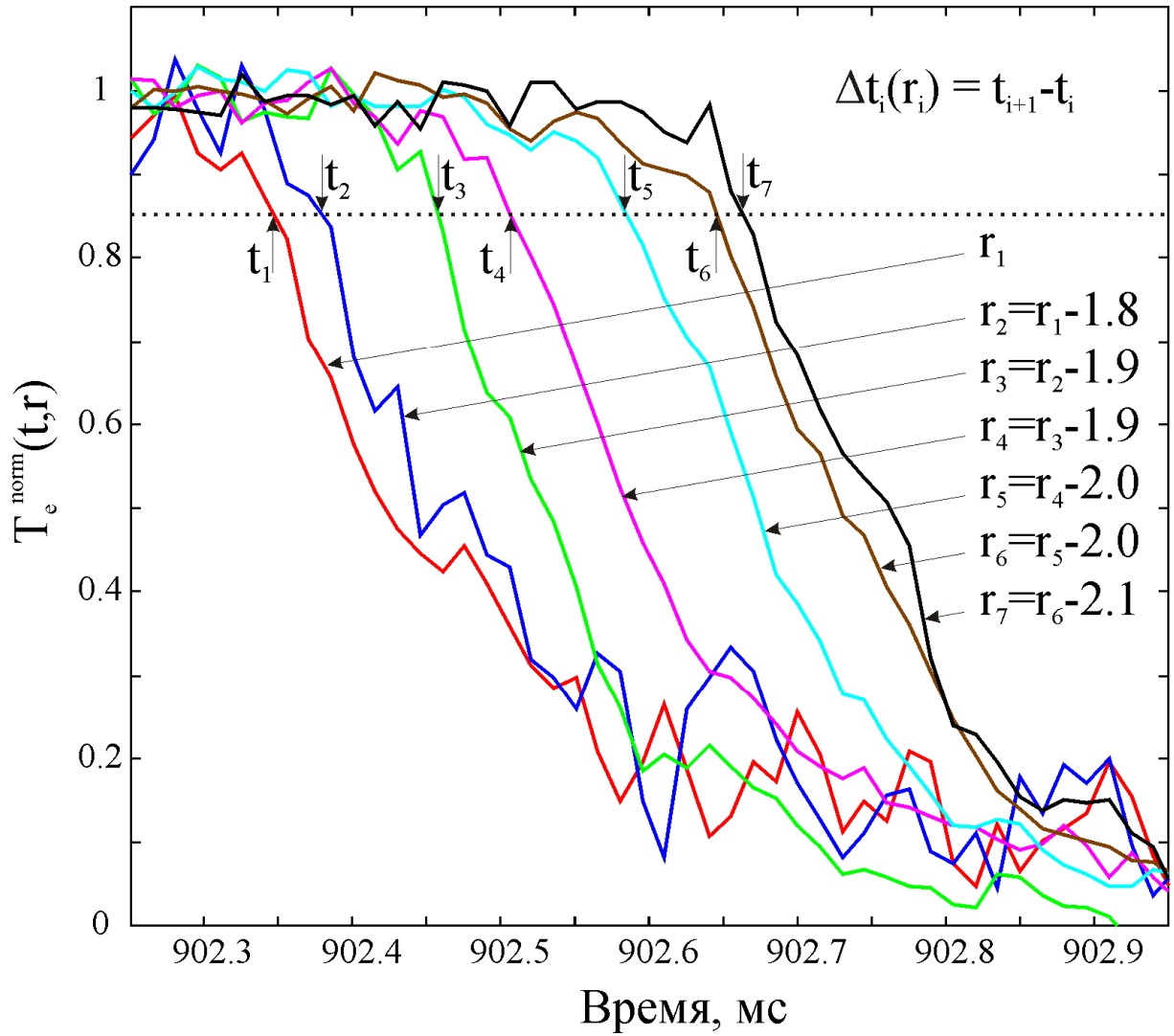


Рис. 3.3. Падение электронной температуры в разряде 40775 при проникновении углеродной макрочастицы в плазму. Приведены нормализованные сигналы второй гармоники ЭЦИ. Каждая линия соответствует своему малому радиусу r_i , расстояние между которыми составляет около 2 см. Моменты t_i определяются по падению ниже уровня шумов 0.85, отмеченному горизонтальной пунктирной линией. Видна неравномерность $\Delta t_i(r_i) = t_{i+1} - t_i$.

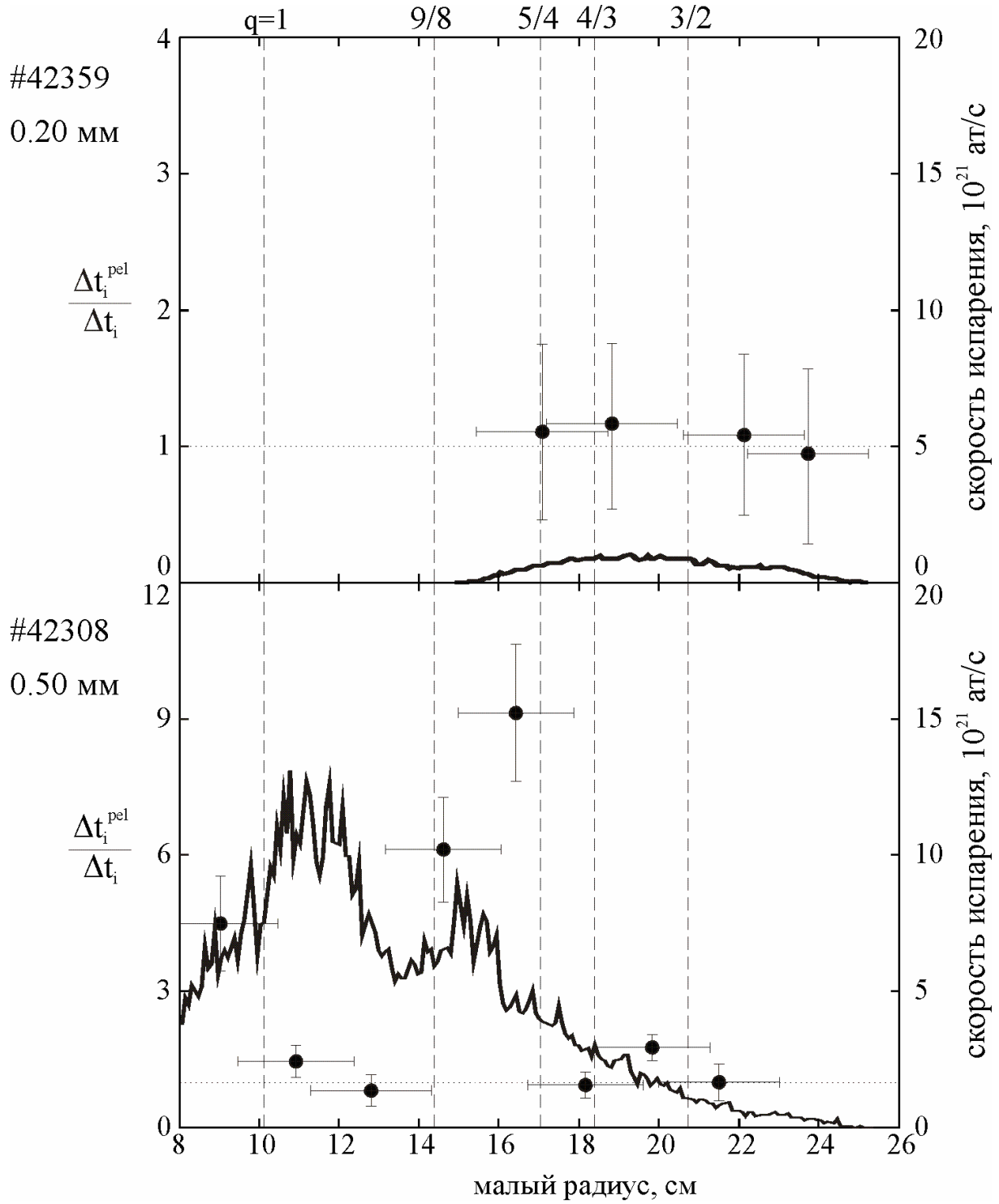


Рис. 3.4. Сопоставление скорости испарения (кривые, шкала справа) и параметра $\gamma = \Delta t_i^{pel} / \Delta t_i$ (точки, шкала слева) в зависимости от диаметра макрочастицы.

Для того, чтобы охарактеризовать процесс неравномерного падения температуры плазмы при продвижении макрочастицы, удобно ввести коэффициент $\gamma = \Delta t_i^{pel} / \Delta t_i$. Здесь $\Delta t_i^{pel} = (r_{i+1} - r_i) / V_{pel}$ – время, необходимое макрочастице с известной скоростью V_{pel} , для преодоления расстояния $r_{i+1} - r_i$ между соседними каналами ЭЦИ.

Рис. 3.4. иллюстрирует изменение характера поведения γ при проникновении макрочастиц разного размера в плазму. На нем ломаные линии – скорость испарения макрочастицы, привязанная к малому радиусу плазмы, черные точки – отношение γ . Пунктирной горизонтальной линией показан уровень $\gamma = 1$, штриховыми вертикальными линиями – положения рациональных q . Видно, что для макрочастиц диаметром менее 0.3 мм отношение времен близко к единице. Для больших же диаметров наблюдается резкое увеличение γ в ряде узких областей, ассоциируемых с рациональными магнитными поверхностями и с провалами на скорости испарения. Во всех случаях инъекции крупных макрочастиц наблюдался рост γ в районе 10-12 см малого радиуса, в области магнитной поверхности с запасом устойчивости $q=1$.

Еще одним возможным механизмом, способным создать колебания на профиле скорости испарения макрочастицы, является стратификация (см., например, [120]). К сожалению, в описываемых экспериментах на T-10 необходимое для регистрации стратификации фотографирование облаков макрочастиц с микросекундными выдержками не производилось. Однако по косвенным признакам можно предположить, что наблюдаемые на T-10 эффекты не могут определяться одной лишь стратификацией, так как колебания на профилях скорости испарения, представленных в [120], являются меньшими по амплитуде и обладающими значительно большей частотой.

3.1.2 Моделирование испарения с учетом быстрых МГД-процессов.

Полученные данные указывают на то, что в описываемых экспериментах механизмы испарения макрочастицы и переноса испаренного вещества во время проникновения макрочастицы вглубь плазмы могут существенно определяться МГД-процессами, локализованными вблизи рациональных магнитных поверхностей. Поэтому, для объяснения обнаруженного явления скачков скорости испарения и быстрой перестройки электронной температуры была предложена модель с учетом перезамыкания магнитных поверхностей, вызванного макрочастицей. Макрочастица охлаждает плазму и добавляет в нее примесь, тем самым увеличивая эффективный заряд плазмы Z_{eff} . Охлаждение плазмы и рост Z_{eff} приводят к росту резистивности η , электрического поля и формированию магнитных островов вблизи рациональных поверхностей [121]. Оценки показывают, что такой эффект может быть весьма существенен: для типичных условий токамака резистивное время $\tau_R = \mu_0 r^2 / \eta$ может

уменьшиться в $10^3 - 10^4$ раз, поскольку вблизи макрочастицы температура электронов может составлять менее 10 эВ [22]. Эти оценки можно произвести с использованием рекомендуемых в [40] приближений как для исходной омической плазмы Т-10, так и для сильно возмущенной вблизи макрочастицы. Для первого случая для оценки брались характерные значения для середины малого радиуса: $T_e = 750$ эВ, $n_e = 2.5 \times 10^{13}$ см⁻³, $Z_{eff} = 1.6$; для второго $T_e = 5$ эВ, $n_e = 1 \times 10^{16}$ см⁻³, $Z_{eff} = 3$. Используя приведенную в [40] оценку для характерного времени роста тиринг-моды с учетом нелинейных процессов $\tau_g \sim 4.5 \left(\frac{w}{a} \right) a^2 T_e^{3/2}$ с, можно рассчитать его как для исходной омической плазмы Т-10 до инжекции, так и для сильно возмущенной вблизи макрочастицы. В первом случае на середине малого радиуса оно будет составлять 20-30 мс, во втором – 10-20 мкс. Это подтверждается и трехмерным МГД-моделированием процесса инициирования тиринг-неустойчивости при инжекции макрочастиц [122].

Снижение характерных времен тиринг-моды, развивающейся из-за воздействия макрочастицы на плазму, позволяет предложить следующий алгоритм моделирования скорости испарения с учетом эффектов перезамыкания.

Для вычисления скорости испарения макрочастицы $\dot{N}(t)$, которая зависит от температуры и концентрации электронов плазмы в точке нахождения макрочастицы, а также от ее размера, используется МНЭ [27]. Начиная от границы плазмы $r = a$ вплоть до места, где наблюдаются первые скачки скорости испарения ($q=2$), эволюция скорости испарения $\dot{N}(t)$ рассчитывается по невозмущенным значениям плотности и температуры электронов T_e . Ширина w островов тиринг-моды составляет 3-4 см, что можно оценить по наблюдаемому расстоянию между пиками на скорости испарения. Подобные (3-5 см) значения ширины острова для условий Т-10 получены и в работе [123]. Исходя из оцененной скорости роста тиринг-моды, время формирования острова заметно меньше времени ≈ 100 мкс, необходимого макрочастице для пересечения острова. Следовательно, можно считать, что макрочастица летит по сформировавшемуся острову. В модели было сделано предположение, что острова развиваются, когда макрочастица попадает на рациональную магнитную поверхность с $q=2, 3/2, 4/3$ и $5/4$. Перемешивание плазмы в областях перезамыкания формирует новые профили n_e и T_e перед макрочастицей на глубину $w/2$.

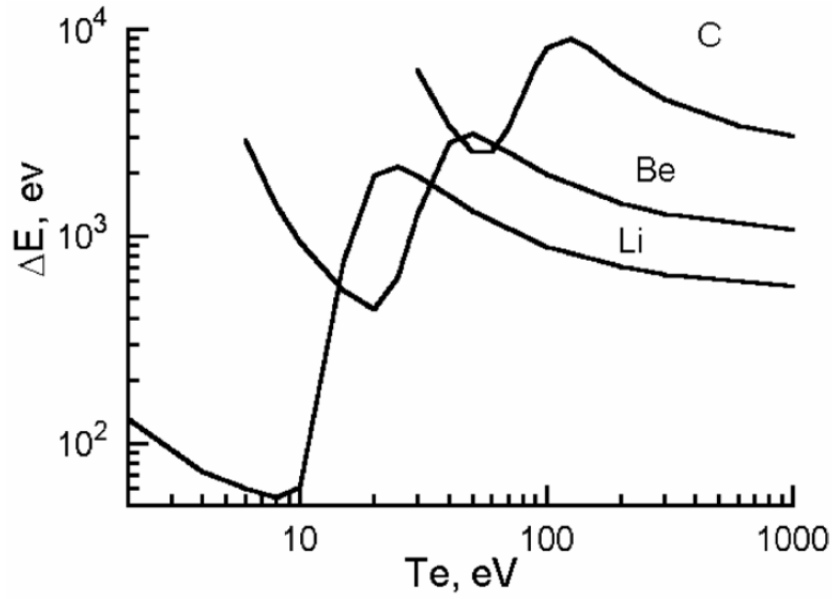


Рис. 3.5. Цена иона лития, бериллия и углерода в зависимости от температуры плазмы. Исползован Рис. 4 из работы [77].

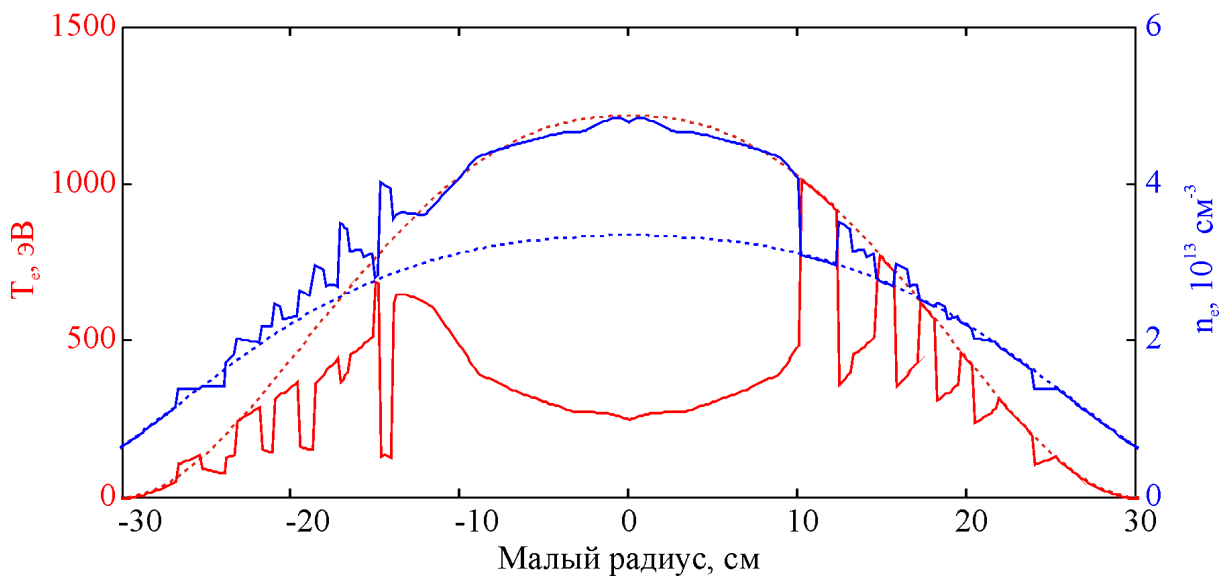


Рис. 3.6. Исходные (штриховые линии) и модифицированные (сплошные линии) профили электронной температуры (красные) и плотности (синие), использовавшиеся при моделировании испарения в разряде 42358.

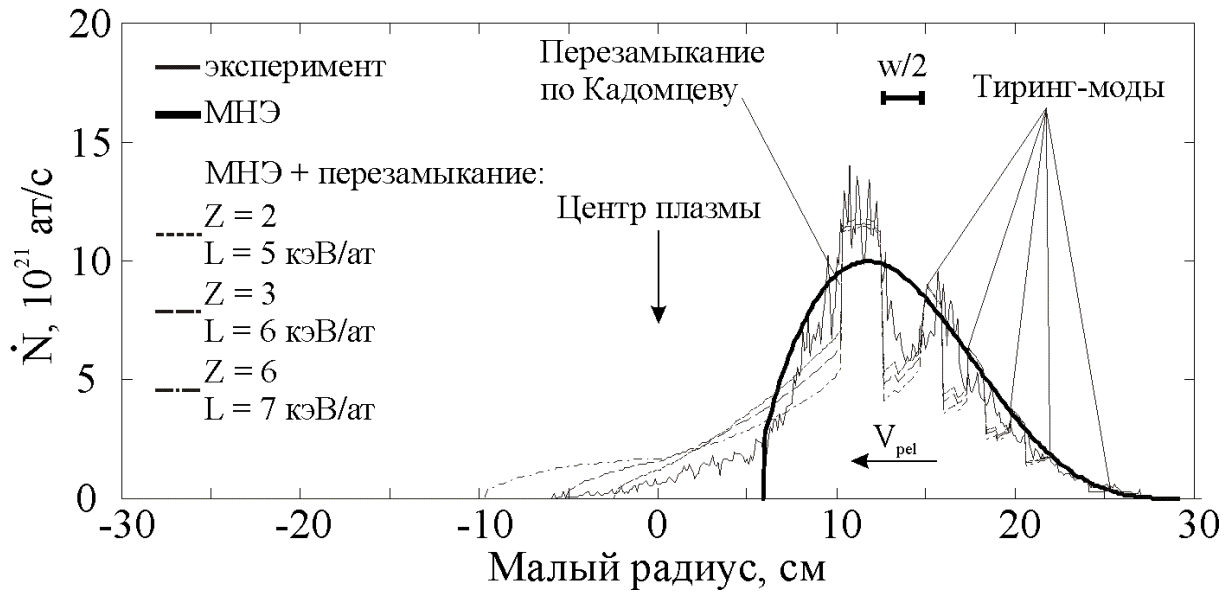


Рис. 3.7. Результаты моделирования испарения макрочастицы с учетом перезамыкания в процессе проникновения ее в плазму в разряде 42308. Скорость макрочастицы $V_{pel} = 383$ м/с, диаметр 0.50 мм, параметры моделирования испарения при перезамыканиях указаны на графиках.

В расчетах баланса энергии на магнитной поверхности было сделано несколько предположений относительно параметров, оценить точные значения которых было затруднительно. Во-первых, полагалась мгновенная по сравнению с рассматриваемым процессом 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 графика, приведенного в работе [77] и представленного на Рис. 3.5., при возрастании электронной температуры от 100 до 1000 эВ это значение плавно эволюционирует от 9 до 3 кэВ на атом испаренного углерода. Скорость испарения после процесса перезамыкания рассчитывается на основе новых профилей n_e , T_e , на Рис. 3.6. для наглядности приведены их примеры для разряда 42358 для $Z = 6$ и $L = 7$ кэВ/атом, то есть когда эффект был близок к максимальному. Для получения модифицированных профилей n_e , T_e в момент достижения макрочастицей магнитной поверхности $q = 1$ используется модель перезамыкания по Кадомцеву [124]. За центром плазмы профили n_e , T_e рассчитываются с учетом испаренного вещества.

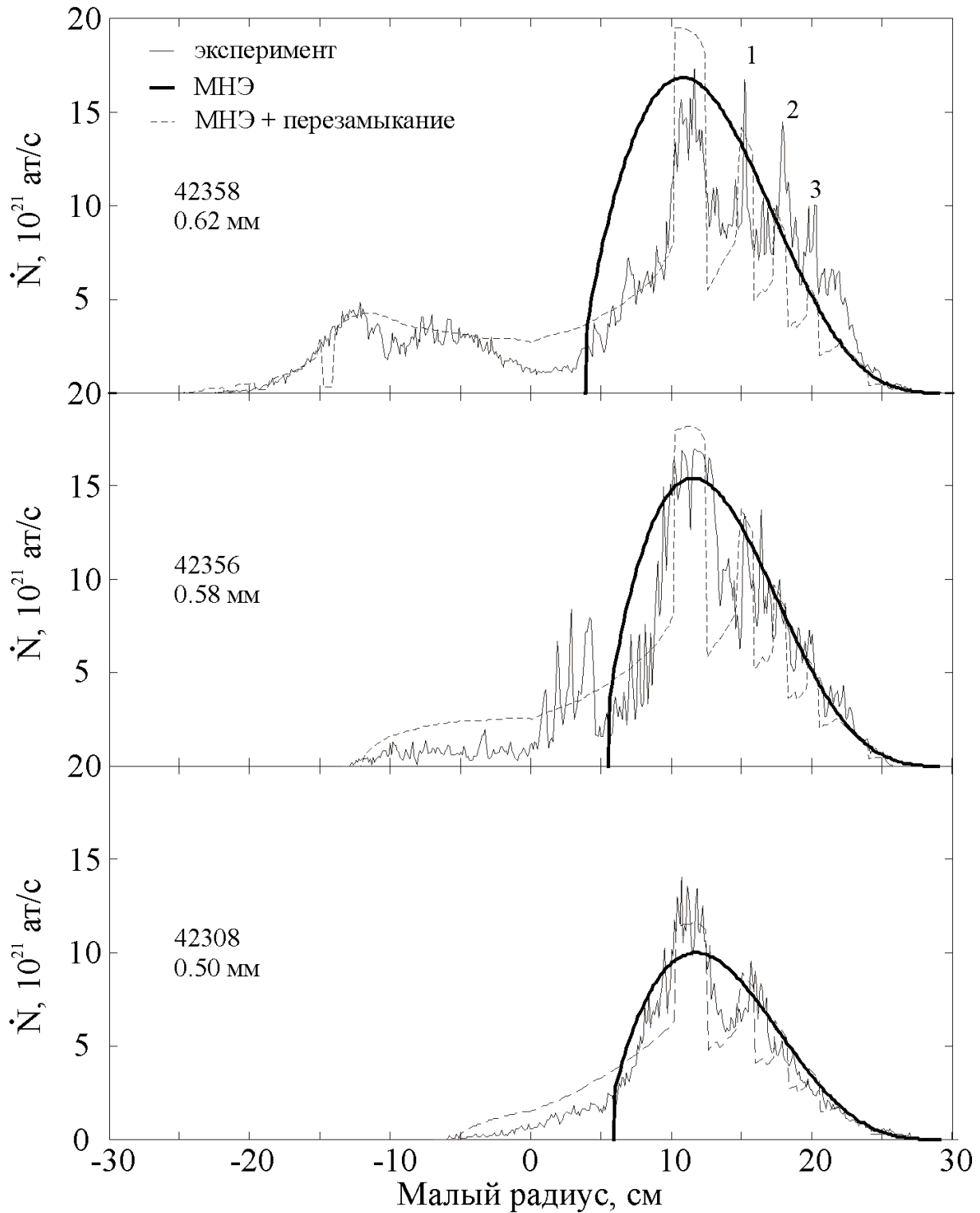


Рис. 3.8. Результаты моделирования испарения макрочастицы с учетом перезамыкания в процессе проникновения ее в плазму при $Z=3$ и $L=6$ кэВ/атом в разрядах с разными размерами макрочастиц. Их диаметры указаны на рисунках, скорости изменялись в пределах $360\div 390$ м/с.

Рис. 3.7. иллюстрирует результаты расчетов для разряда 42308 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) сравнивается с результатами расчетов по МНЭ без (жирная сплошная) и с учетом эффектов перезамыкания (пунктирная, штриховая, штрихпунктирная). Видно, что модель с перезамыканием разумно описывает наблюдаемые резкие изменения скорости испарения. Также воспроизводится и форма $\dot{N}(t)$ с начальным скачком скорости испарения в момент старта тиринг-процесса и последующим медленным спадом. Эффект перезамыкания по Кадомцеву [124], ответственный за провал кривой испарения внутри поверхности $q = 1$, ясно виден по экспериментальным данным и хорошо описывается новой моделью. Наилучшее совпадение достигается при параметрах $Z = 3$ и $L = 6$ кэВ/атом, с которыми выполнялось дальнейшее моделирование.

Результаты моделирования для разрядов с разными размерами макрочастиц при одинаковых параметрах плазмы приведены на Рис. 3.8. Видно, что расчеты неплохо воспроизводят общий ход испарения. Даже за центром плазмы (отрицательные значения радиуса по оси абсцисс соответствуют области ниже экватора) экспериментальная и расчетная кривые демонстрируют сходное поведение.

3.1.3 Обсуждение результатов.

В результате выполнения серий экспериментов обнаружен пороговый по размеру макрочастиц эффект появления всплесков и провалов на профиле скорости испарения в плазме Т-10. Углеродные макрочастицы диаметром 0.3 мм и менее не сильно возмущают магнитную структуру токамака, о чем свидетельствует гладкая форма кривых испарения, хорошо согласующаяся с предсказаниями МНЭ. Такие достаточно малые макрочастицы могут быть использованы для диагностических целей.

Макрочастицы диаметром более 0,3 мм вызывают в плазме Т-10 быстрые МГД-процессы. При этом наблюдаются флуктуации скорости испарения, происходит быстрая перестройка профиля температуры (Рис. 3.3). Это не противоречит данным, полученным на других установках – целый ряд работ (например, [31], [36], [37]) показывают рост эффекта с увеличением вносимого возмущения. Характерные времена падения температуры по сигналам ЭЦИ оказываются меньше времени смещения

макрочастицы на расстояние между этими каналами на некоторых радиусах почти на порядок (см. Рис. 3.4.), то есть процесс происходит немного быстрее, чем в [31], где отношение соответствующих времен составляло 1:2. При $q > 1$ зоны быстрых МГД-явлений локализованы в узких областях (несколько сантиметров) предположительно около рациональных магнитных поверхностей с низкими значениями q (2, 3/2, ...). Внутри области $q = 1$ ($r \sim 10$ см) скорость испарения значительно уменьшается из-за фронта охлаждения и имеет минимум на магнитной оси.

Предложено объяснение механизма влияния макрочастицы на МГД-устойчивость плазмы и алгоритм учета МГД процессов в модели испарения. Основная идея состоит в том, что макрочастица приводит к развитию магнитных островов при $q = 2, 3/2, \dots$ и перезамыканию по Кадомцеву на магнитной поверхности $q = 1$ и возбуждает перезамыкания из-за уменьшения проводимости плазмы в окрестностях испаряющейся макрочастицы. Это приводит к возрастанию инкремента тиринг-моды на три порядка, и время роста тиринг-моды становится меньше времени, необходимого макрочастице для пересечения острова.

Необходимо отметить, что в описанных экспериментах как временное, так и пространственное разрешение экспериментальных сигналов ЭЦИ было недостаточным. Это не позволяет разрешить по времени и пространству формирование отдельных островов, но тем не менее свидетельствует об их формировании качественно.

Радиальная погрешность метода определяется неточностью привязки сигнала скорости испарения к пространству и угловым рассеянием макрочастицы, и составляет около 1 см. Находящийся в горизонтальной плоскости шафрановский сдвиг в рассматриваемых режимах составлял около сантиметра, что при вертикальной инжекции не приводило к существенному росту погрешности.

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 вносить вещество дальше в плазму, что может быть важно, например, для повышения эффективности ввода топлива в реактор. Инициированные макрочастицей перезамыкания и связанные с ними конвективные переносы зависят от профиля запаса устойчивости, и поэтому должны проявляться при инжекции с любого направления.

3.2 Исследование пылевой моды испарения.

Еще один нехарактерный, отличающийся от описываемого стандартными моделями тип испарения углеродных макрочастиц наблюдался на стеллараторе Wendelstein 7-AS. Основным его отличием являлась эжекция с поверхности испаряющейся макрочастицы крупинок («микропеллетов») размером в десятки микрон. Связанный с этим рост площади поверхности оказывал влияние на скорость испарения и высаживание испаренного вещества вдоль траектории макрочастицы. Эффект наблюдался в разрядах с высокой плотностью плазмы с мощным нагревом пучком нейтральных атомов.

3.2.1 Обнаружение пылевой моды испарения углеродных макрочастиц.

В ходе эксперимента сферические углеродные макрочастицы диаметром 0.35-0.41 мм с помощью инжектора типа ДИМ-6 (см. раздел 2.2.) вносились со скоростями 250-300 м/с в плазму стелларатора Wendelstein 7-AS в сторону магнитной оси. Испарение регистрировалось с помощью CCD-камеры и широкообзорного фотодетектора (см. позиции 2 и 8 на Рис. 2.15.). Тем самым получается изображение светящегося облака испаряющейся макрочастицы в пространственных координатах и временная развертка интенсивности излучения соответственно. Излучение на линии углерода СII 723 нм вырезалось с помощью интерференционных фильтров. Радиальный профиль скорости испарения $\dot{N}(r)$ определялся по интенсивности излучения I_{cl} на линии СII на основании их пропорциональности [109]. Макрочастицы инжектировались в дейтериевую плазму с интенсивным нагревом пучком нейтральных атомов дейтерия (NBI) и незначительным нагревом на ионной циклотронной частоте (ICRH). Параметры разряда были следующими: $n_e(0) = (7.9 \div 11.5) \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $T_e(0) = 300 \div 450 \text{ eV}$, $P_{NBI} = 1.75 \text{ МВт}$ при ускоряющем напряжении 56 кВ, $P_{ICRH} = (0.1 \div 0.5) \text{ МВт}$ на второй гармонике водорода.

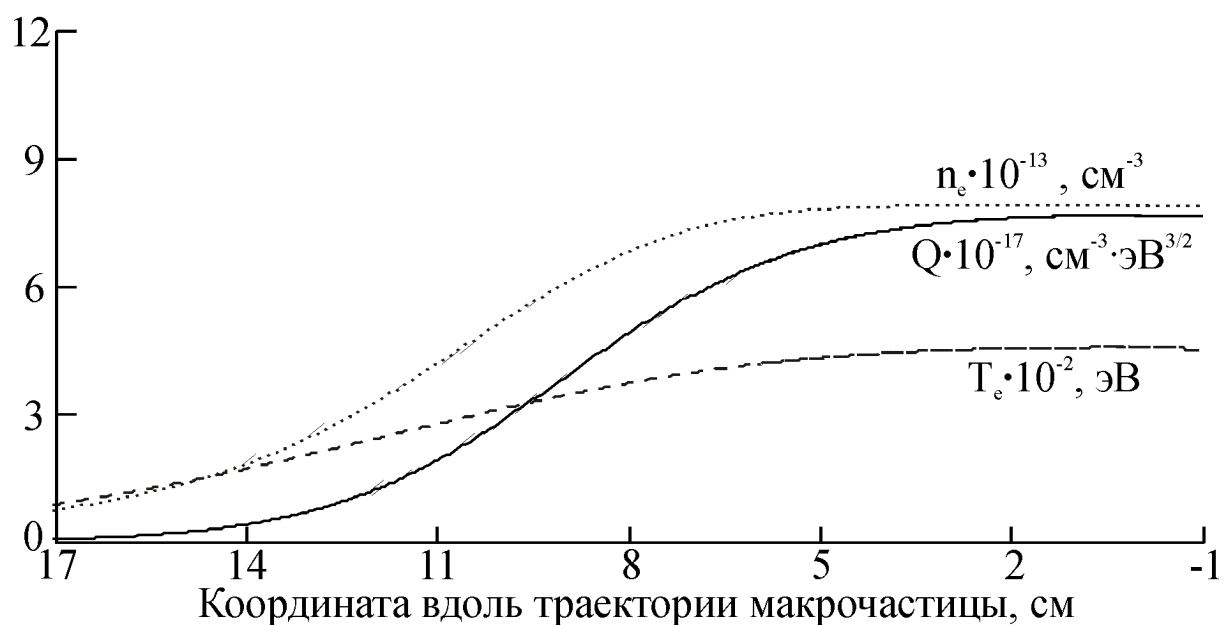
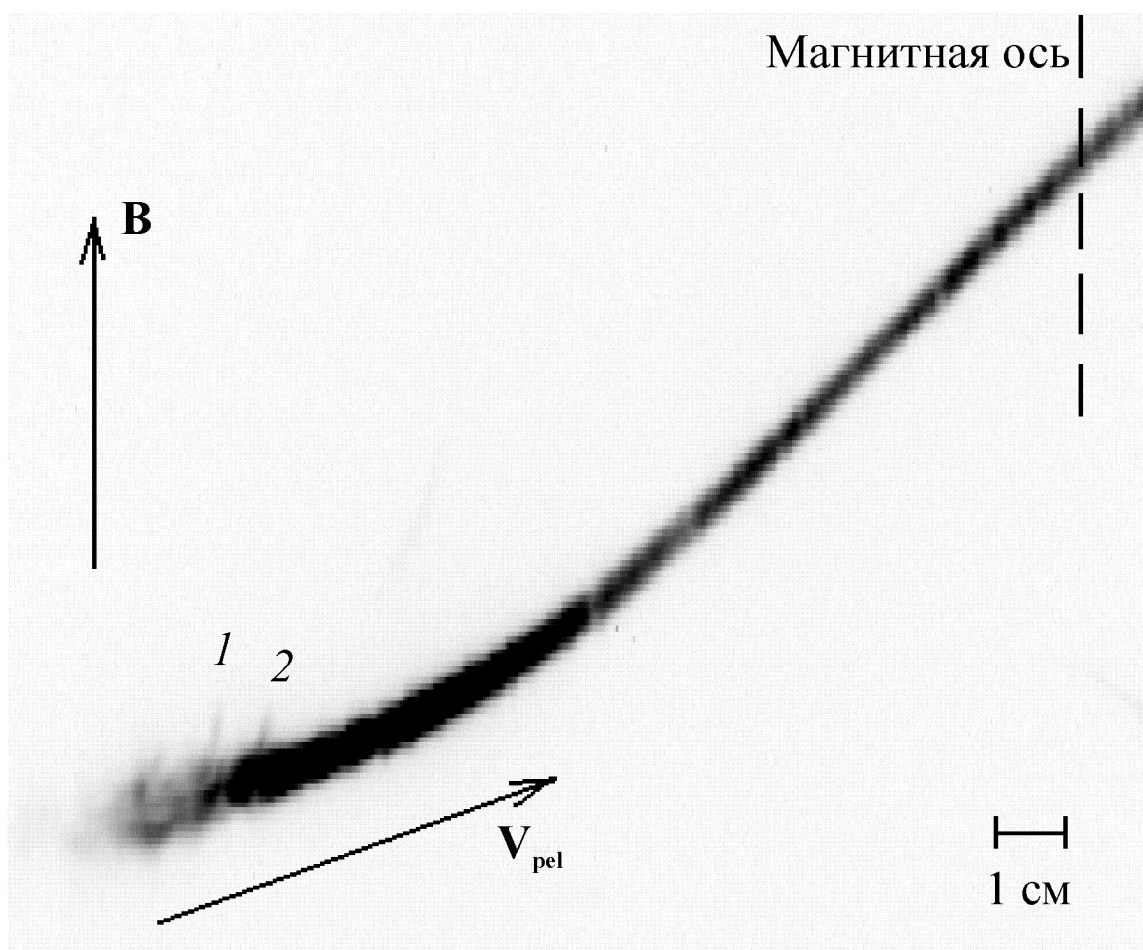


Рис. 3.9. Интегральная фотография трека макрочастицы с эмиссией крупинки в разряде 41018 (вверху); профили n_e , T_e и теплового потока Q вдоль траектории. Параметры разряда: $n_e(0) = 7.9 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $T_e(0) = 450 \text{ эВ}$, $P_{\text{NBI}} = 1.75 \text{ МВт}$, $P_{\text{ICRH}} = 0.1 \text{ МВт}$, $d_{\text{pel}} = 0.41 \text{ мм}$, $V_{\text{pel}} = 300 \text{ м/с}$.

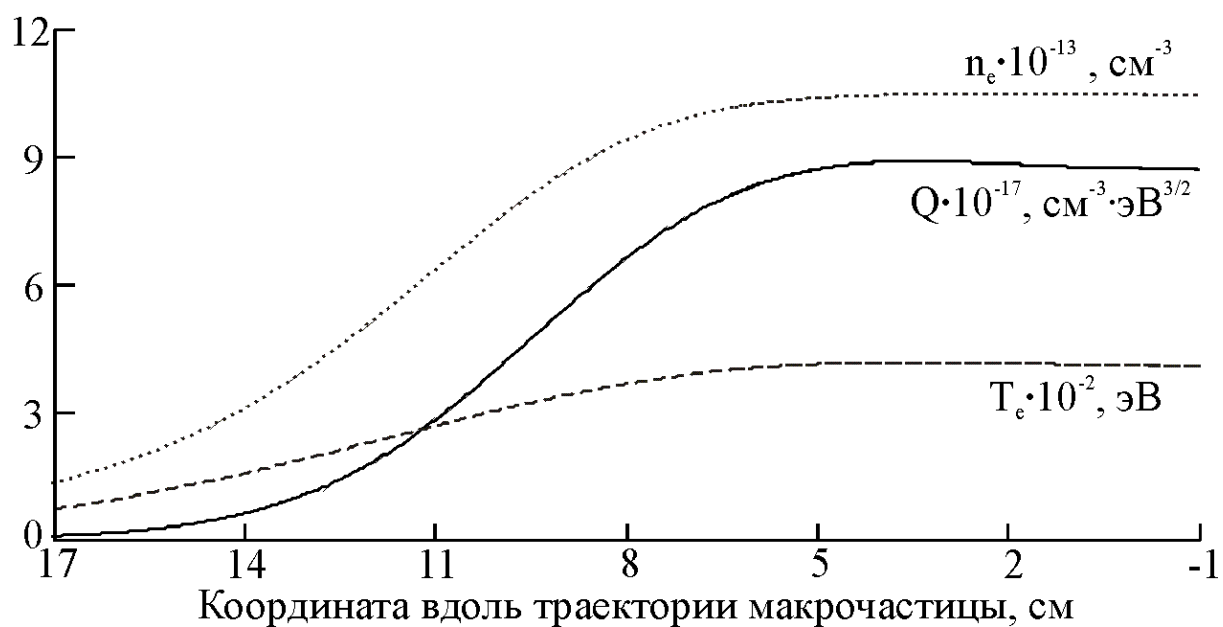
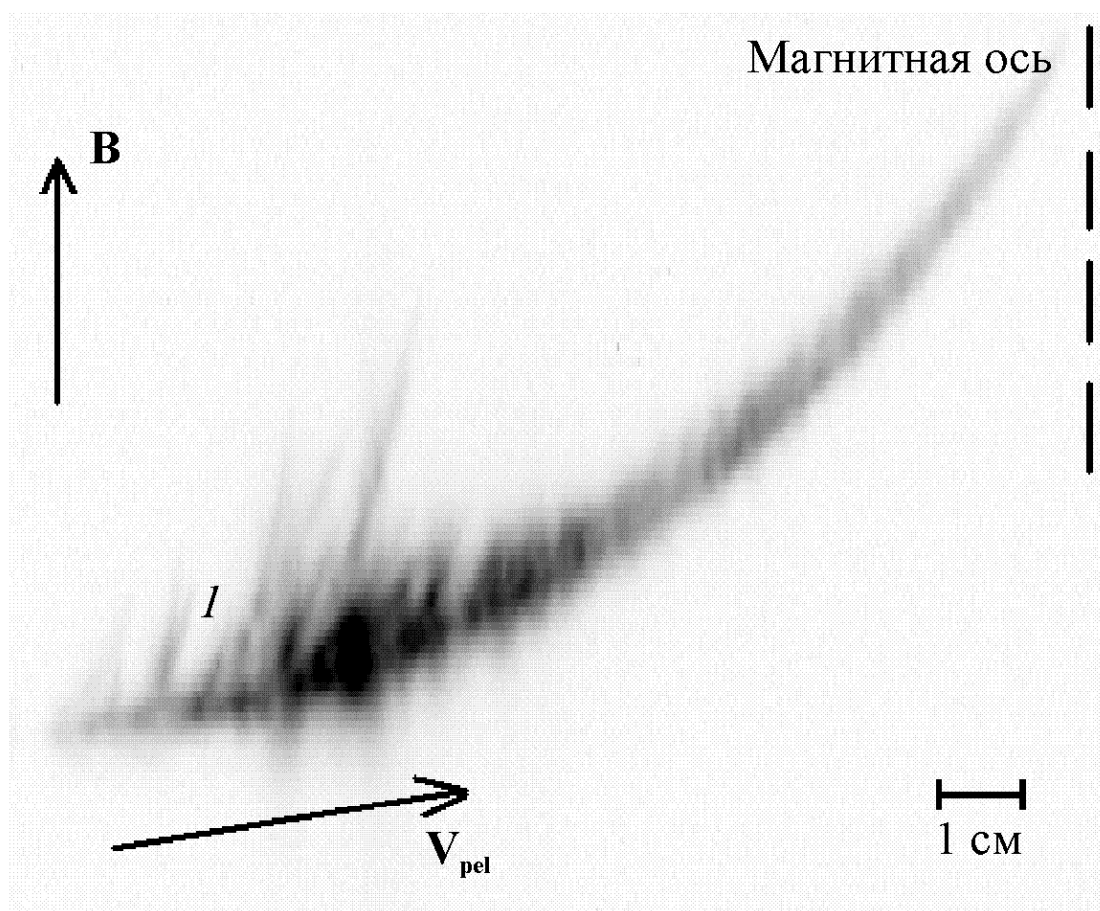


Рис. 3.10. Интегральная фотография трека макрочастицы с эмиссией крупинок в разряде 41019 (вверху); профили n_e , T_e и теплового потока Q вдоль траектории. Параметры разряда: $n_e(0) = 10.5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $T_e(0) = 400 \text{ эВ}$, $P_{\text{NBI}} = 1.75 \text{ МВт}$, $P_{\text{ICRH}} = 0.2 \text{ МВт}$, $d_{\text{pel}} = 0.35 \text{ мм}$, $V_{\text{pel}} = 260 \text{ м/с}$.

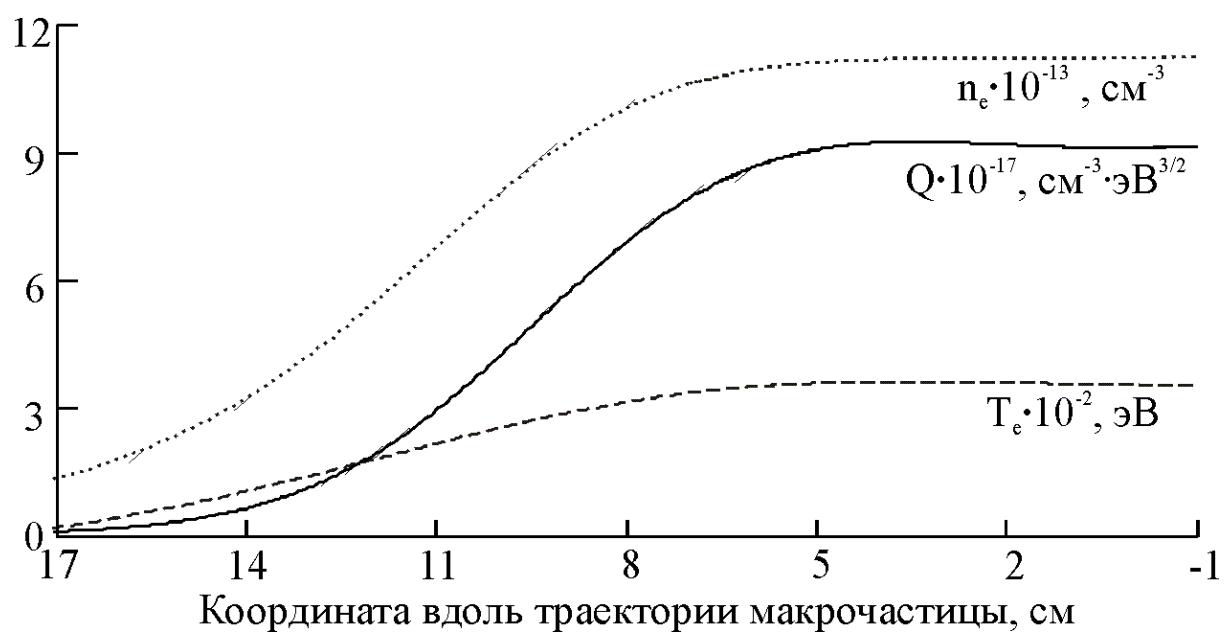
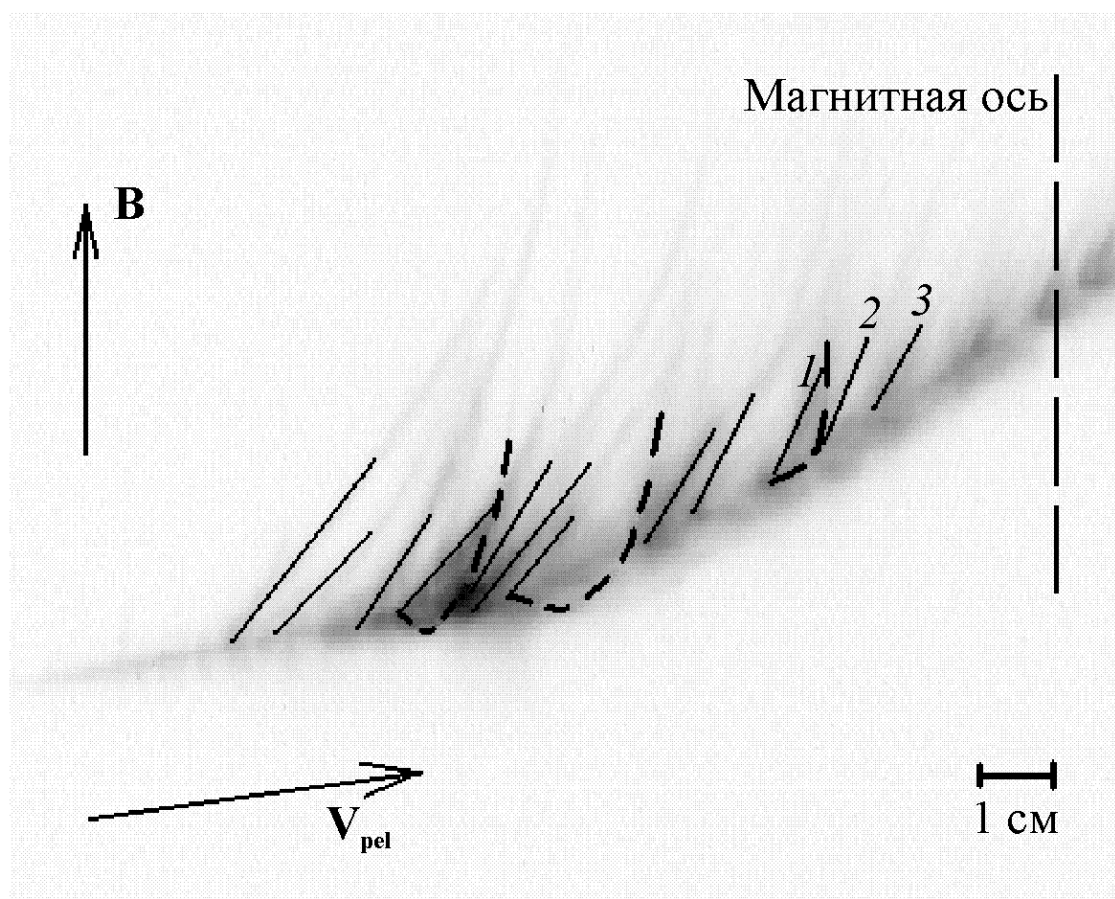


Рис. 3.11. Интегральная фотография трека макрочастицы с эмиссией крупинки в разряде 41025 (вверху); профили n_e , T_e и теплового потока Q вдоль траектории. Параметры разряда: $n_e(0) = 11.5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $T_e(0) = 300 \text{ эВ}$, $P_{\text{NBI}} = 1.75 \text{ МВт}$, $P_{\text{ICRH}} = 0.5 \text{ МВт}$, $d_{\text{pel}} = 0.35 \text{ мм}$, $V_{\text{pel}} = 280 \text{ м/с}$.

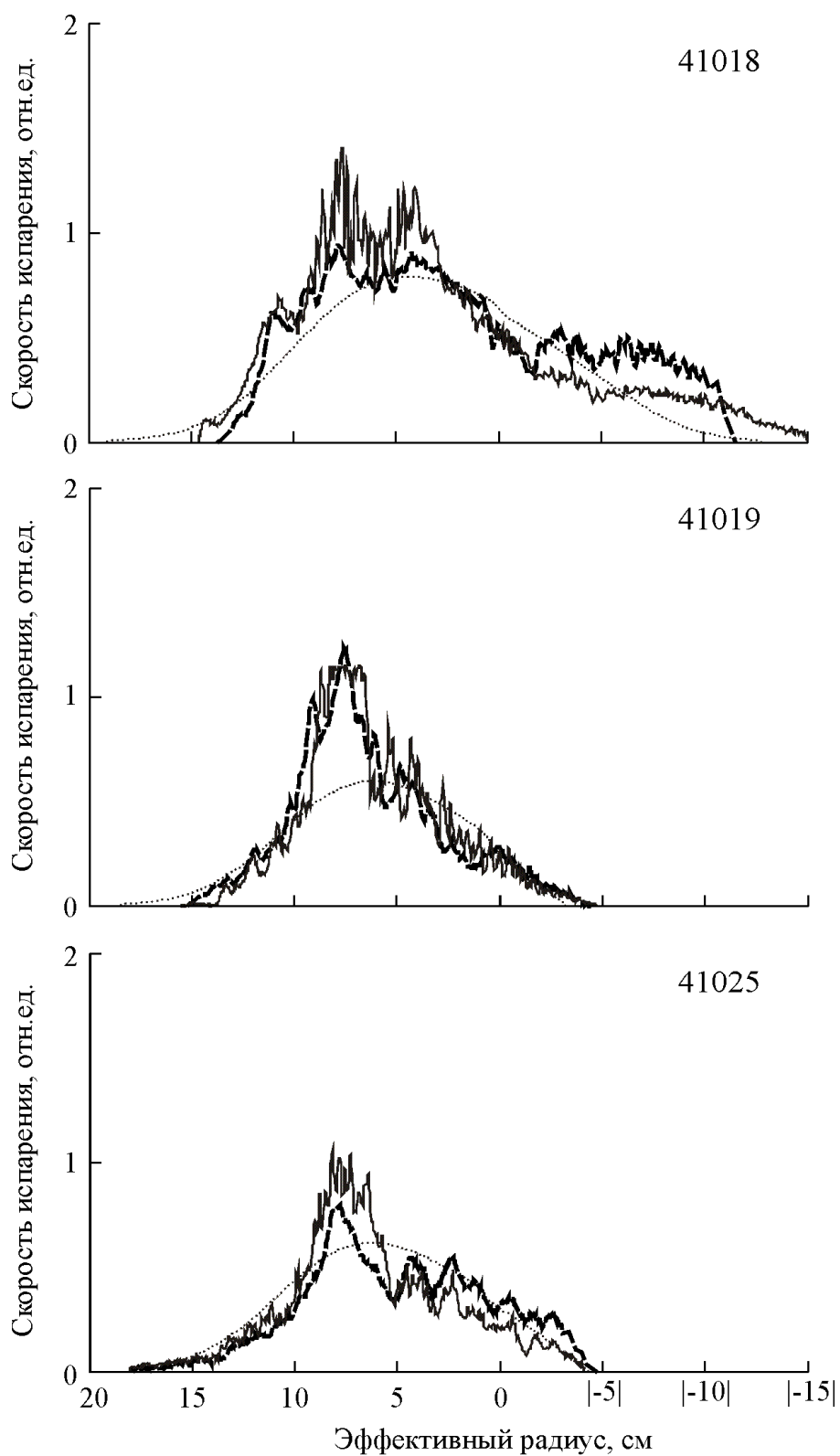


Рис. 3.12. Профили скорости испарения для разрядов 41018, 41019, 41025. На основе экспериментальных данных: сплошная ломаная — по ШОД, штриховая — интегрированный вдоль силовых линий магнитного поля снимок ССД. Тонкая пунктирная линия — расчет по модели нейтрального экранирования.

Характерные снимки CCD-камеры, иллюстрирующие эмиссию крупинок во время испарения основной макрочастицы, представлены в верхних частях Рис. 3.9. - Рис. 3.11. Направление инжекции обозначено на них стрелкой примерно слева направо, также вертикальной стрелкой изображено направление магнитного поля, штриховой линией – положение магнитной оси. Кривые, отходящие от основного трека макрочастицы, являются траекториями эмитируемых макрочастицей крупинок. Можно отметить, что в случае разряда 41018 (Рис. 3.9.) эмиссия происходит только на начальной стадии испарения. В нижних частях рисунков изображены профили плотности, электронной температуры и потока тепла вдоль траектории макрочастиц.

На Рис. 3.12. приведено сравнение радиальных профилей скорости испарения, полученных на основе экспериментальных данных (методом интегрирования снимка CCD вдоль магнитных поверхностей, а также привязкой сигнала с фотодиода к пространству по известной скорости макрочастицы), с рассчитанными по модели нейтрального экранирования [9]. Если сравнивать этот тип испарения с классификацией, введенной в работах [109] и [118], то можно отметить, что он относится к типу повышенного испарения. Однако в указанных работах на снимках CCD эффекта эжекции крупинок не наблюдалось. Кроме того, тип повышенного испарения, который описывался в работе [118], был обнаружен в условиях низкой электронной плотности, способствующей развитию локализованных надтепловых электронов. Описанные же здесь наблюдения производились в условиях высокой плотности, когда формирование пучков быстрых электронов затруднено. Таким образом, эта новая мода испарения с испусканием крупинок может быть выделена только с использованием снимков процесса испарения.

Видно, что, как сигнал фотодиода, так и данные, полученные из интегрирования снимка CCD, показывают значительную модуляцию сигнала излучения на линии СII вдоль траектории макрочастицы, особенно в разряде 41019. Такая повышенная модуляция может быть связана в данном случае с эмиссией «микропеллетов», за счет чего растет эффективная поверхность испарения.

Необходимо отметить, что описываемое явление наблюдалось только в разрядах с нагревом пучком нейтральных атомов в условиях высокой плотности плазмы и относительно низкой электронной температуры. К сожалению, инжекции углеродных макрочастиц в подобные разряды производились довольно редко, и из-за недостатка статистики сложно установить однозначно, какой именно параметр плазмы ответственен за эффект. Возможная причина – это условия комбинированного нагрева

NBI и ICRH, в результате чего 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 крупинок.

Быстрые ионы могут существовать внутри всего сечения плазмы. Заметная на Рис. 3.9. и Рис. 3.10. повышенная концентрация крупинок на периферии может быть объяснена тем фактом, что когда основная макрочастица проникает в область плазмы с более высокой электронной температурой T_e , скорость испарения $\dot{N}(r)$ возрастает. При этом испаряющаяся крупинка не успевает до своего полного испарения отлететь от исходной на расстояние, достаточное для ее регистрации на фоне основной макрочастицы. Таким образом, их треки могут лежать внутри облака исходной макрочастицы и являться нераспознаваемыми на снимке CCD.

3.2.2 Моделирование испарения с эмиссией «микропеллетов».

Так как ни скорость, ни размеры эмитируемых в процессе испарения с поверхности макрочастицы крупинок нельзя измерить непосредственно, то были разработаны методы оценки этих величин с использованием моделирования на основе профилей температуры и плотности плазмы, а также привязанных к пространству и времени данных об интенсивности излучения из плазмы на линии CII. В следующих двух параграфах обсуждаются методики оценок и полученные результаты.

3.2.2.1 Оценка скоростей крупинок.

Скорости микропеллетов рассчитывались с учетом предположения о том, что они покидают поверхность макрочастицы в направлении, нормальном к ее траектории в плоскости снимка (см. Рис. 3.9. - Рис. 3.11.). Из-за этого скорости могут быть недооценены. Наиболее детализованное исследование было выполнено для разряда 41025 (Рис. 3.11.), так как снимок его содержит максимальное количество распознаваемых треков крупинок. Было изучено угловое распределение для 12 направленных вверх треков (верхняя часть Рис. 3.11., обработанные треки показаны сплошными линиями). Большинство из них расположены под 30-40° к направлению исходной макрочастицы. Полученная отсюда и представленная на Рис. 3.13.

гистограмма соответствующих скоростей показывает, что наиболее вероятные нормальные скорости крупинки лежат в пределах 150÷250 м/с.

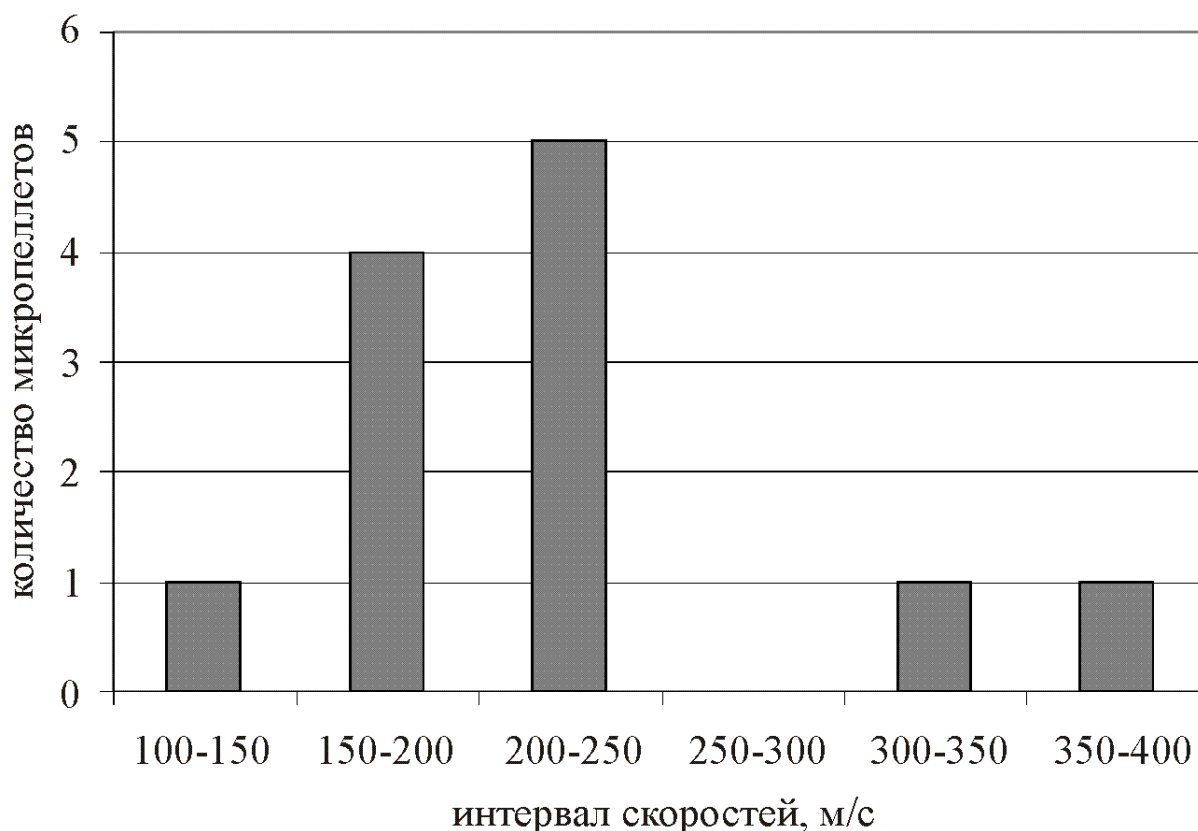


Рис. 3.13. Гистограмма распределения нормальных скоростей микропеллетов в разряде 41025.

Можно заметить, что от макрочастицы крупинки отделяются не только «вверх» в плоскости рисунка. Внимательно рассматривая снимок, удалось обнаружить некоторое количество треков, которые изначально были направлены «вниз» от поверхности макрочастицы; затем их треки также изгибаются вверх (Рис. 3.11., штриховые линии). Из этого наблюдения можно сделать вывод о том, что существует некая сила, которая изгибает «вверх» траектории как макрочастицы, так и микропеллетов. Она замедляет крупинки, которые эмитируются «вниз», и ускоряет их в верхнем направлении. К сожалению, разрешение снимков все же недостаточно для детального исследования параметров микропеллетов, эмитируемых «вниз», из-за наложения треков.

Представленная ниже Таблица 3.1. иллюстрирует данные о скоростях крупинки в разрядах 41018, 41019 и 41025.

Таблица 3.1. Оценки скорости микропеллетов.

Номер разряда	V_{pel} , м/с	Полное число микропеллетов	Число изученных микропеллетов	Испущены «вверх»	Средний угол рассеяния, °	Средняя скорость V_0 , нормальная к треку макрочастицы
41018	300	3	3	3	41.3	270
41019	260	11	5	11	55.1	385
41025	280	≥ 23	13	≥ 16	37.1	220

Необходимо также отметить, что оцененные скорости углеродных крупинки близки к значениям (240-260 м/с), предсказываемым моделью хрупкого разрушения углерода [125]:

$$V_0 = \alpha T \xi c$$

где $\alpha = 2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ – фактор теплового расширения углерода, $T = 4000\text{-}4500 \text{ K}$ – температура поверхности углерода [9], $\xi \approx 1$ – доля зажатого объема зерна углерода, $c = 3 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ – скорость звука в углероде.

Изогнутые траектории, аналогичные показанным на Рис. 3.9. - Рис. 3.11., наблюдались также в экспериментах, когда примесные макрочастицы инжектировались в установку CHS с нагревом пучком нейтральных атомов [126]. В этой работе было высказано предположение, что испарение макрочастиц подвергается сильному влиянию быстрых ионов из-за несимметричного нагрева. Относительно рассматриваемого в данном разделе случая тоже необходимо сделать некоторые замечания относительно эффективности NBI. Пучки нейтральных атомов здесь вводились с помощью двух инжекторов (ко- и контр- по отношению к направлению магнитного поля), показанных на Рис. 2.14. Мощность каждого из них составляла $0.8 \cdot 10^6 \text{ Вт}$. При этом ожидается различная эффективность поглощения плазмой вносимой ими энергии. Инжектор в направлении положительного магнитного поля (контр-инжектор) имеет меньшую эффективность, так как значительное число орбит вносимых быстрых частиц покидает плазму. Инжектор, направленный противоположно магнитному полю (ко-инжектор) высаживает мощность полностью. Таким образом, не стоит ожидать полного баланса потоков энергии на макрочастицу даже в случае одинаковых выходных мощностей источников NBI. Это может вести к неоднородному

испарению макрочастицы и к ее ускорению в тороидальном направлении. Следовательно, можно сделать вывод о том, что изгиб траекторий происходит из-за реактивного ускорения макрочастицы и микропеллетов при несимметричном нагреве.

3.2.2.2 Оценка размеров крупинок.

Было предложено два метода оценки размера микропеллетов. В первом размер рассчитывался, исходя из отношения интегральной интенсивности излучения из облака, создаваемого конкретной крупинкой, к интегральной интенсивности излучения из облака исходной макрочастицы в целом. При этом необходимо отметить, что размер каждой инжесктированной макрочастицы известен заранее по результатам прямых измерений перед зарядкой в ДИМ-6 (см. 2.1.3.3.). Во втором методе размер микропеллетов получался, исходя из сравнения длины их наблюдаемых треков с расчетами по модели нейтрального испарения [9], в которых размер является входным параметром.

Таблица 3.2. Оценки радиусов микропеллетов. Метод оценки: 1 – по интегральному излучению, 2 – по глубине проникновения микропеллета.

Номер разряда	Номер микропеллета	$n_e(\rho)$, 10^{13} см^{-3}	$T_e(\rho)$, эВ	Метод оценки	Радиус микропеллета, 10^{-4} см
41018 (Рис. 3.9.)	1	2.7	220	1	32.9
41018 (Рис. 3.9.)	2	4.1	270	1	22.0
41019 (Рис. 3.10.)	1	3.8	190	1	33.2
41025 (Рис. 3.11.)	1	12	310	2	38.1
41025 (Рис. 3.11.)	2	12	310	1	40.2
41025 (Рис. 3.11.)	2	12	310	2	48.0
41025 (Рис. 3.11.)	3	12	310	2	37.2

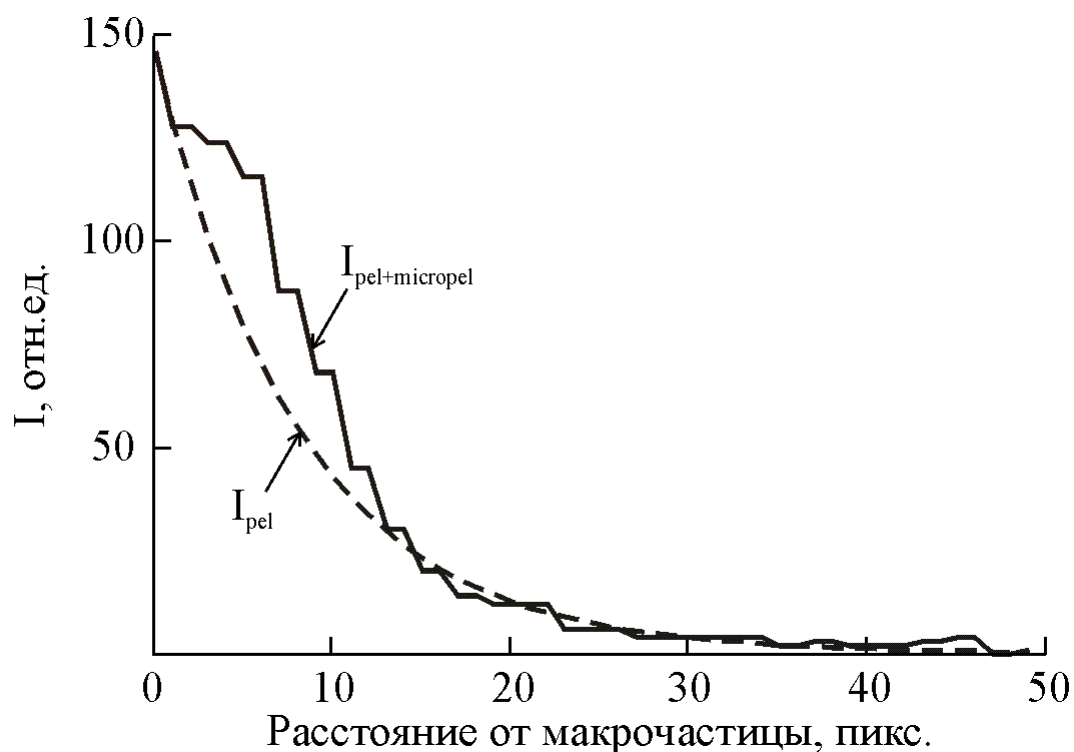


Рис. 3.14. Методика определения интенсивности излучения микропеллета $I_{micropel}$ на фоне основной макрочастицы. Сплошная линия – излучение микропеллета в сумме с излучением основной макрочастицы $I_{pel+micropel}$, штриховая – аппроксимация излучения основной макрочастицы I_{pel} .

а) Отношение интегральных интенсивностей излучения.

Исследование интенсивностей излучения было выполнено для крупинки под номерами 1 и 2 на Рис. 3.9. (разряд 41018), номер 1 на Рис. 3.10. (разряд 41019), и номер 2 на Рис. 3.11. (разряд 41025), Таблица 3.2. суммирует основные параметры оценки. Треки этих микропеллетов проходят достаточно далеко от соседних, так удастся избежать возможных дополнительных погрешностей из-за наложения. Благодаря этому удастся выделить излучение крупинки из излучения основной макрочастицы. Как уже упоминалось в предыдущих параграфах, в работе [109] было продемонстрировано, что интегральная по облаку интенсивность излучения I испаряющейся макрочастицы пропорциональна скорости ее испарения $\dot{N}(r)$. Следовательно, интегральная интенсивность излучения из облака пропорциональна полному количеству атомов в макрочастице. Из попиксельного анализа снимков CCD-камеры, приведенных на Рис. 3.9. - Рис. 3.11., можно определить интегральную интенсивность как излучения из облака основной макрочастицы, I_{pel} , так и отдельных микропеллетов $I_{micropel}$.

соответственно. Суммарное количество атомов $N_{pel+micropel}$ в исходной макрочастице определяется из ее заранее измеренного диаметра по плотности материала $\rho = 0.9 \text{ г/см}^3$. Таким образом, количество атомов в крупинке может быть оценено с помощью формулы

$$N_{micropel} = \frac{\int I_{micropel}}{\int I_{pel+micropel}} N_{pel+micropel}$$

Треки микропеллетов в своем начале выходят из области, где излучение облака исходной макрочастицы весьма интенсивно (Рис. 3.14.). Излучение крупинок получается вычитанием фонового излучения основной макрочастицы из полного излучения $I_{pel+micropel}$. Для этого тороидальное распределение облака макрочастицы I_{pel} аппроксимируется экспоненциальной функцией в соответствии с экспериментальными данными [127] (штриховая кривая на Рис. 3.14.). Таблица 3.2. суммирует результаты по рассчитанным радиусам микропеллетов. Приведенные данные показывают, что объемы отделяющихся крупинок составляют 0.15-1.2% от исходного объема макрочастицы до инъекции. Точность этих оценок составляет ~100% из-за трудности выделения слабого микропеллетного излучения из суммарного излучения основной макрочастицы и крупинок.

б) Моделирование глубин проникновения с помощью модели нейтрального экранирования.

Размер микропеллетов может быть оценен и другим методом: с помощью сопоставления их глубин проникновения в плазму, измеренных на эксперименте, с рассчитанными на основе модели нейтрального экранирования. Для моделирования испарения крупинки необходимо задать параметры плазмы вдоль ее траектории. К сожалению, в разрядах 41018 – 41025 данных недостаточно для того, чтобы точно рассчитать траекторию микропеллетов. Поэтому испарение рассчитывалось в предположении постоянных $n_e(\rho)$ и $T_e(\rho)$, соответствующих эффективному радиусу начала испарения крупинки $\rho = \rho_{micropel}$. Было выполнено моделирование испарения микропеллетов, отмеченных цифрами 1-3 на Рис. 3.11., для которых это предположение выполняется наилучшим образом. В расчете использовались следующие параметры: $n_e(\rho) = (1.1 \div 1.2) \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $T_e(\rho) = 300 \text{ эВ}$. Измеренные по снимку длины треков составляли от 2.1 до 3.0 см. Моделирование с целью получения таких же глубин проникновения дает радиусы крупинок в диапазоне 37-48 мкм (Таблица 3.2.). Точность выполненных оценок не очень высока (~50%) из-за приведенного выше предположения

о постоянстве параметров плазмы вдоль траекторий микропеллетов. Тем не менее, полученные размеры крупинок достаточно хорошо соответствуют оцененным по отношению интегральных интенсивностей излучения.

3.2.3 Обсуждение результатов.

В режимах стелларатора Wendelstein 7-AS с большой электронной плотностью и мощным пучковым нагревом плазмы был открыт новый тип испарения углеродных макрочастиц – с эмиссией крупинок (микропеллетов). Они эмитируются с поверхности основной макрочастицы в среднем под углом около 45° . Компонента скорости крупинок, нормальная к траектории основной макрочастицы, лежит в диапазоне 220-385 м/с, что хорошо соответствует оценкам из теоретической модели для скорости фрагментов графита, выходящих с твердой поверхности углерода при тепловом ударе.

Для радиусов крупинок, оцененных из отношения интегральных интенсивностей излучения, были получены значения около 20-40 мкм. Измеренные из интегральных фотографий глубины проникновения микропеллетов позволяют оценить их размеры как 35-50 мкм. Полученные размеры крупинок соответствуют значениям крупной фракции частиц, наблюдения которых приведены в работе [125]. Очевидно, что мелкая (микронная) фракция, которая упоминается в той же работе, не может быть задетектирована методом фотографии, так как такие крупинки испарились бы прежде, чем успели бы покинуть облако основной макрочастицы.

Обнаружена однонаправленная сила, ускоряющая как основную макрочастицу, так и микропеллеты вдоль магнитного поля. Ускорение микропеллетов выражено более явно из-за того, что их масса меньше. Было предложено объяснение наблюдаемого явления, предполагающее появление реактивного ускорения из-за несимметричного испарения поверхности примесных частиц несбалансированными пучками быстрых ионов.

4. Управление разрядом методом инъекции лития.

Как уже упоминалось выше, пылевая струя выглядит одним из наиболее перспективных методов внесения лития в плазму. Однако исторически первые попытки использования лития для кондиционирования разряда T-10 производились методом инъекции литиевых макрочастиц, описанных в параграфе 2.1.3.3., с помощью инжектора ДИМ-6, описанного в подразделе 2.1.3.1. данной работы. Результаты, полученные с помощью этой методики, представлены в разделе 4.1. данной главы. Затем предпринимались попытки (см. [45]) вводить в плазму струю расплавленного лития с помощью поршневого инжектора литиевой струи [112], оказавшиеся малорезультативными из-за трудностей в регулировании вносимого данным устройством потока вещества. Наконец, для решения проблемы достаточно равномерного и управляемого внесения лития в плазму был разработан и изготовлен система инъекции металлической литиевой пыли, представленная в подразделе 2.1.4., результаты использования которой приведены в остальных разделах данной главы. Эксперименты производились с помощью литиевых металлических пылевых частиц в виде шариков диаметром в среднем около 40 мкм в пассивирующей оболочке (Stabilized Metallic Lithium Powder, SMLPTM) [113], описанных в параграфе 2.1.5.1.

4.1 Инжекция литиевых макрочастиц в плазму токамака T-10.

Так как технология инъекции твердотельных примесных макрочастиц была уже отработана на токамаке T-10, а эксперименты по внесению лития таким методом на некоторых установках привела к положительным результатам в части снижения содержания углерода и снижения рециклинга рабочего газа (TFTR – [3], RFX-mod – [94]), то было принято решение повторить их в условиях T-10, обладающего углеродным лимитером, и работающем в условиях «коэффициента рециклинга» водорода, близкого к единице [57]. Необходимость снижения рециклинга связана с нарушением управляемости параметрами разряда, особенно плотностью, так как вклад в плотность за счет выхода с элементов первой стенки может значительно превышать вклад от штатного газонапуска.

В экспериментах цилиндрические 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,

ускорялись в направлении центра плазмы. За счет того, что диаметр макрочастицы был близок к диаметру ствола, ускорение происходило более эффективно, чем в описанных в предыдущих разделах случаях, и скорость макрочастиц достигала значений до 650 м/с. Теоретическое обоснование этого наблюдения описано в работе [23]. Инжекция производилась в режим с омическим и дополнительным ЭЦ-нагревом со следующими основными параметрами: $\langle n_e \rangle = 3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $I_p = 270 \text{ кА}$, $B_t = 2.4 \text{ Тл}$, $P_{ECRH} = 800 \text{ кВт}$, $T_e(0) = 1300 \text{ эВ}$. Радиальные профили скорости испарения описываемых литиевых макрочастиц в соответствии со скейлингом Паркса [10] (жирная штриховая линия) и моделью нейтрального экранирования [9] (жирная сплошная линия) для таких параметрах плазмы приведены на Рис. 4.1. При моделировании макрочастицы проникали почти до центра, причем максимум их испарения, и, соответственно, высаживания испаренного вещества, ожидался в области около 12-15 см, то есть на половине малого радиуса. Приведенный расчет был выполнен для условий разряда 42316, поэтому на том же рисунке показано и сопоставление с экспериментально измеренным излучением из плазмы при инжекции (тонкая линия). Очевидно, что, несмотря на повышенный характер испарения в области середины малого радиуса, область максимального высаживания лития в плазму остается прежней.

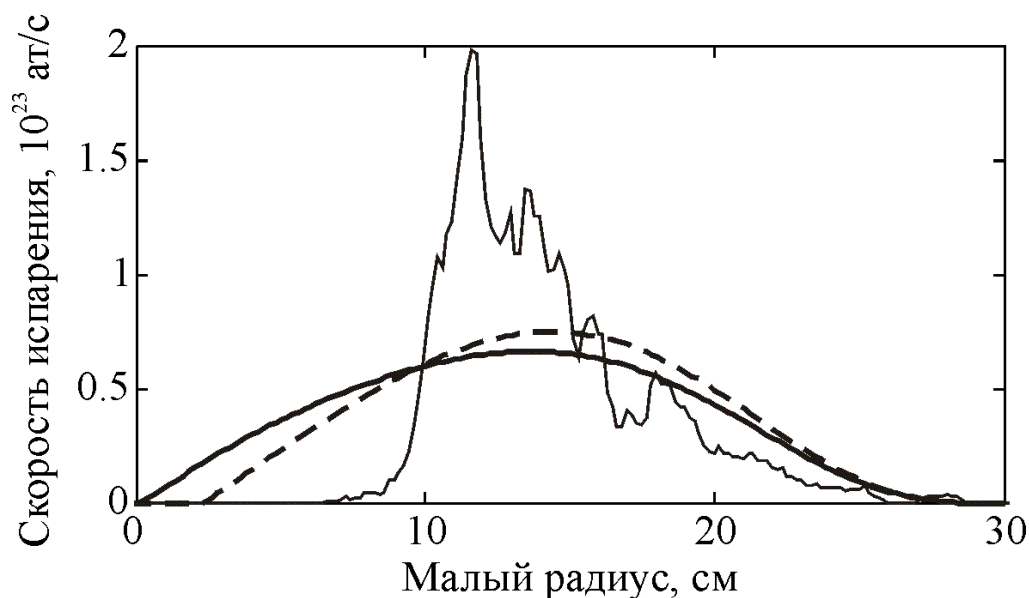


Рис. 4.1. Расчет скорости испарения литиевой макрочастицы в Т-10 при означенных выше параметрах плазмы. Жирная штриховая линия — скейлинг Паркса, жирная сплошная — модель нейтрального экранирования, тонкая линия — расчет на основании излучения из плазмы.

Несмотря на то, что литий вносился в достаточно удаленную от периферийных областей плазмы зону, ожидалось, что в результате инъекции будет произведена литиизация обращенных к плазме поверхностей. В качестве них можно было рассматривать либо всю площадь первой стенки Т-10, либо один лишь только углеродный лимитер. В первом случае для покрытия площади первой стенки моноатомным слоем потребуется $2.5 \cdot 10^{20}$ атомов Li, что более чем в 10 раз превышает содержание их в одиночной макрочастице. С другой стороны, прямой контакт у высокотемпературной плазмы Т-10 имеется лишь с поверхностью лимитера, площадь которой можно покрыть в один слой, затратив лишь около 10^{18} атомов. В случае преимущественного высаживания лития, покидающих последнюю замкнутую магнитную поверхность плазмы, на лимитер, можно было ожидать проявления желательных признаков кондиционирования. Ожидалось, что результат литиизации лимитера может накапливаться от разряда к разряду [91].

4.1.1 Результаты экспериментов по инъекции литиевых макрочастиц.

В ходе экспериментов инъекция литиевых макрочастиц производилась на 600 мс разряда, через 100 мс после включения гиротронов. Непосредственно перед моментом инъекции производилось отключение клапана газонапуска, что было необходимо 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) (см. параграф 4.1.2.). Кроме того, для уменьшения воздействия плазмы на лимитер при подобном срыве характерном для Т-10 выключении разряда была задействована методика управляемого спада тока, при которой распад плотности в конце импульса происходил примерно за 150 мс, при значении не более 100 мс для стандартных режимов. Была выполнена последовательность из 4 литиевых инъекций (импульсы 42313, 42315, 42316, 42317). Перед началом серии был снят реперный разряд 42312 без лития для фиксации режима до литиизации. После проведения серии также проводилось отслеживание продолжительности воздействия лития на параметры разряда в импульсах 42318, 42319, 42320. В импульсе 42314 плазмы не было из-за технического сбоя Т-10. В разряде 42318 мощность ЭЦР нагрева составляла 300 кВт из-за отказа части гиротронного комплекса.

Эволюция основных параметров плазмы для серии экспериментов приведена на Рис. 4.2., где реперный разряд 42312 показан черным цветом, разряд с инжекцией 42317 – красным, второй импульс после серии 42319 – зеленым. Первый импульс после серии инъекций 42318, в котором мощность ЭЦРН отличалась от прочих разрядов, сравнивать с остальными затруднительно, поэтому на рисунке он не приведен. В разряде 42320 параметры оказались весьма близкими к 42319, поэтому он на данной иллюстрации также показан не был. Эволюция электронной плотности в разряде 42317 восстановлена после перескока интерферометра при мощной инжекции лития, исходя из известного количества внесенного вещества. Эволюция электронной температуры приводится для середины малого радиуса, что соответствует области максимума испарения (и, соответственно, высаживания испаренного вещества) для макрочастиц данных параметров. В реперном разряде 42312 диагностика электронной температуры не функционировала. Регистрация излучения на линии лития в данной серии производилась только в сечении инжекции и в связи со значительным всплеском интенсивности при испарении макрочастицы была намеренно загроблена, что не позволило провести сопоставление изменения уровня сигнала в реперных разрядах до и после инжекции.

Из приведенных на рисунке зависимостей можно отметить, что сильное воздействие лития на плазму наблюдается лишь в течение первых 30-50 мс после инжекции, производившейся на 600 мс. При этом одновременно с ростом плотности, напряжения обхода (b) и излучения в непрерывном спектре (f) при провале температуры (g) снижаются интенсивности излучения как основной примеси – углерода (c), так и рабочего газа (e). После этого примерно к 700 мс разряда значения выходят на стационарный уровень, близкий к исходному, можно лишь отметить небольшое снижение плотности плазмы, а также излучения на линиях дейтерия и углерода, а также континуума. Температура как на середине малого радиуса (g), так и на всех остальных радиусах стабилизируется на значениях незначительно (10%) ниже исходного уровня. Также можно отметить, что при задействованных в данном эксперименте параметрах плазмы инжекция литиевых макрочастиц не приводила к раскачке мощных МГД-возмущений, что видно из графика (h) Рис. 4.2.

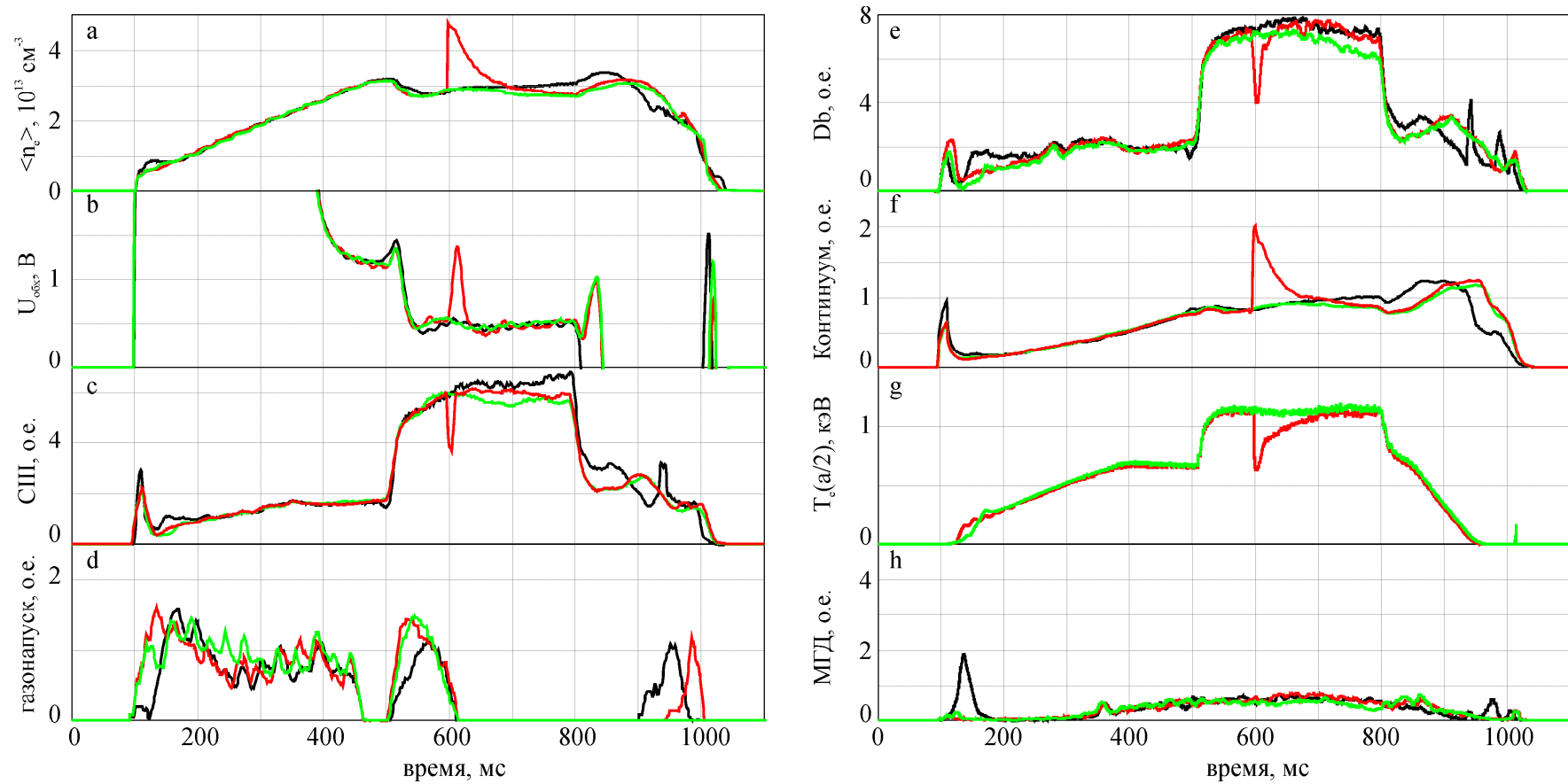


Рис. 4.2. Эволюция основных параметров разряда Т-10 при серии инъекций литиевых макрочастиц в плазму с ЭЦРН (500-800 мс). Черный – реперный разряд 42312 до начала серии инъекции лития; красный – разряд 42317 (один из разрядов с инъекцией); зеленый – разряд 42319 (второй после серии инъекций). Здесь (а) – среднечордовая плотность, (б) – напряжение обхода, (с) – излучение на линии углерода в сечении лимитера, (д) – газонапуск в разряд, (е) – излучение на линии дейтерия в сечении лимитера, (ф) – излучение в непрерывном спектре, (г) – электронная температура по данным ЭЦИ, соответствующая середине малого радиуса, (h) – сигнал с магнитных зондов.

4.1.2 Обсуждение результатов инъекции литиевых макрочастиц.

Прежде всего, необходимо отметить, что значительного кумулятивного эффекта (накопления лития на обращенных к плазме поверхностям) не наблюдалось. В разряде 42319 после серии инъекций параметры оказываются близкими к таковым до проведения серии. Лишь характер поведения электронной плотности дает возможность заметить небольшой положительный эффект в виде связывания частиц рабочего газа – дейтерия. Подробнее он будет обсуждаться ниже в данном параграфе.

Небольшой наблюдаемый эффект на сигналах излучения углерода (с) и континуума (f) после инъекции, по-видимому, связан с изменением поведения плотности после литиизации. Это наблюдение можно попытаться обосновать следующим образом. Интенсивность излучения континуума, которое определяется за счет электрон-ионных столкновений и рекомбинации, пропорциональна квадрату плотности. В условиях коронального равновесия интенсивность излучения на линии примеси будет пропорциональна плотности. Поэтому, если сопоставить интенсивность излучения углерода с эволюцией плотности, а интенсивность континуума с квадратом плотности, можно качественно оценить, какой вклад дает в наблюдаемое снижение сигналов откачка литием водорода, а какой – связывание углерода.

Полученные результаты представлены на Рис. 4.3. Во избежание влияния переходных процессов рассматривается квазистационарная стадия разряда с работающими гиротронами с 550 по 800 мс. Верхняя часть рисунка сопоставляет I_{CIII} с плотностью, нижняя – I_{cont} с квадратом плотности, эволюция плотности представлена тонкими линиями, излучение – жирными. Разные разряды показаны разными цветами по той же схеме, что и на Рис. 4.2. Для удобства сопоставления сигналы по оси ординат приведены в относительных единицах.

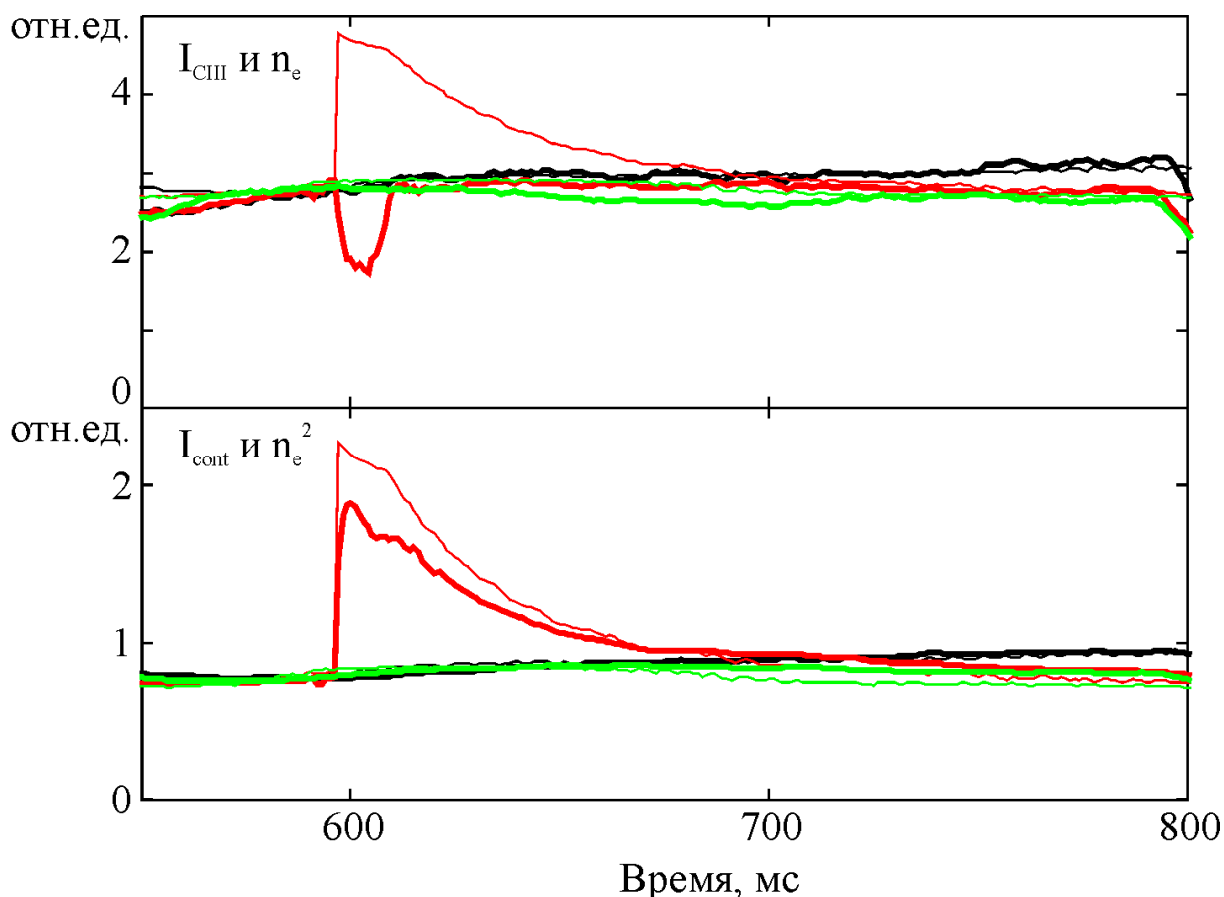


Рис. 4.3. Вверху: эволюция излучения на линии СIII (жирные линии) в сравнении с плотностью (тонкие линии). Внизу: эволюция излучения непрерывного спектра (жирные линии) в сравнении с квадратом плотности (тонкие линии). Черный – реперный разряд 42312 (до начала серии инъекции лития); красный – разряд 42317 (один из разрядов с инъекцией); зеленый – разряд 42319 (после серии инъекций).

На приведенном рисунке можно выделить два временных масштаба. На протяжении первых 20 мс после инъекции в разряде 42317 наблюдается некоторое проседание излучения на линии СIII, что может быть связано с инъекцией. На большем временном масштабе для данной последовательности разрядов только лишь эволюция плотности объясняет изменения в сигналах излучения углерода и континуума, а эволюцию содержания ионов углерода для описания сигнала I_{CIII} привлекать нет необходимости. В связи с этим можно предположить, что литий на захват углерода в данном случае значительного влияния не оказывает, что в некоторой степени противоречит результатам, полученным при инъекции литиевых макрочастиц на таких установках, как TFTR [91] и RFX-mod [94]. Качественно можно сказать, что попытка управления разрядом T-10 методом инъекции литиевых макрочастиц приводит к

уменьшению рециклинга рабочего газа, но содержание углерода видимых изменений не претерпевает.

С другой стороны, из приведенных выше результатов инъекции литиевых макрочастиц в плазму токамака T-10 все же можно количественно оценить некоторые эффекты, указывающие на уменьшение рециклинга дейтерия. Во-первых, необходимо обратить внимание на поведение плотности в разрядах после инъекции и до нее, в промежутке времени между 600 и 800 мс, когда газонапуск принудительно отключался, и плотность поддерживалась только за счет рециклинга (см. Рис. 4.2. (а) и (d)). Очевидно, что в разряде 42312, где в данном отрезке времени наблюдался рост плотности за счет выхода атомов с элементов камеры токамака, коэффициент R_D оказывается больше единицы. Подбирая экспоненту, описывающую эволюцию плотности на данном участке, можно оценить R_D как 1.01. Но после серии инъекций литиевых макрочастиц плотность в первом калибровочном разряде без инъекции 42318 после выключения газонапуска начинает слегка понижаться из-за распада плазмы, что свидетельствует о снижении коэффициента R_D до оценочного уровня 0.98. В следующем разряде R_D слегка возрастает до значений около 0.99, который сохраняется и в импульсе 42320.

Другой эффект, иллюстрирующий некоторое уменьшение R_D – это поведение нарастания плотности плазмы сразу после пробоя, производившегося в 100-ю мс. Дейтерий в вакуумную камеру установки T-10 подается с помощью управляемого программой обратной связи пьезоэлектрического газового клапана, причем в рабочем диапазоне поток атомов в плазму пропорционален напряжению на газовом клапане. Интеграл по времени потока дейтерия дает возможность оценить количество внесенного вещества. На Рис. 4.4. временная эволюция нарастания электронной плотности приведена в сопоставлении с количеством внесенного дейтерия, где разными цветами для разных импульсов слева показано интегральное количество внесенного в плазму дейтерия, а справа – электронная плотность.

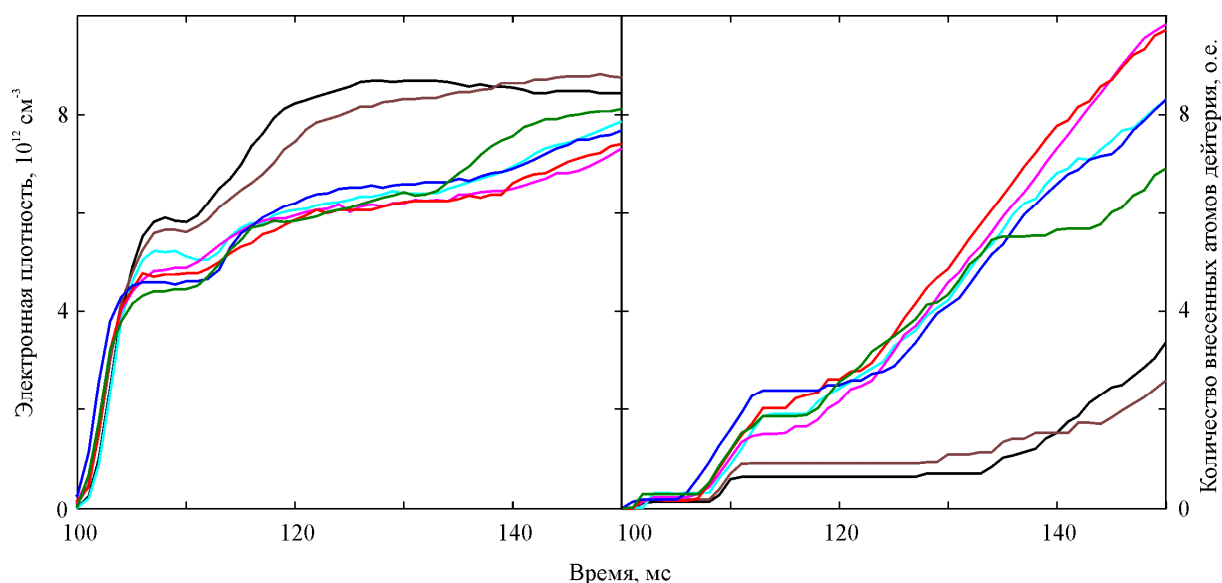


Рис. 4.4. Рост плотности (слева) и нарастания интегрального количества внесенного в плазму газа (справа) на протяжении первых 50 мс импульса. Разные разряды показаны разными цветами. Черный – реперный разряд 42312 до начала серии инъекции лития; коричневый – разряд 42313 (первый разряд с инъекцией); голубой – 42315 (с инъекцией); фиолетовый – 42316 (с инъекцией); красный – 42317 (с инъекцией); синий – 42318 (первый после серии инъекций); зеленый – 42319 (второй после серии инъекций).

Необходимо пояснить, что на токамаке Т-10 контроль плотности осуществляется с помощью программы обратной связи, которая сравнивает получаемые с микроволнового интерферометра значения с заданным заранее планом, и в соответствии с этим управляет степенью открытия клапана напуска рабочего газа. Система является несколько инерционной, газ из клапана доходит до плазмы в течение примерно 10-15 мс [57].

Из приведенного рисунка видно, что в реперном разряде 42312, а также в разряде 42313, в котором литий еще не был к этому моменту внесен в плазму, на протяжении первых 30 мс после пробоя дейтерий напускался лишь в небольших объемах, а между 111 и 128 мс не шел вовсе. Это свидетельствует о том, что плотность, нарастающая весьма быстро, шла по заданным программой обратной связи значениям или оказывалась выше них. В этом случае, конечно, напуск дополнительного газа не требуется, и разряд идет за счет допробойного наполнения плюс рециклинг. Во всех последующих импульсах, производившихся в камере, уже подвергнутой обработке литием, плотность растет медленнее, а газонапуск происходит непрерывно, так как

плотность отказывается ниже заданных программой значений. Это свидетельствует об уменьшении выхода атомов с обращенных к плазме поверхностей и некоторого ухода напускаемого дейтерия за счет связывания его литием. После того, как в импульсе 42318 литиевая макрочастица в плазму не инжестировалась, в разряде 42319 начинают наблюдаться признаки нарастания рециклинга в виде ускорения нарастания плотности, приводящего к снижению газонапуска. Необходимо подчеркнуть, что изменение рециклинга оказывается весьма малым, наблюдаемым лишь на начальной стадии разряда, характеризуемой низкой плотностью.

Все перечисленные выше эффекты являются незначительными признаками улучшения управляемости разряда, так что метод инъекции литиевых макрочастиц не оправдал возлагавшихся на него надежд по кондиционированию разряда T-10, подобно тому, как это наблюдалось на установке TFTR [91].

Предполагаемой причиной отсутствия значительных признаков кондиционирования разряда являлось то, что литий вносится достаточно глубоко в плазму, так что на периферии успевает испаряться лишь совсем малое его количество (см. Рис. 4.1.). При этом периферийное испарение видится наиболее выгодным с точки зрения создания условий для выхода лития на лимитер. В описываемых экспериментах основная часть лития попадает достаточно глубоко, что должно приводить в результате к равномерному распределению инжестированного вещества по всей поверхности первой стенки (см., например, [62]). Но, как оценивалось выше, объема вещества в одной макрочастице явно недостаточно для создания покрытия всей камеры. При отсутствии явных признаков кумулятивного эффекта создать такое покрытие может оказаться затруднительно. Возможная причина этого – срывное окончание разряда в T-10, при котором высадившийся на лимитере литий смывало потоком плазмы. Аналогичный эффект «стирания» литиевого слоя упоминался в качестве причины неудачи литиизации в установке Heliotron E [128].

Таким образом, для успешного выполнения программы литиизации можно было развивать технику внесения двумя путями. Первый из них заключается в существенном увеличении количества вносимого вещества для покрытия всей первой стенки, второй – в высаживании лития непосредственно на периферии плазмы, создавая тем самым предпочтительные условия для выхода его в область лимитера для управления рециклингом непосредственно в разряде, в который производится инъекция.

Необходимо также напомнить, что инъекция макрочастиц является по определению импульсным методом. Как показывают эксперименты на других

установках (см., например, [58]), глубокое проникновение инжектируемых литиевых макрочастиц в плазму может приводить к выключению разряда. Для условий токамака Т-10 крупные литиевые макрочастицы также проникают глубоко в плазму и увеличивают частоту срывов по предельной плотности. Это нивелирует преимущества литиизации. В связи с этим было бы желательно высаживать литий в виде мелких крупинок, испаряющихся на периферии и не формирующих резкий большой скачок плотности, как на графике (а) Рис. 4.2. Для этого надо уменьшать размер макрочастиц и их скорость, а нужное количество лития набирать за счет неоднократной инжекции. В предельном случае можно перейти к потоку маленьких, испаряющихся на первых нескольких сантиметрах малого радиуса литиевых шариков, каждый из которых в отдельности практически не нарушает параметры разряда, свободно падающему равномерно в течение всей квазистационарной стадии. Для реализации такого метода инжекции потребовалось полное изменение технологии внесения лития в плазму.

4.2 Инжекция литиевых пылевых струй в плазму токамака Т-10.

Для того, чтобы производить квазистационарную массивную инжекцию лития был изготовлен инжектор литиевой пылевой струи, который описан выше в Разделе 2.1.4. В ходе экспериментов литиевая пыль инжектировалась в плазму Т-10.

Блок-схема экспериментов приведена на Рис. 4.5. Здесь изображен вид сверху на токамак Т-10. Наименования сечений токамака обозначены латинскими буквами в кавычках. Инжектор литиевой пыли, расположенный в сечении “В”, отмечен на рисунке цифрой 1. Основное диагностическое оборудование токамака Т-10, использовавшееся в экспериментах, следующее: приемник электрон-циклотронного излучения для измерения электронной температуры (2), микроволновый интерферометр для измерения плотности плазмы (3), матрица болометрических датчиков (4) для изучения радиационных потерь плазмы. Для исследования эволюции поведения сигналов излучения на линиях рабочего газа и примесей использовался набор спектроскопических датчиков, в том числе на линиях $\text{CIII } 4647 \text{ \AA}$ (5a), $\text{LiII } 5485 \text{ \AA}$ (5b), $\text{D}_{\beta} 4860 \text{ \AA}$ (5c), а для регистрации излучения континуума была выбрана длина волны $5235 \text{ \AA}$ (5d). Кольцевой и рельсовый лимитеры расположены в сечении «А» токамака, на них направлена расположенная между сечениями “А” и “D” видеокамера (6) с возможностью установки светофильтра на различные линии, например, дейтерия или лития. Подробнее камера описана в работе [57]. Между

сечениями «А» и «В» находится попадающий в зону наблюдения видеокамеры клапан дейтериевого газонапуска (7).

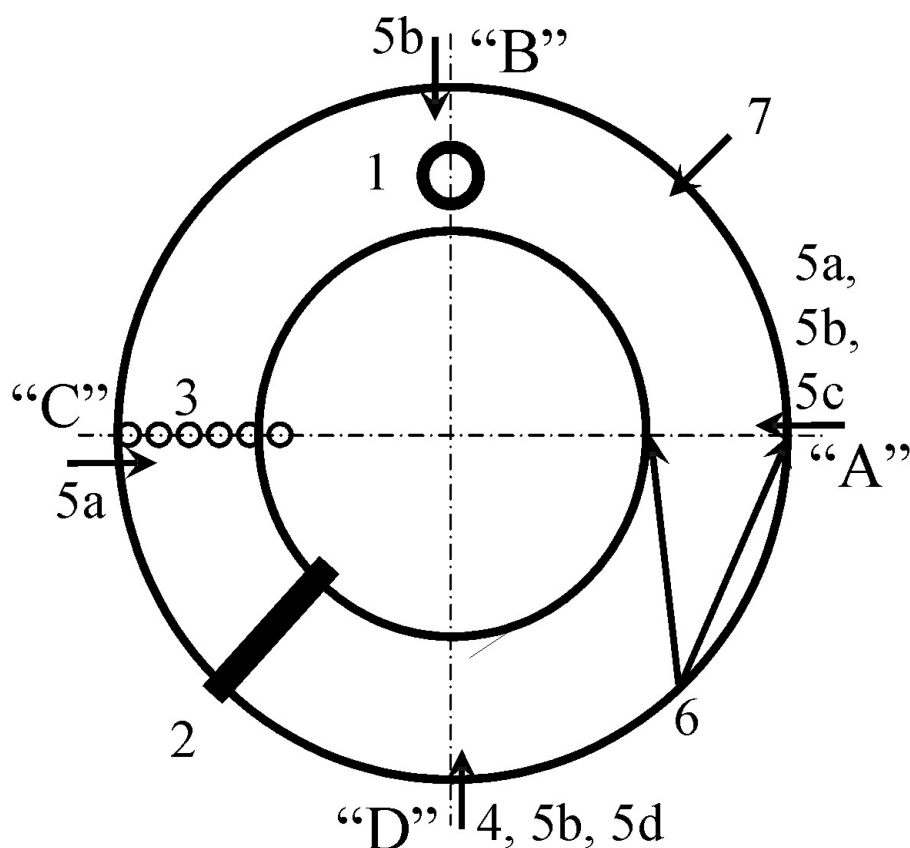


Рис. 4.5. Блок-схема экспериментов по инжекции литиевой пыли на токамаке Т-10, вид сверху: 1 – инжектор литиевой пыли, 2 – измерение электронной температуры, 3 – микроволновый интерферометр, 4 – болометрическая диагностика, 5 – спектроскопические детекторы: СIII (5a), LiII (5b), D β (5c), континуум (5d), 6 – видеокамера со сменным светофильтром, 7 – клапан газонапуска. Кольцевой и рельсовый лимитеры расположены в сечении «А».

Эксперименты по инжекции литиевых пылевых струй в плазму токамака Т-10 можно условно разделить на несколько стадий. В ходе первой серии исследовался вопрос совместимости потока литиевой пыли с плазменным разрядом с различными параметрами, а также был обнаружен предел значений потока литиевой пыли, не приводящего к срыву разряда токамака. На втором этапе была произведена серия инжекций пыли со значениями потока, варьирующимися немного ниже определенного на предыдущем этапе срывного уровня. Было обнаружено, что во время такой инжекции за счет внесения лития эффективный заряд растет со значений порядка 2 до

значений примерно 3. При этом экспериментально измеренная форма профиля электронной плотности не претерпевала значительных изменений во время инъекции. Из этого был сделан вывод, что внесенное вещество проникает в центральные области плазмы и распределяется вдоль малого радиуса аналогично электронной плотности. Это в свою очередь позволило развить модель, описывающую поведение основных ионов плазмы (D, C, Li) во время инъекции.

4.2.1 Результаты экспериментов по инъекции литиевой пылевой струи.

Инъекция литиевой пылевой струи проводилась как в разряды токамака T-10 с омическим нагревом, так 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 $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, ток по плазме 200 либо 250 кА, тороидальное поле 2.4-2.5 Тл. Мощность омического нагрева составляла $\cong 0.3 \text{ МВт}$. Мощность ЭЦР нагрева в разрядах с его использованием была близка к 1.5 МВт. Инъекция проводилась на той стадии разряда, когда плотность выходила на заданное программой плато, начинаясь примерно в 550-650 мс.

Саму инъекцию лития можно характеризовать как количеством внесенного вещества, так и длительностью инъекции. В ходе экспериментов варьировались оба эти параметра. Так как по описанным в разделе 2.1.5.4. причинам, литий вносился неравномерно, то понятие потока примеси в плазму можно ввести как интегрально, то есть за все время инъекции, так и мгновенно, то есть в отдельно взятый момент времени. Соответственно необходимо отметить, что, например, при интегральном потоке вносимого вещества в $1 \cdot 10^{20}$ атомов лития в секунду на протяжении 500 мс, его мгновенные пиковые значения потока могли достигать $4 \cdot 10^{20} \text{ ат/с}$. Таким образом, при анализе полученных экспериментальных данных надо было учитывать неравномерность поступающего потока лития.

Эксперимент строился в 2 этапа, в первом из которых, при переборе настроек системы инъекции достаточно грубым шагом, выбирались наиболее выигрышные для литиизации параметры потоков. В результате по характерной форме сигналов излучения на линии LiII из плазмы, пропорциональных потоку вносимого вещества, были выделены две моды инъекции: I или «квазистационарная», и II или «импульсная».

Найдены границы совместимости параметров вносимого потока лития с параметрами плазмы.

На втором этапе эксперименты по инъекции проводились в квазистационарной моде со значениями потока вносимого вещества, приближенными к оцененному на первом этапе предельному значению, не приводящему к срыву разряда. В данном случае ожидалось получение наиболее выраженных эффектов литиизации.

В следующих подразделах будет выполнено подробное описание полученных на обоих этапах эксперимента результатов.

4.2.1.1 Моды инъекции.

Как уже отмечалось в параграфе 2.1.5.4., при прохождении системы доставки пыли в токамак поток литиевой пыли из инжектора преобразуется из более-менее прямоугольной формы в треугольную, в связи с чем не приходилось ожидать равномерной эволюции параметров разряда плазмы при инъекции. Поэтому основное отличие мод инъекции заключается не только в абсолютных значениях полного количества внесенного в плазму лития, но и в степени неравномерности инжектируемых потоков. Необходимо отметить, что диагностика потока лития в подсистеме доставки пыли в токамак (Рис. 2.11.) была расположена выше выходной воронки подсистемы, что могло приводить к изменению потока, достигающего плазмы по сравнению с данными этой диагностики. В результате измеренные на стенде параметры потоков на выходе из инжектора, соответствующие установленным настроечным характеристикам (углу наклона и скорости вращения, см. Раздел 2.1.5.2.), использовались для предварительных оценок в ходе экспериментов. Эволюцию потока лития в плазму грубо можно было связать с излучением на линии LiII в сечении инъекции, кроме того, ее можно было оценить с помощью предложенной ниже в данной главе модели.

Таким образом, в ходе первых настроечных экспериментов по инъекции литиевой пыли в плазму токамака T-10 было выделено две воспроизводимые моды инъекции, не приводящей к срыву разряда. В первой из них угол наклона инжектора выставлялся равным нулю, во второй равным -1° . Инжекция производилась с длительностью 500 мс и 200 мс соответственно. При этом оценочные интегральные количества внесенного в плазму лития отличались лишь незначительно, но за счет

разницы в продолжительности инъекции ее характер в первом случае можно было назвать «квазистационарным», во втором – «импульсным».

На Рис. 4.6 показана временная эволюция основных параметров разряда 59481 (синие линии), где характерно проявляются особенности «квазистационарной» моды I, в сравнении с реперным разрядом 59471 (черные линии). Данный разряд характеризуется весьма малым и исключительно равномерным потоком лития в плазму. Здесь излучение на линии лития (b) в сечении инъекции лития на протяжении 150 мс плавно нарастает, после чего выходит на стационар, что свидетельствует о примерно равномерном поступлении пыли в разряд. Плотность плазмы (a) лишь незначительно превышает уровень, задаваемый программой обратной связи, в связи с чем система газонапуска немного снижает поток дейтерия в камеру (d). Остальные сигналы по сравнению с реперным разрядом оказываются практически неизменными. Регистрируемое болометром излучение из плазмы (g) во время инъекции изменяется очень слабо и практически равномерно как на периферийных, так и на центральных хордах, не изменяя характерной формы профиля (см. Рис. 4.8.). Эта особенность является характерной для моды I и сохраняется и в том случае, когда поток лития в плазму является менее равномерным, например, как на Рис. 2.13. (см. Рис. 4.9.).

В случае инъекции лития за более короткий промежуток времени происходит переход к «импульсной» моде II инъекции. Возмущение параметров плазмы при этом оказывается значительнее (см. Рис. 4.7.). На 700 мс, с подходом литиевого потока к плазме, начинается резкое нарастание сигнала LiII (b). Задержка около 20 мс для нарастания плотности (a) относительно излучения может быть объяснена длительностью переноса частиц в плазму с периферии, где пыль испаряется и ионизируется. В связи со значительным ростом плотности плазмы газонапуск (d) достаточно быстро отключается. Таким образом, на периферии плазмы вблизи сечения «А» (см. Рис. 4.5.) исчезает достаточно мощный охлаждающий фактор. Сам пылевой поток также выхолаживает периферию, и на примерно 820 мс, когда внос лития резко уменьшается на фоне выключения газонапуска, начинает расти тепловая нагрузка на углеродную пластину лимитера. Это приводит к значительному возрастанию излучения на линии CIII (c) в сечении лимитера, которое спадает лишь после 850 мс, когда поток газа от вновь открывшегося клапана напуска рабочего газа с задержкой 20-30 мс [57] достигает периферии плазменного шнура. Кратковременный рост $D\beta$ (e) на временном отрезке 820-850 мс также можно связать с увеличением выхода захваченного дейтерия из лимитера под воздействием возросшей тепловой нагрузки.

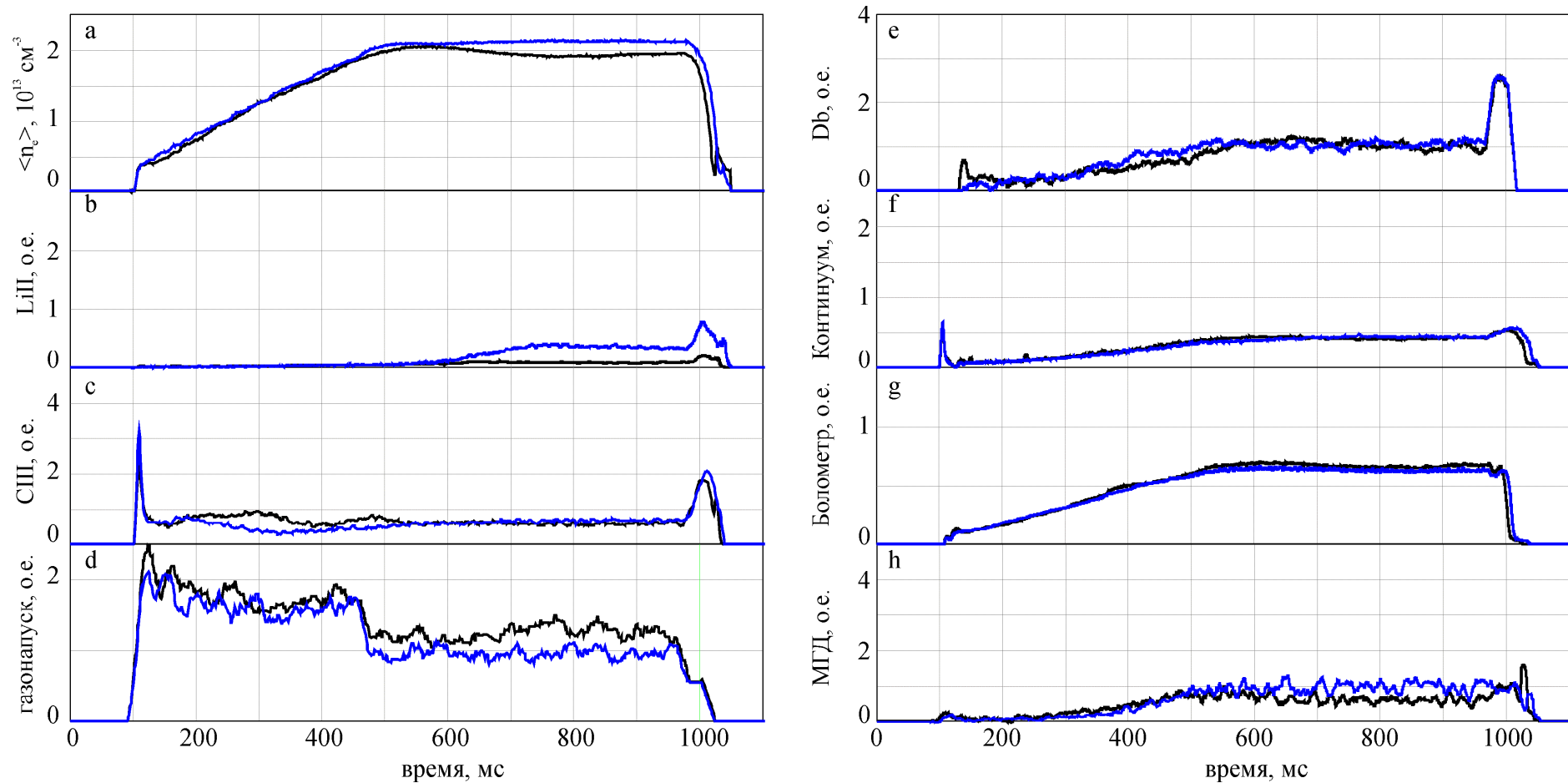


Рис. 4.6. Мода I инъекции литиевой пыли в плазму токамака Т-10, омический нагрев. Черный – реперный разряд 59471 без инъекции лития, синий – разряд 59481 с инъекцией. (а) – среднечордовая плотность, (б) – излучение на линии лития, (с) – излучение на линии углерода, (д) – газонапуск в разряд, (е) – излучение на линии дейтерия, (ф) – излучение в непрерывном спектре, (г) – излучение, принимаемое болометром по хорде середины малого радиуса, (h) – сигнал с магнитных зондов.

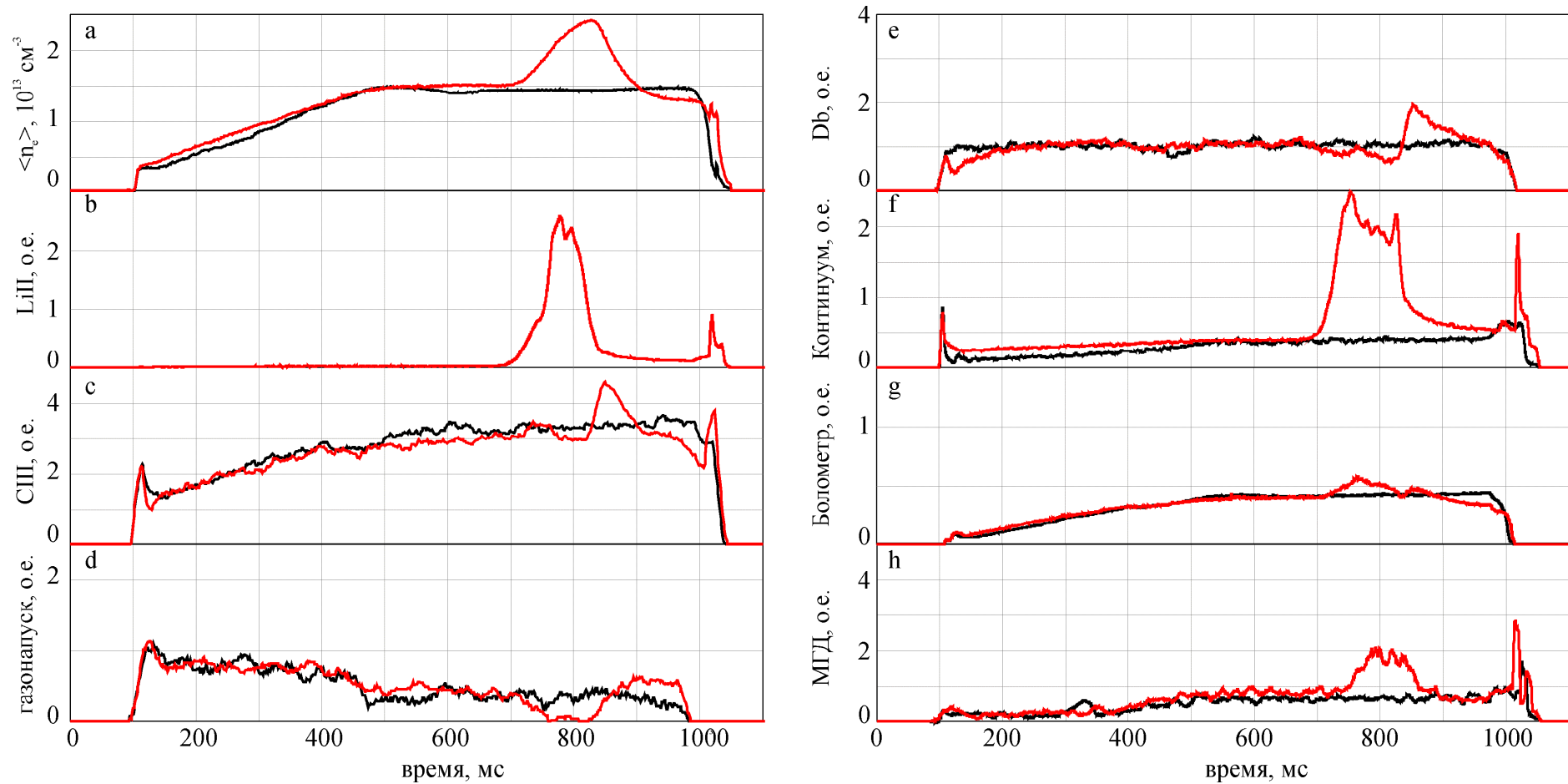


Рис. 4.7. Мода II инъекции литиевой пыли в плазму токамака Т-10, омический нагрев. Черный – реперный разряд 59609 без инъекции лития, красный – разряд 59707 с инъекцией. Обозначения элементов идентичны предыдущему рисунку.

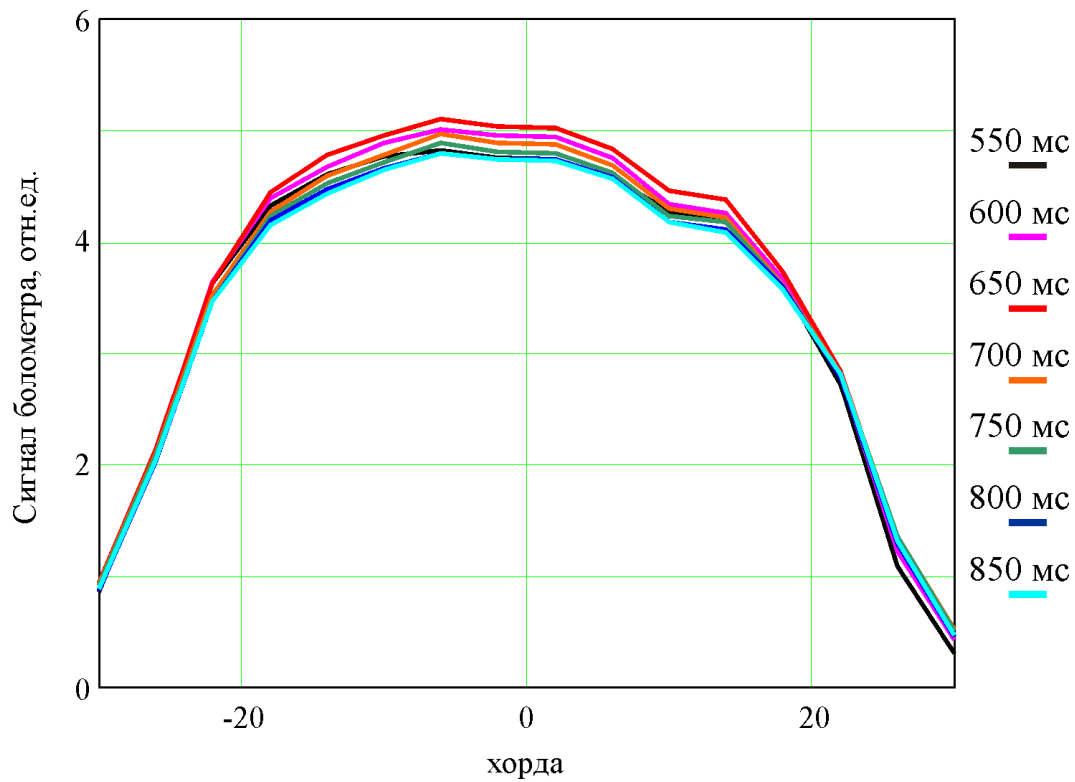


Рис. 4.8. Эволюция сигнала болометра во время инъекции литиевой пыли в Моде I, разряд 59481. Инжекция начинается на 550 мс, длится до конца разряда (1000 мс).

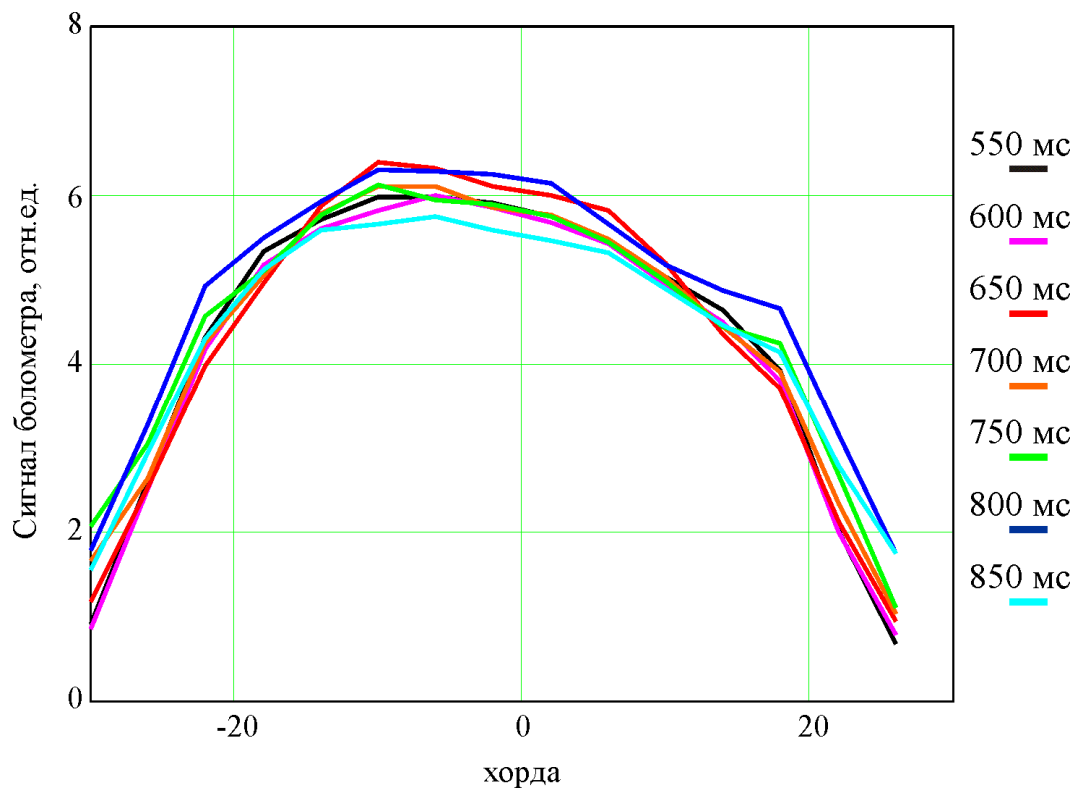


Рис. 4.9. Эволюция сигнала болометра во время инъекции литиевой пыли в Моде I, разряд 61648. Инжекция начинается на 550 мс, длится до конца разряда (1000 мс).

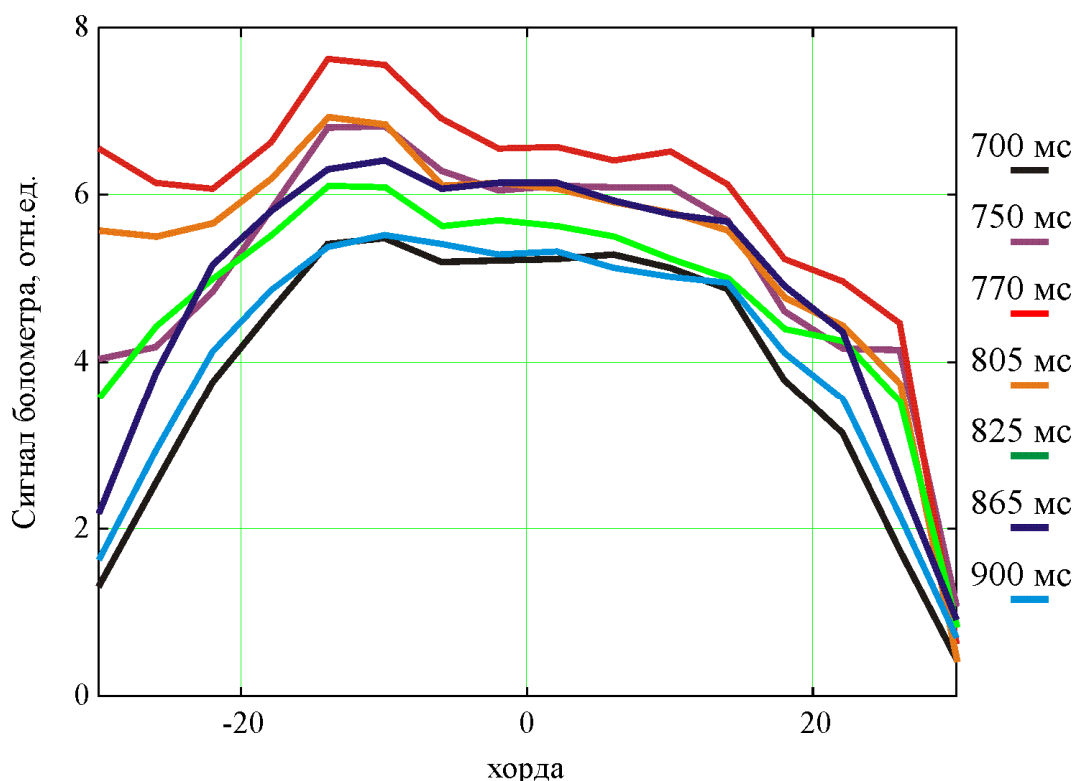


Рис. 4.10. Эволюция сигнала болометра во время инжекции литиевой пыли в Моде II, разряд 59707. Инжекция начинается на 700 мс, завершается на 850 мс.

Заметный приток лития в плазму приводит к росту излучения континуума (f). Также происходит значительное изменение сигналов болометра (Рис. 4.10.): излучение из центральных областей возрастает медленнее, чем с периферии. Начиная с 750 мс в плазме развивается МГД-возмущение (Рис. 4.7 h), достигающее максимума к 780 мс, после чего профиль излучения из плазмы начинает постепенно перестраиваться к нормальному виду (Рис. 4.10.). Подобное МГД-возмущение является одним из характерных признаков импульсной моды инжекции. Оно заметно влияет на параметры разряда: сигналы начинают сильно и неравномерно меняться (см. излучение на линиях LiII и непрерывного спектра на Рис. 4.7 b, f соответственно). Это, по-видимому, происходит из-за того, что возмущение выбрасывает вещество из плазмы.

Кроме того, одновременно с началом литиевой инжекции заметен небольшой спад сигнала излучения на линии дейтерия D β (Рис. 4.7 e). Его можно связать с ухудшением контроля периферийной плотности за счет литиизации. Действительно, R_D в условиях T-10 полагался большим (см. оценки в Разделе 4.1.), и, следовательно, основной вклад в поступление дейтерия в плазму следовало ожидать за счет выхода со стенок, а поток из газового клапана является лишь добавкой. Подтверждению этого, в

числе прочих вопросов, была посвящена дополнительная серия экспериментов, описываемая в следующем разделе.

Как видно, одним из основных отличий между модами I и II является развитие заметных МГД-явлений во время инъекции во втором случае. Они приводят к перестройке плазменного шнура, в результате чего исследование литиизации разряда затрудняется необходимостью учитывать особенности перестройки профиля температуры плазмы при процессах, подобных описанным в разделе 3.1. Они не имеют прямого отношения к исследуемому в данной главе вопросу управления рециклингом рабочего газа. Следовательно, для моделирования собственно взаимодействия литиевой пылевой струи с высокотемпературной плазмой, необходимо проводить инъекцию в моде I. Процессам, связанным с нарушением МГД-равновесия, будет также уделено некоторое внимание в параграфе 4.2.2.1.

В случае, если в моде II за счет увеличения угла наклона попытаться еще больше нарастить расчетный поток лития в плазму, она переходит в срывную моду II' (Рис. 4.11.). Однако на протяжении первых 50 мс инъекции наблюдается заметное снижение излучения на линии D β (e) одновременно с ростом плотности (a) за счет инъекции лития. Снижение газонапуска (d) опять происходит с задержкой по сравнению с уменьшением интенсивности излучения дейтерия, что свидетельствует в пользу того, что наблюдаемый эффект связан с уменьшением R_D . Затем, с дальнейшим увеличением потока лития, излучение из плазмы на всех линиях начинает резко нарастать, сигналы их диагностики аппаратно насыщаются. Увеличение содержания примеси на периферии приводит к сжатию профиля тока и развитию серии малых срывов, видных на сигнале МГД (h). Эта последовательность завершается большим срывом в районе 900 мс.

Инъекция в моде II с умеренным потоком проводилась также в разряд с дополнительным ЭЦР нагревом (Рис. 4.12.), где признаки литиизации проявились весьма очевидно. Необходимо отметить снижение излучения на линии D β (e) во время инъекции по сравнению с реперным разрядом, в то время как плотность плазмы (a) за счет ввода лития идет выше реперного. Излучение из плазмы, регистрируемое болометром (g), сначала оказывается во время инъекции ниже, чем в реперном разряде, но к 850 мс, когда поток лития спадает, начинает подрастать к стандартному уровню. С другой стороны, излучение на линии углерода CIII (c) оказывается примерно таким же, как и в реперном разряде.

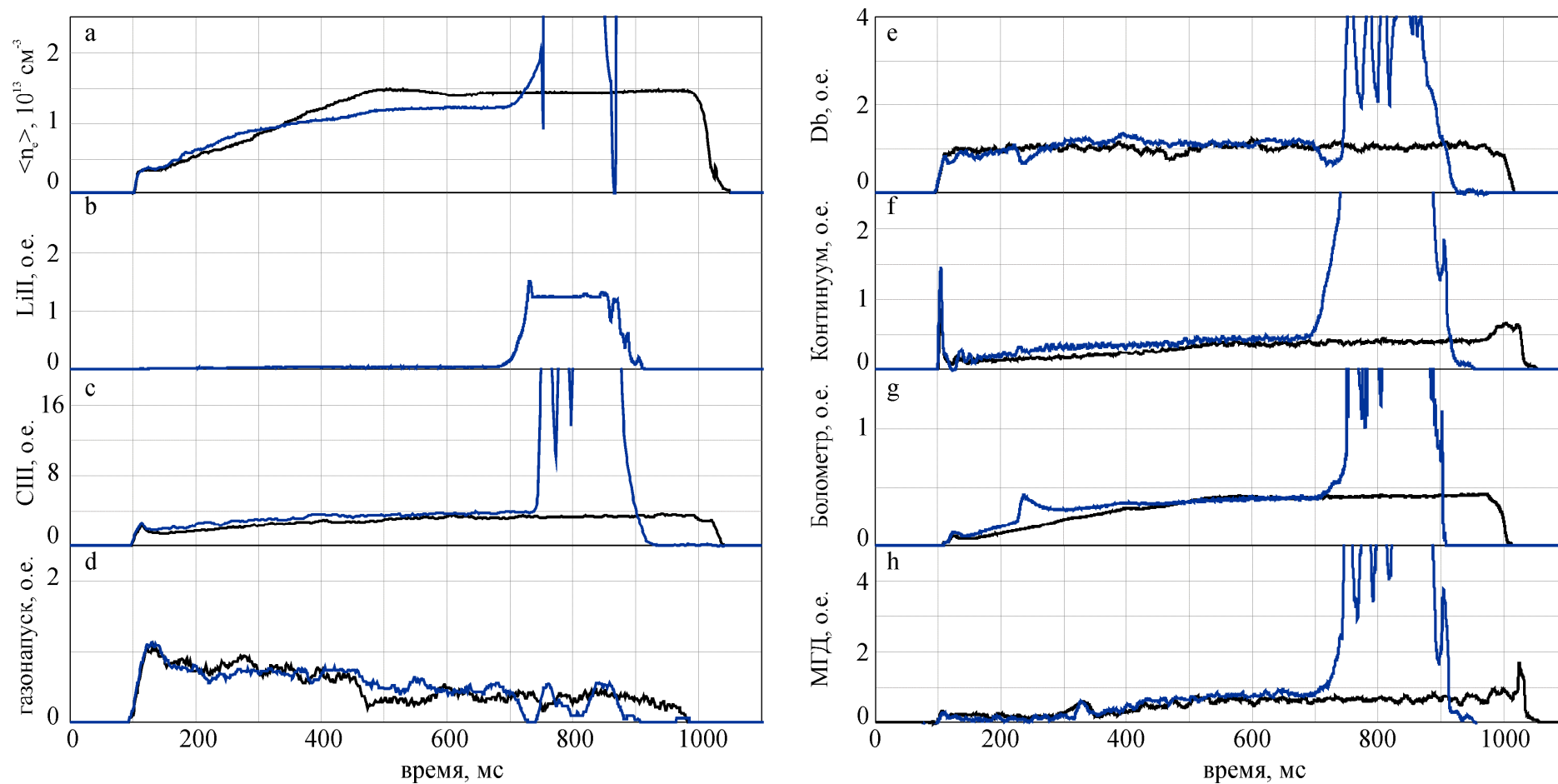


Рис. 4.11. Мода II' (со срывом) инъекции литиевой пыли в плазму токамака Т-10, омический нагрев. Черный – реперный разряд 59609 без инъекции лития, синий – разряд 59702 с инъекцией. Обозначения элементов идентичны Рис. 4.6.

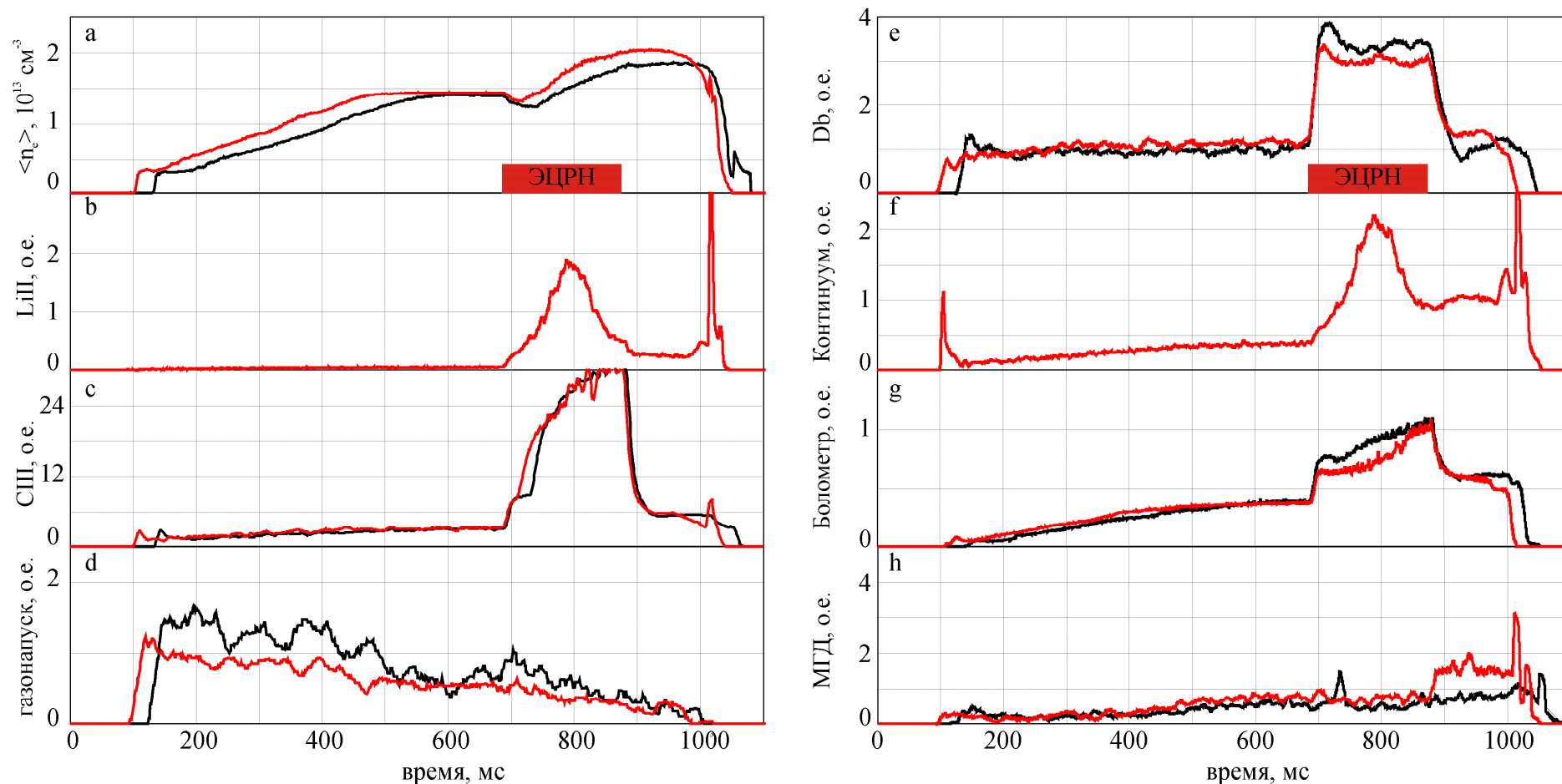


Рис. 4.12. Мода II инъекции литиевой пыли в плазму токамака Т-10, омический + ЭЦР нагрев. Черный – реперный разряд 59660 без инъекции лития, красный – разряд 59711 с инъекцией. Временная шкала разряда 59660 сдвинута на 30 мс, чтобы, для упрощения восприятия результатов, в разрядах совпали интервалы работы гиротронов (выделен на графиках красным прямоугольником). Обозначения элементов идентичны Рис. 4.6.

Сам по себе заметный рост содержания углерода в плазме после начала импульса ЭЦРН связан с дополнительным притоком примеси с обращенных к плазме поверхностей во время работы гиротрона. Характерно также, что на большей части временного интервала инъекции нарушений МГД-равновесия нет (h), в связи с чем можно оценить поток лития в данном разряде как лишь незначительно превышающий пороговое невозмущающее значение.

Подводя итог первого этапа экспериментов по инъекции литиевой пылевой струи в плазму токамака Т-10, можно сделать следующие выводы. Показана работоспособность системы инъекции металлической литиевой пыли, установленной на токамаке. Проведены эксперименты по инъекции пыли в разряд, выделены две моды инъекции, различающиеся по длительности и количеству внесенного вещества. Определены границы совместимости инъекции с плазменным разрядом, сделано предположение о том, что для исследования взаимодействия литиевой струи с плазмой мода I является предпочтительной как не вызывающая значительных МГД-возмущений. Поэтому было предложено провести следующую серию экспериментов с теми настройками источника пылевой струи, которые обеспечивали бы квазиравномерное внесение пыли с потоками, близкими к максимальным значениям, все еще не приводящим к раскачке МГД моды.

4.2.1.2 Эксперименты по инъекции в квазистационарной моде.

Следующая серия экспериментов по инъекции литиевой металлической пылевой струи была проведена с теми настройками, которые были выбраны по результатам первой серии экспериментов как обеспечивающие достаточно большой поток лития в плазму, но в то же время не приводящие к развитию сильных МГД-явлений, то есть в моде I (квазистационарная инъекция). В ходе серии поток лития регулировался лишь небольшим (в диапазоне от 2 до 3.5°) изменением наклона подвижной пластины источника пылевой струи (см. чертеж источника на Рис. 2.10.), что должно было привести к изменению выходного потока до 5 раз. По сравнению с предыдущей серией эксперименты проводились при лучшем состоянии диагностического комплекса Т-10, что дало возможность измерять не только центральную хордовую плотность плазмы, но и весь профиль, а также использовать

диагностику измерения радиального профиля температуры электронов по излучению на второй гармонике ЭЦ частоты.

Временная эволюция параметров плазмы при умеренной инжекции лития в плазму в разряде 61648 представлена на Рис. 4.13. фиолетовыми кривыми. Черные кривые соответствуют реперному разряду 61645 без инжекции лития. Вертикальными штриховыми линиями выделено три стадии взаимодействия лития с плазмой – монотонная стадия А от 500 мс (начало инжекции) до 750 мс, стадия скачка В от 750 до 800 мс, стадия распада плотности С от 800 до 1000 мс (конец разряда).

Рассмотрим теперь картину более подробно. Пыль достигает плазмы примерно с 600 мс, как видно из графика (b), показывающего излучение из плазмы на линии LiII. Во время инжекции плотность плазмы (a) немного нарастает, приводя к снижению потока дейтерия из системы газонапуска (d), управляемой системой обратной связи, запрограммированной на поддержание постоянной плотности. Отключение газонапуска на 800 мс позволяет проследить за распадом плотности. Можно заметить, что снижение плотности начинается до этого момента, что ассоциируется не только с уменьшением притока лития в плазму, но и с ожидаемым уменьшением рециклинга, по аналогии с результатами работы [21] (см. раздел 1.2.5 и Рис. 1.5.). Излучение на линии D β с рельсового лимитера (e) и на линии CIII (c) в том же сечении “А” снижаются в сравнении с реперным разрядом вплоть до момента времени 750 мс. Снижение излучения CIII подтверждает уменьшение выхода примеси с обращенных к плазме компонентов вакуумной камеры установки, самым близкорасположенным из которых является как раз углеродный рельсовый лимитер. Количество вносимого в ходе экспериментов вещества было достаточно для покрытия лимитера десятками моноатомных слоев лития, что делает наблюдаемый эффект ожидаемым. С другой стороны, снижение содержания углерода происходит одновременно с ростом излучения континуума (f) (регистрировалось на участке спектра 5235 ± 6 Å с помощью монохроматора) и показывает рост эффективного заряда плазмы Z_{eff} на фоне весьма слабого возмущения периферийной электронной температуры (g).

Необходимо подчеркнуть, что первая (А на Рис. 4.13.) стадия процесса определяется монотонным характером изменения излучения на линии дейтерия D β (e) и температуры (g). На этой стадии описываемое ниже моделирование поведения компонент D, C и Li в плазме возможно, при резких изменениях D β моделирование затруднено, и процесс рассматривается только качественно.

Примерно после 750 мс начинается заметное уменьшение поступления лития в плазму (стадия В). Это приводит к уменьшению излучения на линии континуума и росту периферийной температуры при примерно постоянной плотности. Однако наиболее сложным образом ведет себя $D\beta$. Необходимо проанализировать его подробнее.

На примере кривых (d) и (e) для реперного разряда 61645 можно заметить, что когда поток газа уменьшается на 400 мс при выходе плотности на плато, и когда он отключается на 800 мс, излучение на линии $D\beta$ возрастает, с некоторой задержкой, связанной с вытеканием остаточного газа. Подобный эффект наблюдался и в экспериментах с клапаном периодического газонапуска [57], где он также связывался с охлаждением периферии плазмы струей газа. Таким образом, небольшой рост температуры на периферии в указанные моменты времени в реперном разряде (кривая g) приводит к значительному росту излучения $D\beta$.

В случае прекращения литиевой инъекции также снимается дополнительный периферийный охлаждающий фактор, что приводит к уже упомянутому росту температуры. С ним можно связать наблюдающийся на 750 мс резкий рост $D\beta$. Таким образом, в данном случае мы имеем дело с достаточно сложным одномерным процессом, который предлагаемая 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 возрастает, и нульмерное моделирование не производилось.

На Рис. 4.14. представлена временная эволюция основных параметров плазмы с увеличенным до верхнего предела условия слабых возмущений разряда количеством вносимого вещества. Здесь графики с инъекцией в импульсе 61651 отображаются красным цветом, реперный разряд 61645 изображен черными кривыми. Заметно, что все характерные особенности поведения плазмы в ходе инъекции, в том числе и рост СШ и $D\beta$ после 750 мс, выражены ярче. На 600 мс разряда возникает МГД-активность. Это свидетельствует о достижении границы по количеству вносимого вещества, дальнейшее его увеличение приведет к раскачке неустойчивостей и к росту вероятности наступления большого срыва.

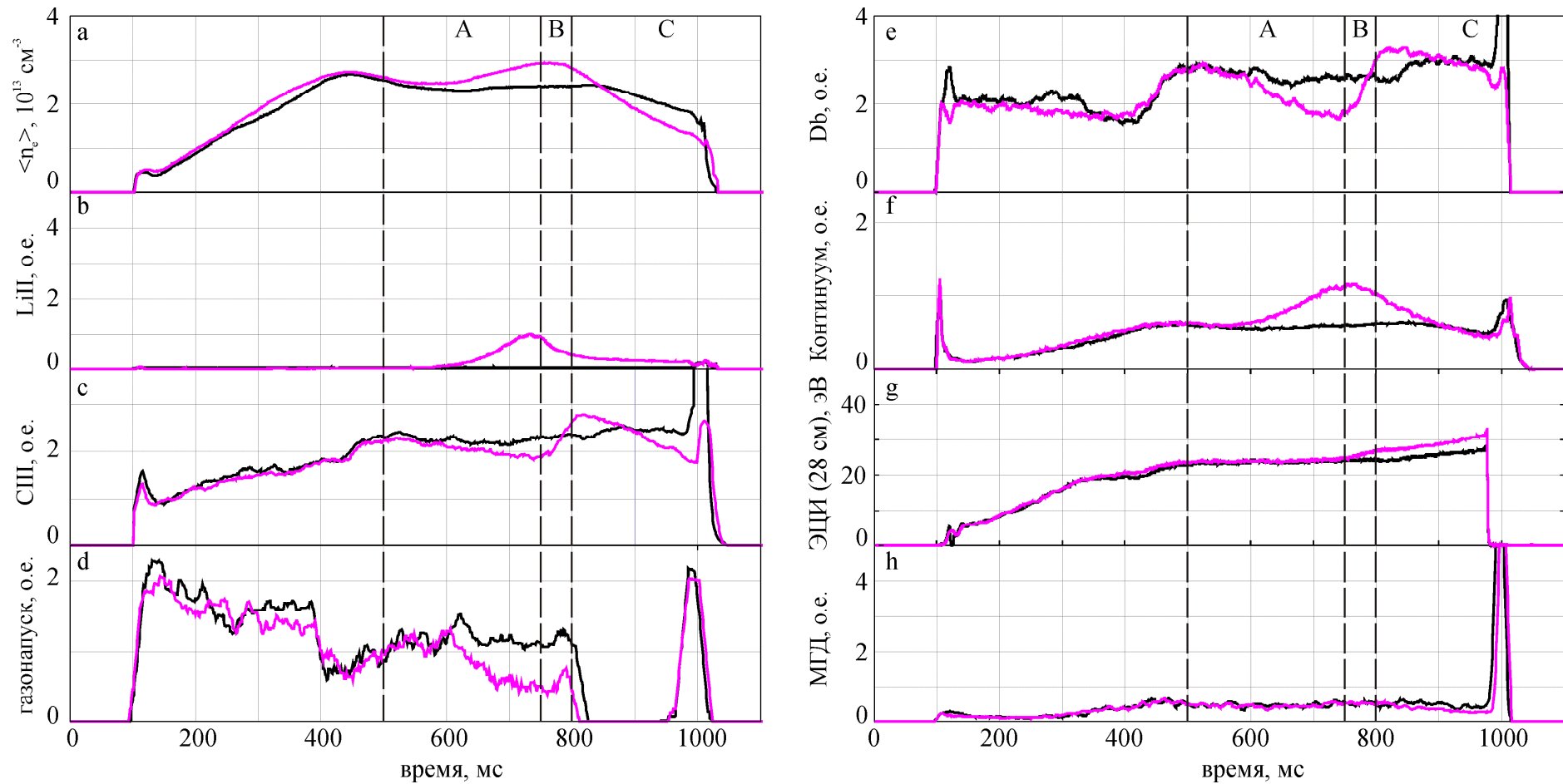


Рис. 4.13. Эволюция основных параметров плазмы в реперном разряде 61645 (черные кривые) в сравнении с разрядом 61648 (фиолетовые кривые). (a) – среднехордовая плотность, (b) – излучение на линии лития, (c) – излучение на линии углерода, (d) – газонапуск в разряд, (e) – излучение на линии дейтерия, (f) – излучение в непрерывном спектре, (g) – периферийная электронная температура, (h) – сигнал с магнитных зондов.

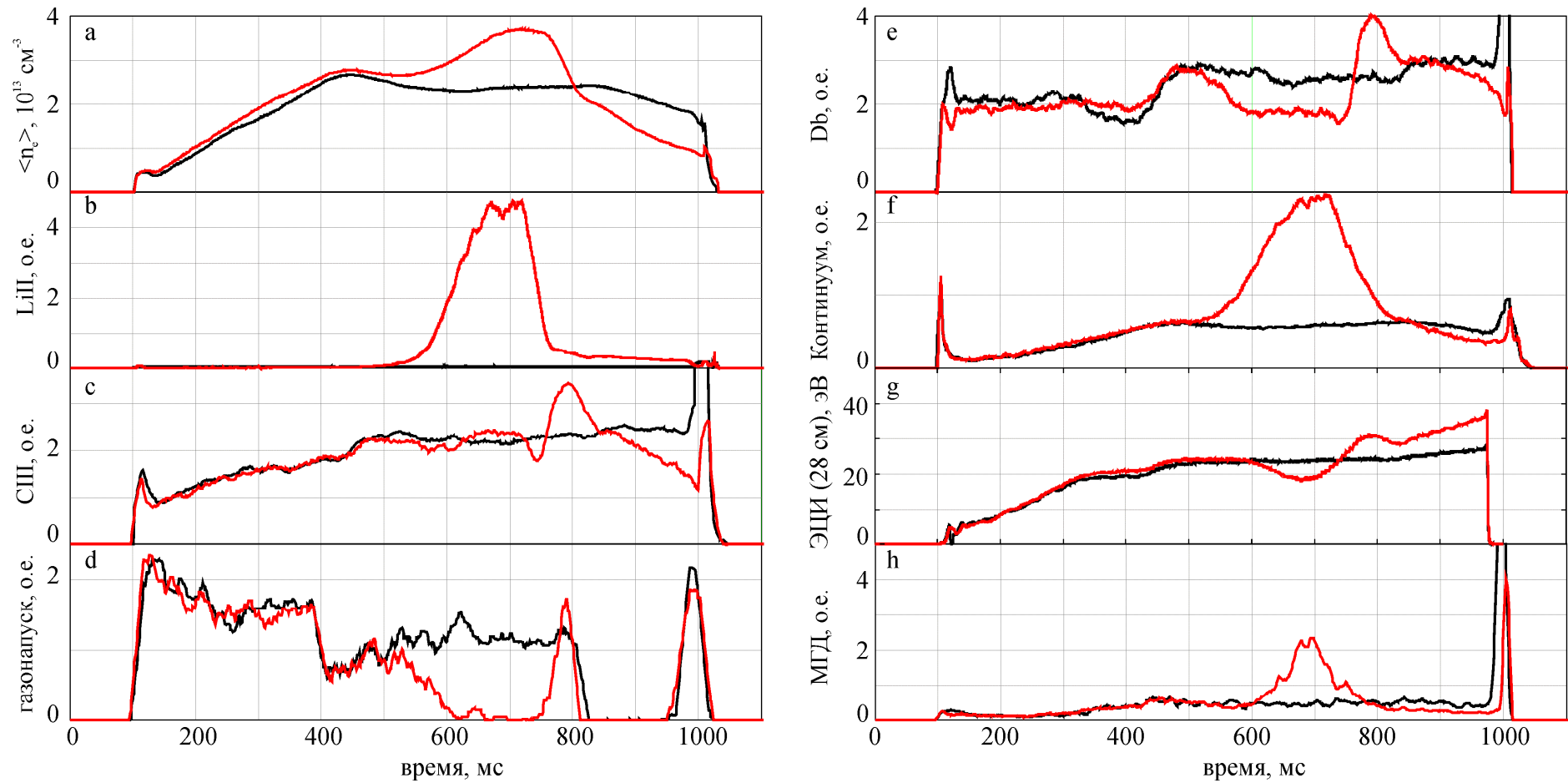


Рис. 4.14. Эволюция основных параметров плазмы в реперном разряде 61645 (черные кривые) в сравнении с разрядом 61651 (красные кривые). Обозначения элементов идентичны Рис. 4.13Рис. 4.6.

Таким образом, при инъекции литиевой пылевой струи в плазму токамака T-10 в квазистационарной моде I, не приводящей к значительному нарушению МГД-равновесия, были выявлены такие признаки, свидетельствующие об улучшении разряда, как уменьшение выхода дейтерия за счет рециклинга и снижение содержания углерода. Были уточнены пределы вносимого количества вещества, при превышении которых в разряде возникают МГД-возмущения. Была собрана база экспериментальных данных, необходимая для проведения количественных оценок наблюдаемых эффектов.

Необходимо отметить и ряд отрицательных моментов, обнаруженных в ходе проведения экспериментов. Во-первых, как уже отмечалось в параграфе 2.1.5.3., из-за конструкционных особенностей подсистемы доставки пыли в токамак невозможно точно зарегистрировать поток пыли, входящий в установку, так как между ними расположена воронка, защищающая порт вакуумной камеры токамака. Кроме того, не следует считать однозначно определенным тот факт, что все частицы порошка, влетевшие в вакуумную камеру, попадут в плазму. Они, имея массу порядка 10^{-8} грамм и вертикальную компоненту скорости менее 5 м/с, могут приобрести в слое пристеночной плазмы электрический заряд и отклоняться от вертикальной траектории, совершая движение по периферии вдоль силовых линий, наподобие других пылевых частичек в установке [129]. В свою очередь, количество усваиваемого плазмой лития по порядку составляет около 10% от покинувшего инжектор потока. Тем самым оказывается затруднительным точно и непосредственным образом определить количество вносимого в разряд лития. Эта задача решается лишь методом моделирования поведения ионов в плазме разряда T-10, описываемым в следующем подразделе.

Следующим отрицательным моментом является недостаточная скорость реагирования системы инъекции. Например, может появиться необходимость оборвать внесение вещества в плазму, предположим, из-за срыва разряда. Тогда даже при размещении быстродействующего шибера непосредственно над вакуумным портом T-10 окажется, что из-за большого подлетного времени, составляющего около 600 мс (см. Рис. 2.13.), значительная часть лития будет уже находиться между входом в токамак и периферийными слоями плазмы. В течение следующей секунды под действием силы тяжести эта порция порошка пролетит камеру и упадет на нижние ее элементы. Это приведет к загрязнению располагающихся там оптических окон и вакуумных затворов и постепенному ухудшению их работоспособности. Проиллюстрировать это можно с помощью приведенной на Рис. 4.15. фотографии,

сделанной после вскрытия камеры Т-10 на атмосферу. Здесь белыми овалами выделены скопления пыли на нижних горизонтальных выступах конструктивных элементов, порошок уже успел прореагировать с газами воздуха и побелел. Еще ниже располагаются патрубки с шиберными затворами, где попадание пылевых частиц между подвижными деталями может привести к заклиниванию, а оседание на уплотняющих поверхностях – к появлению течей.



Рис. 4.15. Литиевый порошок в нижней части вакуумной камеры Т-10 в сечении инъекции.

Проблема является неотъемлемым недостатком систем, где литиевая пылевая струя разгоняется только лишь ускорением свободного падения, так как расстояние между отсечным клапаном для потока пылевой струи и плазмой невозможно сделать очень малым. В связи с этим всегда можно ожидать некоторого количества литиевой пыли в разряд и накопления его под точкой ввода порошка в установку. В описываемой системе также возможна аккумуляция некоторого количества пыли на микронеровностях воронок подсистемы доставки пыли в токамак (Рис. 2.11.), где она

будет задерживаться и постепенно осыпаться, формируя «хвост» инъекции (см. сигнал с оптического барьера на Рис. 2.13.). Следовательно, при планировании размещения подобного оборудования требуется продумать возможности защиты окон и затворов под инжектором, например, с помощью шторок, а также методы удаления скопившегося порошка из вакуумной камеры установки.

4.2.2 Моделирование поведения ионов в плазме Т-10

Для анализа поведения плазмы при инъекции лития в квазистационарной моде, не приводящей к значительным МГД-возмущениям разряда, была разработана нульмерная модель баланса ионов в плазме. С ее помощью можно макроскопически исследовать поведение во время инъекции рабочего газа – дейтерия, вносимого вещества – лития, и основной примеси в плазме Т-10 – углерода. Плотность лития, полученная по модели, коррелирует с излучением на линии LiII из разряда, рассчитанное поведение Z_{eff} – с излучением континуума в видимом спектре (как, например, в работе [21]). Абсолютные значения эффективного заряда для калибровки были предоставлены группой В.А.Крупина и получены ими по методике, описанной в работе [130]. Исходя из расчетов, была определена эволюция коэффициента R_D . Моделирование в данной экспериментальной серии велось для временного участка от 500 до 750 мс, на квазистационарной стадии внесения лития.

4.2.2.1 Моделирование реперного разряда.

В расчетах использовался нульмерный подход при анализе уравнений баланса для описания временной эволюции содержания частиц сорта « i » (D, C и Li) во время разряда:

$$\frac{dN_i}{dt} = \Gamma_i^{\text{in}} - \Gamma_i^{\text{out}} = \Gamma_i^{\text{in}, \text{puff}} + \Gamma_i^{\text{in}, \text{wall}} - \frac{N_i}{\tau_p} = \Gamma_i^{\text{in}, \text{puff}} + R_i \frac{N_i}{\tau_p} - \frac{N_i}{\tau_p} \quad (4.1.).$$

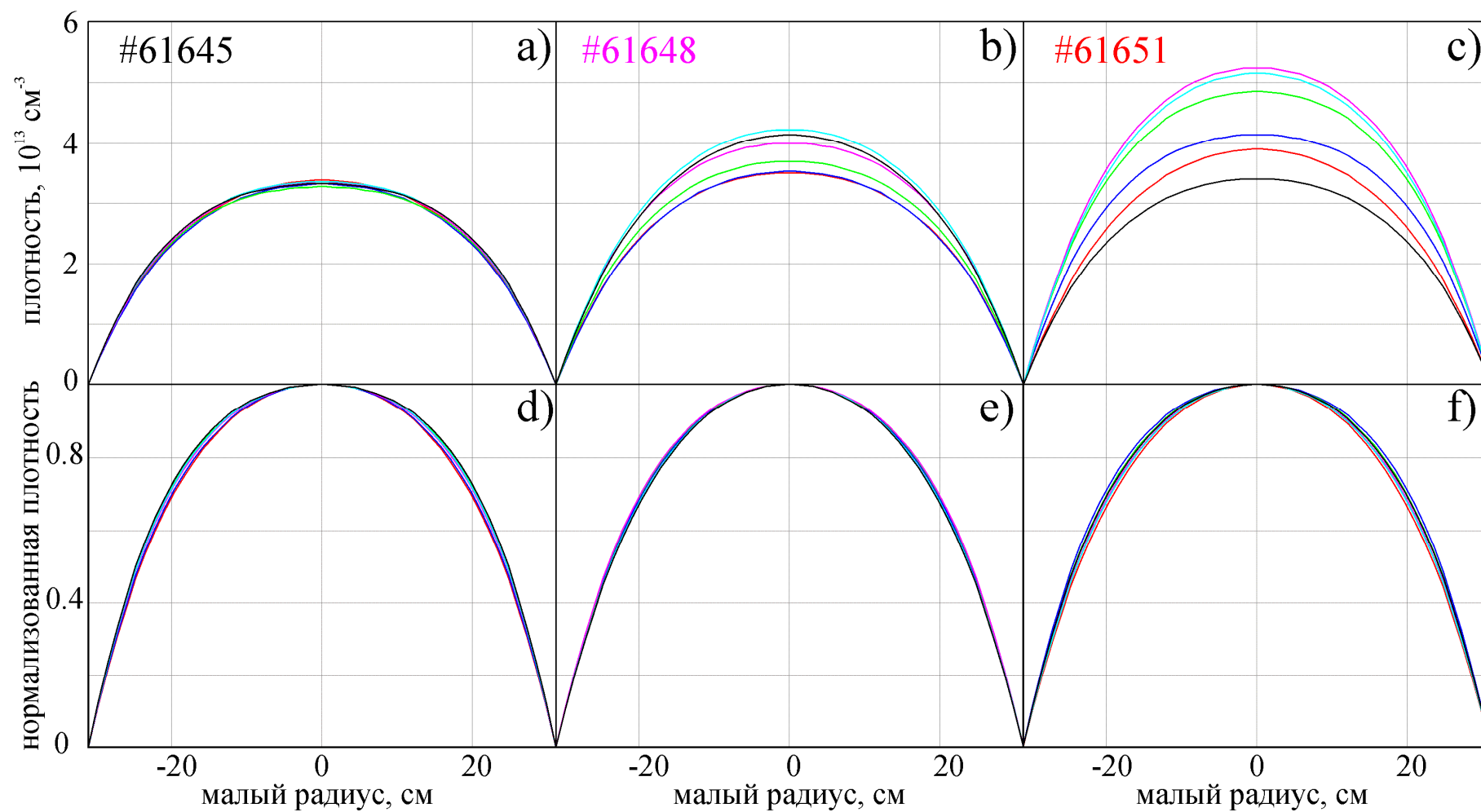


Рис. 4.16. Абсолютные и нормализованные абелизированные профили плотности для реперного разряда 61645 и разрядов с литиевой инжекцией 61648 и 61651. Снятые в разные моменты времени профили изображены разными цветами (красный – 550 мс, синий – 600 мс, зеленый – 650 мс, фиолетовый – 700 мс, голубой – 750 мс, черный – 800 мс).

Здесь, N_i – полное число частиц сорта « i », Γ_i^{out} – поток частиц из плазмы через LCMS – брался в виде N_i / τ_p , τ_p – время удержания частиц (полагалось одинаковым для всех сортов частиц и равным времени удержания энергии 30 мс, рассчитанному по скейлингу [40] для омического разряда Т-10), Γ_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.

Подобный подход в виде решения уравнения баланса использовался и в некоторых других работах ([53], [56]). При этом рассматривался баланс только ионов рабочего газа. В этих работах коэффициент R_D назывался коэффициентом рециклинга дейтерия, под которым на самом деле в большинстве работ понимается отношение потока рабочего газа с материальной стенки к потоку газа на стенку [40]. В общем случае введенный нами коэффициент R_D не тождественен такому коэффициенту рециклинга, но имеет с ним связь в зависимости от параметров пристеночной плазмы и условий отражения потока на материальных поверхностях. Поэтому ниже мы сравниваем измеряемый в нашей работе коэффициент R_D только со значениями «коэффициентов рециклинга рабочего газа», измеряемыми в других работах по методикам, аналогичным определению R_D .

Моделирование велось в два этапа – первый для разряда без лития, второй для разряда с инжекцией. На первом этапе для реперного разряда 61645 рассчитывалось содержание частиц для рабочего газа дейтерия и основной примеси (углерода). Вторым этапом выполнялся для разрядов с инжекцией лития, в ходе которого устанавливалось содержание дейтерия, углерода и лития, а также для проверки рассчитывался эффективный заряд.

Для подтверждения справедливости перехода к нульмерному приближению следует убедиться в том, что в ходе эксперимента форма профиля плотности менялась незначительно. Тогда можно перейти от рассмотрения радиально зависимых характеристик к усредненным по шнуру значениям.

Для того, чтобы определить содержание электронов N_e в плазме, необходимо рассмотреть эволюцию профилей электронной плотности. Они приведены на Рис. 4.16. для трех различных разрядов. Разные моменты времени изображаются разными цветами.

Из частей а) и d) Рис. 4.16. видно, что некоторые флуктуации профиля плотности происходят и в реперном разряде, без инжекции лития. Но их можно считать

пренебрежимо малыми по сравнению с возмущениями, наблюдаемыми при попадании в плазму потока лития (Рис. 4.16., график b). Тем не менее, если обратить внимание на график e) Рис. 4.16., где представлены нормализованные на центральное значение плотности профили, то становится очевидным, что они в данном случае изменяются весьма однообразно, не меняя своей характерной формы. Если еще больше увеличивать подачу лития (Рис. 4.16., график f), то можно отметить, что в области середины малого радиуса начинает возрастать возмущение формы профиля плотности. Тем не менее, несмотря на возникающее в ходе инъекции МГД-возмущение (см. Рис. 4.14. (h)), профиль плотности в целом сохраняет свою форму. Тем не менее такие разряды, как представлены на графиках c) и f) Рис. 4.16., в данной работе моделированию не подвергались. Для их описания требовалось бы развитие одномерной модели, что выходило за рамки задач диссертации. При переходе же инъекции от моды I к моде II будет меняться и сама форма профиля, что еще более затрудняет моделирование.

Таким образом, в случае умеренного вносимого литиевого потока в плазму можно считать, что относительный профиль плотности не изменяется во времени, что позволяет нам использовать нульмерное моделирование.

Таким образом, можно переходить к началу нульмерного моделирования. Для этого для разряда без лития записывается система из двух уравнений – для эффективного заряда и для содержания электронов в плазме в зависимости от времени:

$$Z_{eff} = \frac{N_D + Z_C^2 N_C}{N_e}$$

$$N_e = N_D + Z_C N_C$$

Здесь Z_C – заряд иона углерода, который в рамках данной модели был положен равным 6, то есть углерод считался полностью ионизированным. Электронная плотность и эффективный заряд плазмы определялись с помощью диагностического комплекса установки Т-10. То есть в результате первого шага можно было определить расчетные значения, например, для содержания углерода как $N_C = \frac{N_e(Z_{eff} - 1)}{Z_C(Z_C - 1)}$, а содержание дейтерия вычислить из выражения для полного числа электронов в плазме.

Затем записывалось уравнение баланса (4.1.) для содержания углерода в плазме. Таким образом, выраженный из него поток углерода внутрь плазмы $\Gamma_C^{in,wall}$, с одной стороны, можно было получить через рассчитанное на предыдущем шаге содержание углерода и численно взятую его производную по времени. С другой стороны, основным

источником углерода в условиях токамака Т-10 является углеродный лимитер, расположенный в сечении А (см. Рис. 4.5.). Поток, выходящий с его поверхности в плазму, полагался пропорциональным излучению на линии углерода, регистрируемому в сечении лимитера. Данное предположение является общепринятым и используется в целом ряде других работ по теме, например, [77], [91], [94]. Аналогичное предположение можно сделать и для лития. Тогда, сопоставляя временную эволюцию данных сигналов во времени на квазистационарной стадии разряда, можно найти значение коэффициента k_C , связывающего интенсивность излучения на линии углерода I_C с рассчитанным из баланса потоком углерода $\Gamma_C^{in,wall}$ (см. Рис. 4.17.). Полученный коэффициент будет использоваться и для случая разрядов с инжекцией лития.

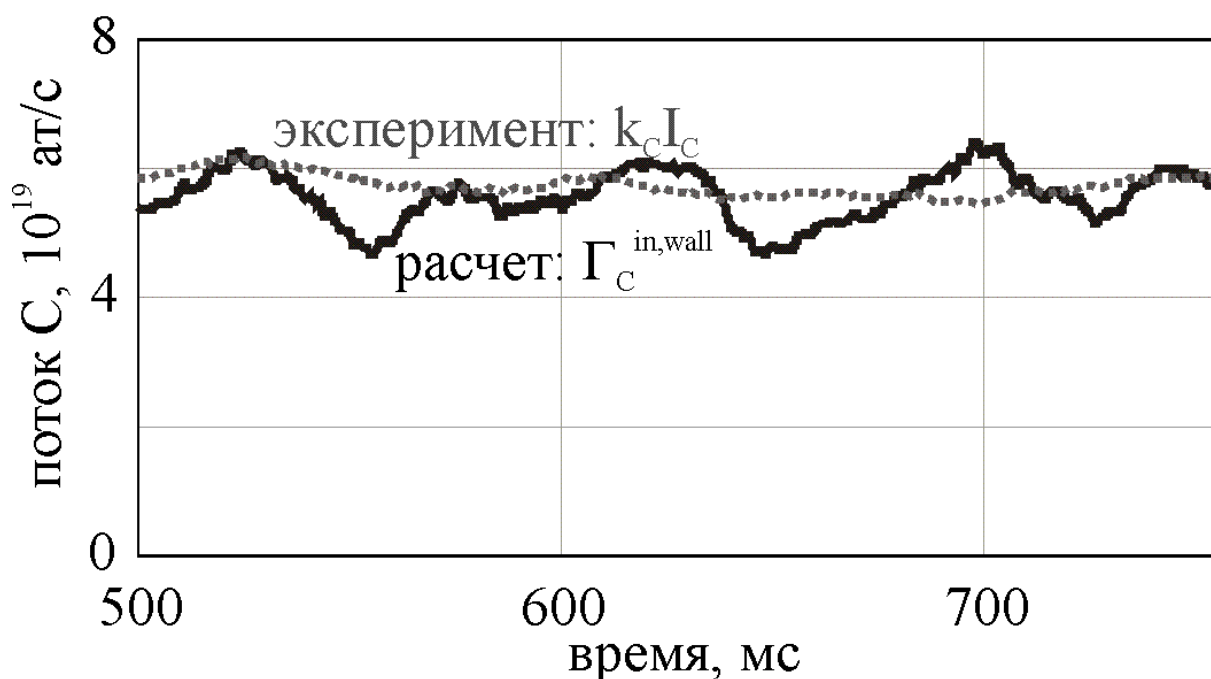


Рис. 4.17. Поток углерода в плазму в реперном разряде, рассчитанный из уравнения баланса типа (4.1.), и из интенсивности излучения на линии углерода, после подбора коэффициента пропорциональности k_C .

Далее необходимо было найти аналогичный коэффициент пропорциональности для излучения на линии дейтерия D_β . Здесь ситуация является более сложной, чем в случае углерода, так как для дейтерия есть два источника: газонапуск через клапан и рециклинг с обращенных к плазме элементов токамака. Последний источник также можно считать составным, разделив на основные участки - собственно поверхность первой стенки, рельсовый лимитер и кольцевая диафрагма. Для сопоставления вклада

от этих источников были использованы результаты экспериментов на Т-10, представленные в работе [57]. Камера, оборудованная сменным светофильтром (поз.6 на Рис. 4.5.), была расположена тангенциально к большому обходу плазмы и направлена на сечение «А» таким образом, чтобы наблюдать в том числе и выходное отверстие клапана газонапуска (поз.6 на Рис. 4.5.). Пример снимка камеры, сделанного на линии дейтерия в момент работы газового клапана на квазистационарной стадии типичного омического разряда, близкого по параметрам к тем, в которые производилась инжекция лития, приведен на Рис. 4.18., взятом из работы [57]. Ось токамака на снимке расположена слева, стенка его вакуумной камеры соответственно уходит налево. На правой стороне рисунка приведена шкала интенсивности излучения на линии D_α в относительных единицах.

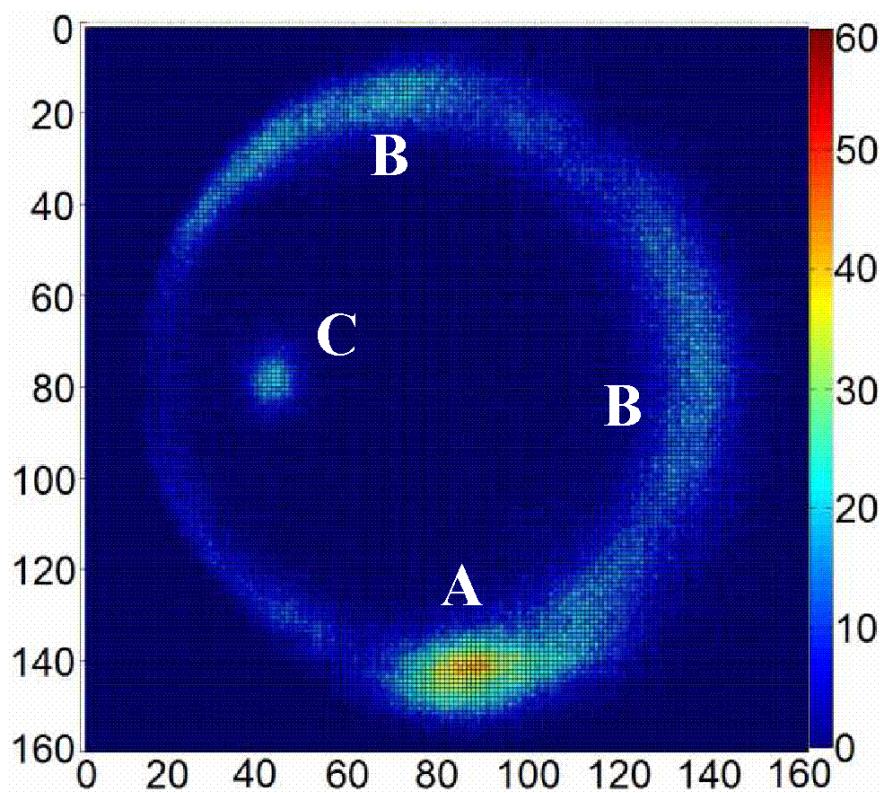


Рис. 4.18. Излучение на линии D_α в тороидальном сечении «А» токамака Т-10 во время газонапуска из работы [57]. Ось токамака расположена слева. А – рельсовый лимитер, В – кольцевая диафрагма, С – выход клапана газонапуска, расположенный в 45° вдоль тороидального обхода за сечением «А».

Из приведенного снимка видно, что главным источником дейтерия в разряде является рельсовый лимитер (обозначен на Рис. 4.18. буквой А), соответственно

определяющим процессом при этом является рециклинг. В целом заметен как вклад рециклинга с кольцевой диафрагмы (В), так и вклад газонапуска (С). Свечение со стенки весьма мало, и в нашем приближении им можно пренебречь.

Теперь можно перейти к рассмотрению уравнения баланса частиц для дейтерия, записанного в соответствии с формулой (4.1.):

$$\frac{dN_D}{dt} = \Gamma_D^{in,puff} + \Gamma_D^{in,wall} - \frac{N_D}{\tau_p} = \Gamma_D^{in,puff} + R_D \frac{N_D}{\tau_p} - \frac{N_D}{\tau_p} \quad (4.2.)$$

Здесь $\Gamma_D^{in,puff}$ обозначает поток дейтерия в разряд за счет работы газового клапана. Таким образом, в записи (4.2.) уравнение баланса распадается на однозначно интерпретируемые члены: приток из газового клапана, приток с элементов камеры токамака $\Gamma_D^{in,wall}$, выражаемый через время удержания частиц и коэффициент R_D , и сток за счет ухода дейтерия из разряда с характерным временем τ_p .

Поток дейтерия $\Gamma_D^{in,puff}$ в основном рабочем диапазоне газового клапана пропорционален напряжению на нем (Рис. 4.6. (d)), коэффициент пропорциональности был вычислен, исходя из данных по потоку через газовый клапан, приведенных в работе [57]. Содержание дейтерия N_D бралось из результатов расчета на первом шаге. Поток же $\Gamma_D^{in,wall}$ полагался, как и для углерода, пропорциональным интенсивности излучения $I_{D\beta}$ на линии дейтерия с коэффициентом пропорциональности k_D , который вычислялся в заключении первого этапа моделирования (см. Рис. 4.19.). Интенсивность излучения дейтерия измерялась в сечении «А», где располагались основные источники дейтерия за счет выхода с обращенных к плазме компонентов первой стенки.

Таким образом, в ходе выполнения первого этапа моделирования было произведено описание содержания дейтерия и углерода в реперном (без инжекции лития) разряде токамака Т-10, и найдены параметры потоков дейтерия и углерода, которые будут использоваться на этапе моделирования разряда с литием.

4.2.2.2 Моделирование разряда с инжекцией лития.

Второй этап процесса моделирования производился для разрядов с инжекцией литиевой пыли в плазму. В качестве примера в данном параграфе рассматриваются результаты, полученные для разряда 61648.

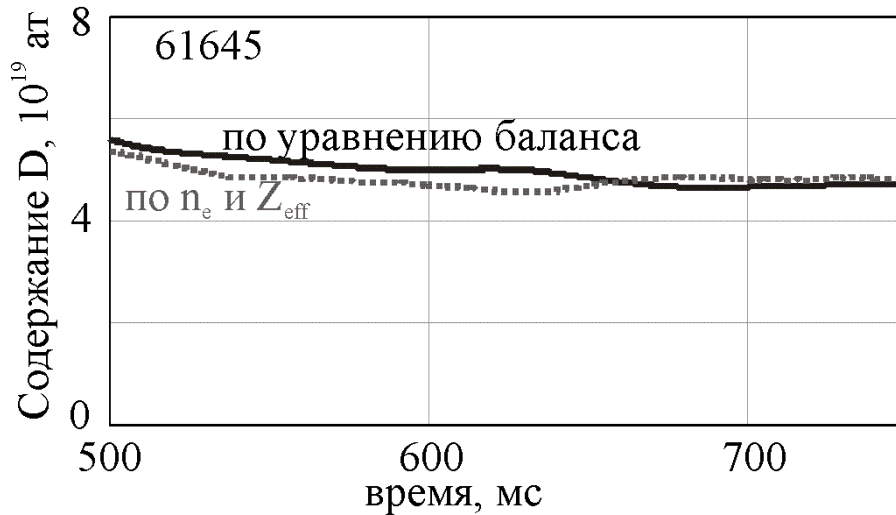


Рис. 4.19. Содержание дейтерия в реперном разряде, рассчитанное из расчета по плотности и эффективному заряду, и из уравнения баланса дейтерия (4.2.), после подбора коэффициента пропорциональности k_D между интенсивностью излучения на линии D_β и потоком $\Gamma_D^{in,wall}$.

Сначала было выполнено численное решение уравнения (4.2.) для баланса дейтерия в плазме разряда с инжекцией. Аналогичным образом находится и содержание углерода в разряде. Результаты расчетов приведены на Рис. 4.20. (фиолетовые кривые на частях а) и б) соответственно), где они изображены в сравнении с содержанием дейтерия и углерода для разряда без лития (черные кривые). Заметно, что, примерно с 600 мс, начинает наблюдаться довольно заметное снижение содержания дейтерия, углерод же исчезает менее быстро.

Далее производится вычисление содержания атомов лития в разряде при использовании условия квазинейтральности $3N_{Li} = N_e - N_D - 6N_C$ в приближении полностью ионизованных лития и углерода. Временная эволюция рассчитанных плотностей электронов, произведенных дейтерием, литием и углеродом (N_D , $3N_{Li}$, $6N_C$), нормированных на содержание электронов в плазме, показано на Рис. 4.21. штриховыми кривыми для реперного импульса 61645 и сплошными кривыми для импульса 61648 с инжекцией литиевой пыли. Видно, что во время литиевой инжекции содержание электронов от углерода снижается лишь незначительно, не более чем на 7%, в то время как содержание дейтерия падает примерно в 2 раза. Этот результат сходен с оценками, сделанными для случая инжекции литиевых макрочастиц в плазму Т-10, представленными в Разделе 4.1.2. Там при незначительном снижении содержания дейтерия в плазме после литиизации ухода углерода практически не наблюдалось.

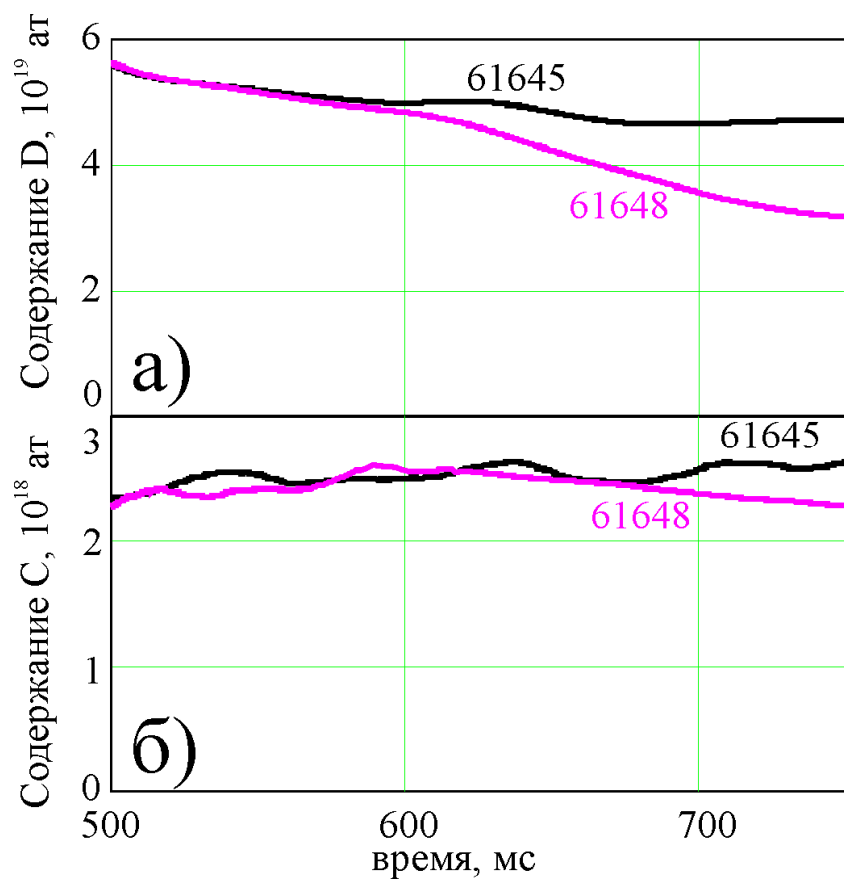


Рис. 4.20. Содержание дейтерия (а) и углерода (б), рассчитанные по нульмерной модели, в реперном разряде 61645 (черные кривые), и одном из разрядов с инъекцией лития 61648 (фиолетовые кривые).

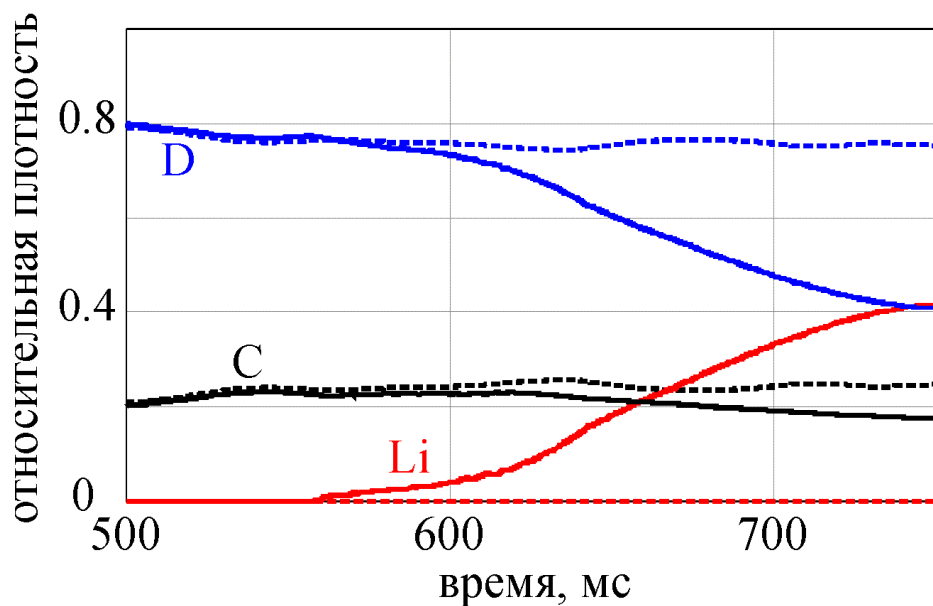


Рис. 4.21. Относительные плотности дейтерия, углерода и лития в разряде 61645 (без инъекции, штриховые кривые), и разряде 61648 (с инъекцией, сплошные кривые).

В заключении моделирования осуществлялась самопроверка. Для этого по полученным данным о содержании дейтерия, лития и углерода в плазме в соответствии с определением рассчитывался эффективный заряд плазмы и сопоставлялся с измеренным по излучению на линии континуума (Рис. 4.22.). Очевидно, что результаты расчета весьма неплохо воспроизводят экспериментальные данные. Некоторая недооценка роста заряда может происходить за счет внесения ионов кислорода в оболочке из Li_2CO_3 , покрывающей металлическую литиевую пыль (см. Раздел 2.1.5.1.). Эта добавка в данных расчетах в учет не бралась.

Еще одним методом проверки результатов разработанной модели является воспроизведение эволюции интенсивности излучения лития во время инъекции. Для этого в уравнение баланса (4.1.) для лития подставлялась рассчитанная временная зависимость содержания лития в плазме и численно полученная производная этой зависимости. Поток лития со стенки в плазму в условиях Т-10, когда температура первой стенки не настолько высока, чтобы привести к заметному испарению лития, можно положить низким [131], поэтому в расчетах использовалось $R_{Li} = 0.1$.

Результаты сравнения потоков лития, демонстрирующие разумное совпадение эволюции параметров, приведены на Рис. 4.23.

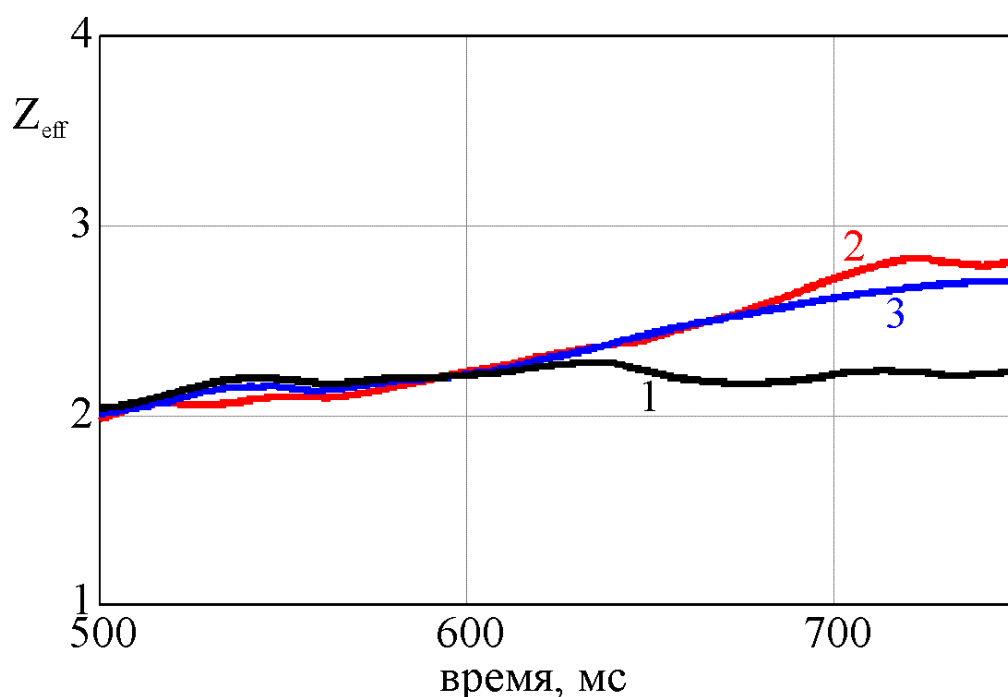


Рис. 4.22. Эффективный заряд в разряде 61645 (без инъекции, кривая 1), и разряде 61648 (с инъекцией, кривая 2), полученные по интенсивности излучения на линии континуума; а также рассчитанный по содержанию D, Li, C в разряде 61648 (кривая 3).

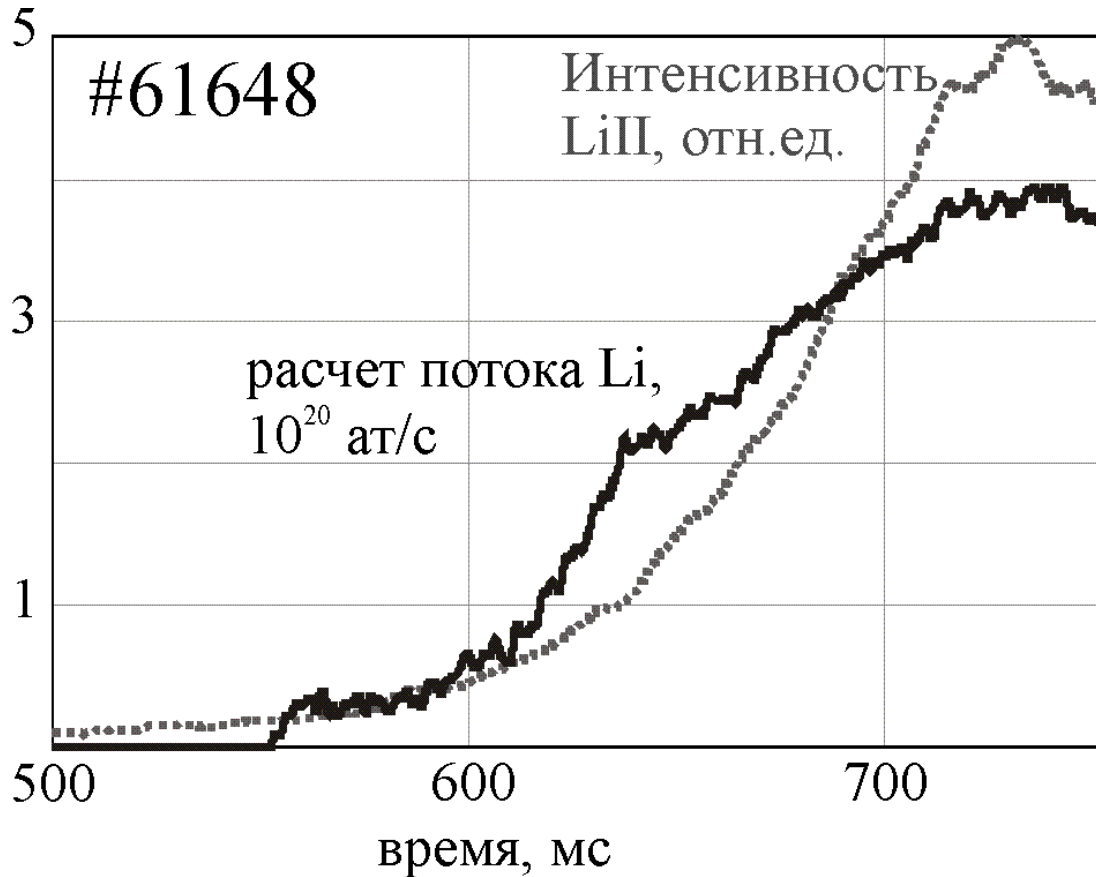


Рис. 4.23. Сравнение потока лития, полученного из нульмерной модели баланса частиц (сплошная кривая) и интенсивности излучения лития из плазмы (пунктирная кривая).

Кроме того, теперь можно, вернувшись к уравнению (4.2.), оценить изменение коэффициента R_D в плазме во время инъекции лития. Как уже отмечалось в Разделе 4.2.2.1., поток дейтерия в плазму со стенки можно записать как $\Gamma_D^{in,wall} = R_D \frac{N_D}{\tau_p} = k_D I_{D\beta}$.

Таким образом, с использованием найденной зависимости содержания дейтерия в плазме от времени, была получена эволюция R_D , представленная на Рис. 4.24. Красной чертой в верхней части рисунка показан период инъекции литиевой пыли. Видно, что на максимуме инъекции, в районе 700 мс, в данном разряде R_D снижается с 0.93 до 0.83. Такое изменение находится в хорошем соответствии с оценками для «коэффициента рециклинга дейтерия» в токамаке Т-10 после литиизации с помощью литиевого испарителя [57] (см. Рис. 1.3.).

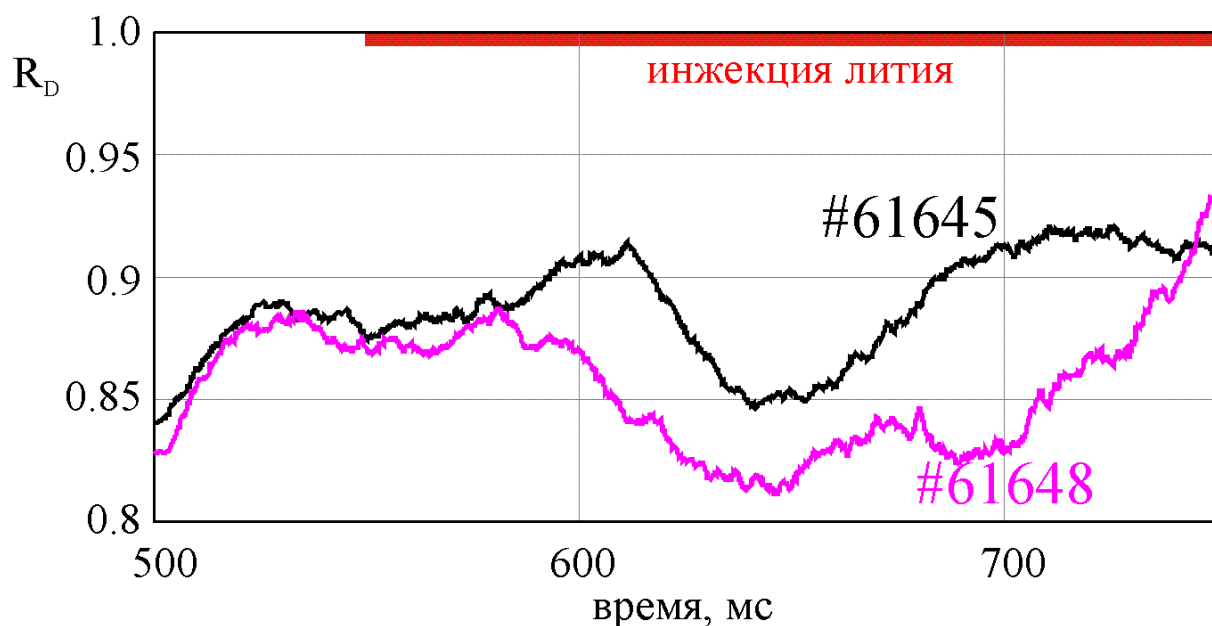


Рис. 4.24. Расчет эволюции коэффициента R_D в реперном разряде 61645 (черная кривая) и в разряде с инъекцией лития 61648 (фиолетовая кривая).

Воспользовавшись тем, что на 800 мс разряда газовый клапан отключался (см. Рис. 4.6. (d)), а к 900 мс прекращалось внесение лития в плазму, можно было также оценить изменение R_D по характерному времени распада плотности плазмы в соответствии с формулой (4.2.) при нулевом $\Gamma_D^{in,puff}$. Сопоставление результатов для серии разрядов, в которых не было значительного изменения формы профиля плотности плазмы, и к которым можно было применить нульмерное моделирование, иллюстрирует Таблица 4.1.

Таблица 4.1. Количество инжектированных атомов лития N_{Li} , и значения коэффициента R_D , полученные из баланса частиц и из характерного времени распада плотности после выключения газонапуска, соответственно. Погрешность результата вычислялась методом варьирования входных параметров расчета в пределах их неопределенностей.

Номер импульса	$N_{Li}, 10^{19}$ ат.	R_D (из баланса частиц, на 700 мс)	R_D (из анализа распада, 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

Из данных таблицы видно, что значения коэффициента R_D коррелируют с количеством внесенного в плазму лития, причем корреляция прослеживается при использовании двух разных методов. В реперном разряде расхождение между методиками составляет 2%, что может объясняться как погрешностями, так и большим насыщением элементов первой стенки дейтерием к концу разряда. Увеличенная еще на 2-4% разница между оценками в разрядах с инъекцией лития объясняется тем, что расчет из баланса частиц производился на максимуме инъекции, в то время как расчет из распада плотности – на 200 мс позже, когда литий уже уходит из разряда. Эту тенденцию можно заметить и в данных Рис. 4.24.

4.2.3 Обсуждение результатов.

Применение литиевой пылевой инъекции имеет одну явную отрицательную сторону: снижение коэффициента R_D происходит одновременно с ростом эффективного заряда плазмы Z_{eff} за счет замещения части дейтерия литием при довольно слабом выводе из плазмы углерода (см. Рис. 4.21.). Эту взаимосвязь иллюстрирует Рис. 4.25.

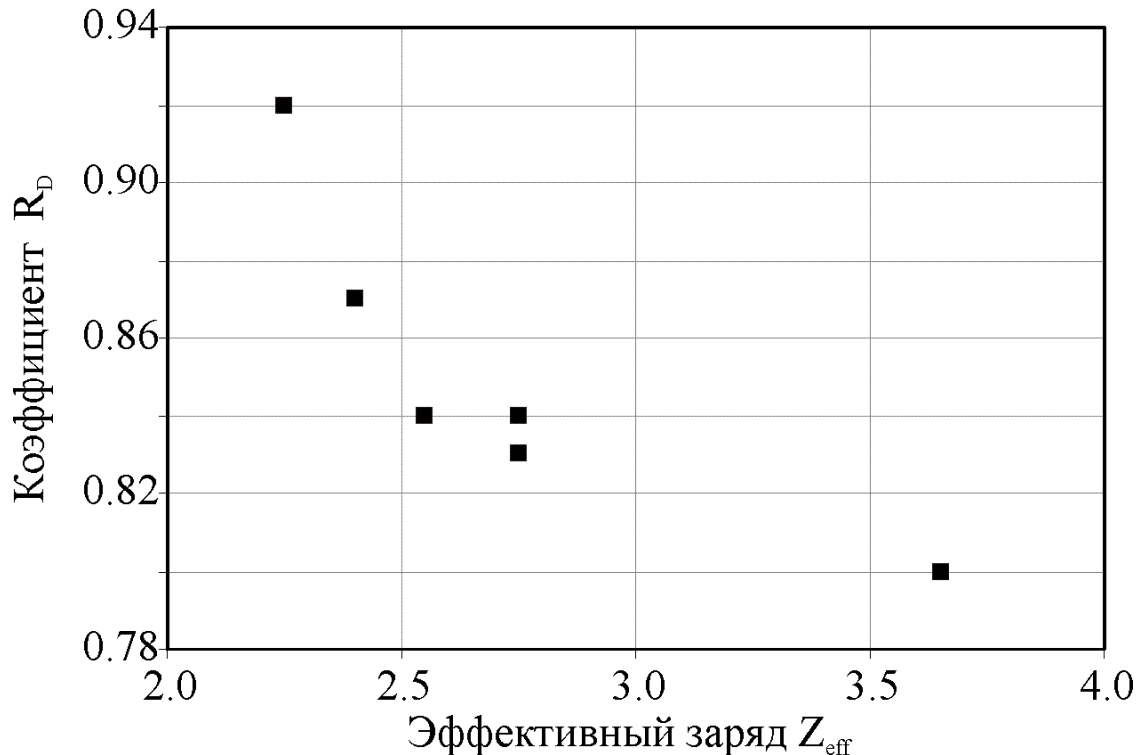


Рис. 4.25. Значения R_D , полученные методом инъекции литиевой пыли при различных количествах внесенного вещества, в зависимости от эффективного заряда плазмы Z_{eff} . Данные приведены для момента максимального потока лития в плазму.

Коэффициент R_D определялся по балансу частиц, но аналогичную картину можно построить и по оценкам его из характерного времени распада плазмы. Точка, соответствующая реперному разряду 61645, по отношению к которому производилась оптимизация параметров плазмы, находится в левом верхнем углу графика. Видно, что методом инъекции литиевой пыли R_D можно снизить с 0.92 до 0.8. Далее способ становится малоприменимым, так как большие потоки приводят к сильным МГД-возмущениям разряда и к возможному развитию срыва. Снижение R_D до уровня 0.86 достигается ценой лишь небольшого повышения эффективного заряда. Следствием дальнейшего снижения коэффициента R_D является заметный рост эффективного заряда. Таким образом, при использовании инъекции литиевой пыли для управления параметрами разряда необходимо принимать во внимание оба происходящих процесса и, исходя из этого, выбирать желаемые настройки системы инъекции.

Любопытно было бы сравнить описанные выше результаты с теми, которые были получены при применении других методик. Например, в Разделе 4.1. описаны эксперименты по литиевой пеллет-инъекции в плазму T-10, в том числе и в омические разряды с близкими параметрами. В результате серии из 4 одиночных инъекций (примерно по $2 \cdot 10^{19}$ атомов лития каждая) был зарегистрирован спад коэффициента R_D до значения 0.99, что было ниже уровня реперного разряда. В нем на стадии выключенного газонапуска даже наблюдался рост плотности за счет потока с элементов первой стенки с $R_D = 1.01$. Заметного роста эффективного заряда при этом не наблюдалось. Однако при столь небольшом кондиционировании такового не было отмечено и в случае инъекции литиевой пыли, где заметный рост Z_{eff} начинался при снижении R_D более чем на 0.05 (см. Рис. 4.25.). При этом количество инжестируемого вещества составило $8 \cdot 10^{19}$ атомов, что заметно выше, чем расход при инъекции литиевой пыли (Таблица 4.1.).

Общей особенностью проведенных экспериментов является то, что подавление излучения на линии углерода невелико и составляет около 7% в случае инъекции литиевой пыли, в то время как при инъекции литиевых макрочастиц эффект совсем мал и теряется на уровне шумов. Данное наблюдение противоречит, например, результатам установки EAST [54], где содержание углерода снижалось на порядок. Однако при литиизации камеры T-10 с помощью литиевого испарителя, как указано в работе [51], снижение содержания углерода оказалось заметно меньшим по сравнению с прочими примесями. Авторы объясняют это недостаточностью количества

внесенного лития, а также особенностями зависимости интенсивности излучения углерода от температуры [51].

Можно также сопоставить результаты пылевой инъекции с теми, которые были получены на том же токамаке с помощью литиевого испарителя (см. Раздел 1.2.1.1. диссертации и работу [57]). Как видно из Рис. 1.3., после сеанса испарения, проводившегося перед началом рабочего дня установки, «коэффициент рециклинга дейтерия» 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. Стоит отметить также, что за одну процедуру испарения обычно расходовался 1 грамм лития (свыше 8.5×10^{22} атомов), что на три порядка больше, чем при вышеописанных методах внесения лития непосредственно в разряд.

Необходимо также отметить, что в ходе экспериментов практически не было зарегистрировано кумулятивного эффекта накопления лития на обращенных к плазме поверхностях. Это должно было бы наблюдаться в виде увеличения от импульса к импульсу интенсивности фонового (до начала инъекции в текущий разряд) излучения на линиях лития с лимитеров. Основной причиной отсутствия данного явления может считаться специфический сценарий выключения разряда на T-10, который обычно заканчивается большим срывом. Можно ожидать, что при этом лимитер, как наиболее близко подходящая к плазме часть первой стенки, подвергается сильному воздействию потоков тепла и плазмы. Эти процессы очищают поверхность от высадившегося небольшого (по сравнению со случаем испарителя) количества лития практически полностью, тем самым возвращая ситуацию с покрытием от разряда к разряду к исходным условиям.

Проиллюстрировать эту ситуацию можно с помощью подборки кадров наблюдающей сечение «А» видеокамеры со светофильтром на линию LiII (отметка 6 в схеме эксперимента на Рис. 4.5.), которая представлена на Рис. 4.26. Более темные области соответствуют более сильной интенсивности излучения линии лития. При вычислении интенсивности засветки из области кольцевой диафрагмы был учтен и тот факт, что по мере работы камеры фоновая засветка матрицы постепенно увеличивалась, причем неравномерно по области кадра. Для этого для каждого из исследуемых кадров в процессе обработки строились фоновые профили засветки вдоль вертикальной оси. Выполнялось это следующим методом: в правой части кадра на небольшом удалении от отмеченной черным кружком исследуемой зоны (вне области засветки литием из

плазмы) бралось 11 столбцов, и значения интенсивности усреднялись вдоль каждого из 256 горизонтальных рядов. Полученный профиль фона вдоль вертикальной оси снимка вычитался из засветки кадра. Затем в области экваториальной плоскости в обведенной черным кругом на Рис. 4.26. зоне вычислялась средняя интенсивность излучения по квадрату 11×11 пикселей. Примеры полученных значений приведены на рисунке.

Действительно, в начале рабочего дня в реперном импульсе уровень излучения с диафрагмы находится практически на уровне фона. Затем во время каждой инжекции происходит нарастание излучения из данной области, максимум его совпадает с максимумом потока вносимого вещества. Со снижением потока лития в плазму интенсивность излучения лития уменьшается. Однако при окончании разряда, когда плазма начинает поступать на систему лимитеров, интенсивность излучения LiII с них под действием возрастающего потока тепла снова возрастает до значений, соответствующих уровню максимальной инжекции, что свидетельствует о значительном уходе лития с диафрагмы. На начале квазистационарной стадии следующего разряда, до начала инжекции, уровень излучения лития оказывается весьма малым, что свидетельствует о том, что значительная часть литиевого покрытия испарилась в процессе срыва. Следовательно, ожидать заметного кумулятивного эффекта для лития на системе лимитеров для потоков, присущих системе пылевой инжекции, в условиях характерного сценария разряда токамака T-10 не приходится. Возможный путь решения этой проблемы в дальнейшем можно предложить, базируясь на технологию, описанную в работе [91]. На токамаке TFTR разряд зажигался в области внешнего лимитера, затем на время литиизации смещался к внутреннему лимитеру, в результате чего создавались условия для высаживания на него Li из плазмы, после чего разряд оканчивался снова на внешнем лимитере. Использование двух лимитеров и методики смещения шнура в течение импульса обсуждается в настоящее время.

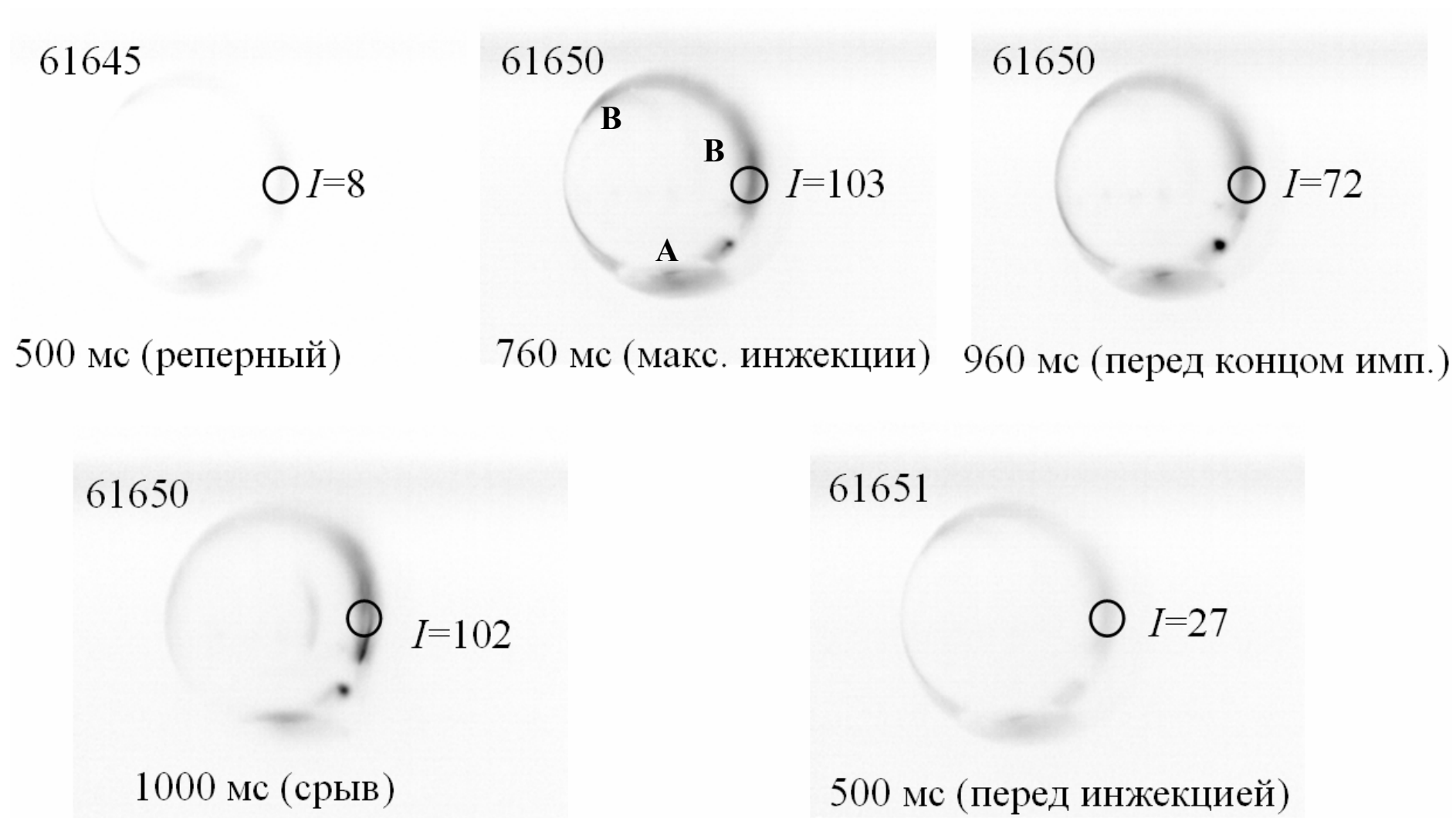


Рис. 4.26. Изменение средней интенсивности излучения на линии LiII в сечении «А» как в ходе разряда, так и от разряда к разряду. На снимках можно различить основные области высаживания лития – рельсовый лимитер (А) и кольцевая диафрагма (В).

Таким образом, в завершении данного раздела можно сформулировать следующие выводы.

Были проведены эксперименты по инъекции литиевой пылевой струи в плазму токамака. Во-первых, была подтверждена совместимость такого способа инъекции лития как с омическими разрядами, так и с ЭЦР нагревом: разряд в случае разумных потоков вносимого вещества не претерпевает серьезных МГД-возмущений.

Во-вторых, удалось сделать некоторую оценку пределов применимости метода. Для того, чтобы с помощью инъекции литиевых макрочастиц вносить достаточно большие количества лития, приходилось использовать крупные макрочастицы. Это приводило к возрастанию частоты срывов. Аналогичная проблема возникала при инъекции литиевой пыли при значительно более высоких (в 5 раз больше) количествах внесенного вещества, что позволило добиться при литиевой пылевой инъекции заметно большего снижения R_D .

В-третьих, в результате обработки полученных экспериментальных данных была разработана нульмерная модель на базе уравнений баланса частиц для описания поведения дейтерия, лития и углерода на квазистационарной стадии разряда T-10. С ее помощью, кроме эволюции ионного состава плазмы, удалось оценить также коэффициент R_D , который удавалось снизить с исходной величины 0.92 вплоть до значений около 0.80. Продемонстрирована взаимосвязь этого снижения с количеством внесенного в плазму вещества.

В-четвертых, при инъекции потоков лития, обеспечивающих снижение R_D ниже уровня 0.86, отмечен заметный рост эффективного заряда плазмы. Это не очень хорошо с точки зрения предпочтительных условий для термоядерной плазмы ITER, где эффективный заряд обычно требуется меньше 2 [132]. Однако в условиях установки DEMO Z_{eff} планируется на уровне 2.6-2.7 [133] для переизлучения энергии из основного объема с целью защиты дивертора. Для достижения этого предполагается внесение примесей благородных газов – Ne, Ar, Kr, Xe [134]. Однако сами же авторы цитируемой работы указывают, что пока неясно, применимы ли все перечисленные вещества с точки зрения безопасности термоядерного реактора. Инжекция литиевой пыли же видится более надежным методом создания периферийного переизлучающего слоя [45]. Кроме того, в условиях стационарного разряда с длительным горением такой метод инъекции можно будет применять для подготовки основной стадии разряда, используя его быстрый уход из плазмы на элементы первой стенки за счет низкого рециклинга лития.

4.3 Перспективы использования лития в современных термоядерных установках.

Разрабатываемые литиевые технологии могут иметь большое приложение в будущем. Без литиевого покрытия первой стенки установки типа компактного источника нейтронов не будут функционировать, так как ларморовский радиус альфа-частиц сравним с малым радиусом такой установки, удержание альфа-частиц в них затруднено, и стенка будет подвергаться постоянной бомбардировке ими. Чтобы не происходило разрушения ее кристаллической структуры, предлагается покрывать ее литием. В установках большего размера проблему будут представлять ELM, ассоциируемые с H-модой. Они будут приводить к эрозии первой стенки, методом борьбы с которой опять же могут являться восстанавливаемые литиевые покрытия.

Покрытие диверторных пластин жидким литием рассматривается как один из способов решения проблемы циркуляции тепла и частиц в периферийной плазме термоядерного реактора. Важной проблемой является недопущение поступления в зону термоядерной реакции лития, используемого для снятия тепловой нагрузки с пластин дивертора. При расчетных тепловых нагрузках ожидается, что температуры там будут приводить к значительному испарению лития [47]. Для того, чтобы минимизировать попадание испаряющегося с поверхности лития в горячие области плазмы, в работах [135] и [136] предложено и проанализировано устройство так называемого lithium evaporation box. В нем используется система типа дифференциальной откачки, наполненная парами лития, а плазма SOL поступает вдоль сепаратрисы в последнюю камеру этого устройства. Приведенные в данных работах оценки показывают, что оно достаточно перспективно для решения указанных проблем. Расчетная тепловая нагрузка на стенки конструкции не должна превысить 2.5 МВт/м^2 , что приемлемо с точки зрения современных технологий. Однако требуемая экспериментальная верификация такой системы пока не проведена.

Заключение

Детально рассмотрены различные методики внесения примеси в высокотемпературную плазму установок с магнитным удержанием. Исследованы особенности поведения в плазме различных веществ (лития, углерода). Продемонстрированы положительные эффекты, наблюдаемые при использовании лития в качестве материала, позволяющего как улучшать управляемость разряда, так и способствовать более длительному и безопасному функционированию термоядерных установок.

Описаны экспериментальные установки (токамак T-10 и стелларатор Wendelstein 7-AS) и оборудование, применявшееся для внесения примесей в них: газокINETический инжектор, инжектор струи расплавленного лития, инжектор литиевой пылевой струи.

На токамаке T-10 был исследован характер испарения углеродной макрочастицы в зависимости от ее размера. В случае крупных макрочастиц на радиальном профиле скорости испарения наблюдалось множество пиков. Анализ данных ЭЦИ обнаружил локальные быстрые перестройки профиля электронной температуры, характерные времена которых на некоторых малых радиусах оказываются в несколько раз меньше таковых, ожидаемых из скорости макрочастицы. При постоянных параметрах омической плазмы, скачки на профиле скорости испарения появляются, когда размер макрочастицы превышает пороговое значение около 0.3 мм. Сделано предположение, что макрочастица инициирует МГД-процессы на поверхностях с рациональными значениями q . Предложена модель, описывающая испарение в случае перезамыканий, инициируемых макрочастицей. Эта модель разумно воспроизводит наблюдаемую форму профиля скорости испарения.

Был обнаружен и исследован новый тип испарения углеродных макрочастиц в плотной плазме стелларатора Wendelstein 7-AS с мощным NBI-нагревом. В отличие от обычного испарения в форме атомов или кластеров, этот тип испарения характеризуется эмиссией маленьких (несколько десятков микрон) углеродных фрагментов с поверхности макрочастицы. Были оценены скорости (~ 250 м/с) и размеры (~ 40 мкм) эмитируемых «микропеллетов». Локально повышенная скорость испарения за счет «микропеллетов» изменяет распределение количества испаренного вещества вдоль траектории макрочастицы.

Была проведена инъекция литиевых макрочастиц диаметром 0.75 мм и длиной до 1 мм (2×10^{19} ат.) в плазму токамака T-10 для исследования эффекта кондиционирования стенки. Были обнаружены довольно слабые признаки кондиционирования, коэффициент R_D уменьшился с 1.01 до 0.99. Более заметное влияние было отмечено при применении инжектора литиевой пылевой струи на основе принципа вращающегося дозатора, который был недавно разработан, изготовлен и установлен на токамаке T-10.

В процессе экспериментов по внесению литиевой пыли была установлена совместимость инъекции как с омическим разрядом T-10, так и с разрядом с дополнительным электрон-циклотронным нагревом. Найдены предельно допустимые максимальные значения потоков вносимого лития при инъекции и соответствующие им средние по времени значения: при максимальных потоках свыше 10×10^{20} ат/с происходит срыв разряда, максимальные потоки ниже 5×10^{20} ат/с не приводят к значительному МГД-возмущению плазмы.

Была разработана нульмерная модель для описания поведения ионов дейтерия, лития и углерода в плазме T-10 во время инъекции. Падение рециклинга можно наблюдать по заметному понижению потока дейтерия с элементов первой стенки во время инъекции. Рассчитана эволюция коэффициента R_D на квазистационарной стадии разряда. Он снижался с исходного уровня 0.92 до значений 0.80-0.87 в зависимости от количества вносимого лития (от 1.2 до 10.0×10^{19} ат.). Полученные данные сопоставимы с результатами, полученными как на T-10 в случае использования литиевого испарителя, так и на ряде других установок. Снижение содержания углерода, в свою очередь, оказывается незначительным для случая инъекции литиевой пылевой струи и недетектируемым при инъекции литиевых макрочастиц. Это заметно отличается от результатов, полученных на других установках, например, EAST, и, по-видимому, является характерным для T-10, так как и в случае экспериментов с литиевым испарителем углерод подавлялся слабо [51].

Как в случае инъекции литиевых макрочастиц, так и в случае инъекции литиевой пыли кумулятивного эффекта влияния лития в экспериментах на T-10 не наблюдалось. Это можно связать со специфическим сценарием выключения разряда T-10 с инициацией большого срыва.

Благодарности

Я хотел бы выразить признательность сотрудникам и студентам кафедры физики плазмы ИФНиТ СПбПУ за результативную совместную работу, за обсуждение результатов и за оказанную ими помощь. Особо благодарен своему научному руководителю Сергееву Владимиру Юрьевичу за постановку задач, за плодотворные дискуссии и конструктивную критику, а также за долготерпение. Хотел бы отметить поддержку Рожанского Владимира Александровича, Тимохина Владимира Михайловича, Шарова Игоря Александровича, Быкова Алексея Сергеевича. Без них выполнение данной работы было бы крайне затруднительным.

Хотел бы также поблагодарить сотрудников Курчатовского института Кутеева Бориса Васильевича, Крылова Сергея Вячеславовича и Крупина Вадима Александровича за неоценимую помощь в подготовке, проведении экспериментов на токамаке Т-10 и обсуждении их результатов, а также прочих сотрудников этой установки за предоставление данных своих диагностик. Благодарю сотрудников предприятия «Красная Звезда» Люблинского Игоря Евгеньевича и Верткова Алексея Викторовича за консультации по технике работы с литьем. Признателен также профессору Фридриху Вагнеру за обсуждение промежуточных результатов и за заряд оптимизма, необходимый для завершения этой работы.

Также хотел поблагодарить членов моей семьи за то, что они с пониманием относились к моим постоянным поздним приходам с работы, частым командировкам и прочему пренебрежению семейными обязанностями.

Список литературы

- [1] Merola M., Dänner W., Pick M. EU R&D on divertor components // Fusion Engineering and Design, 2005, Vol.75–79, p.325.
- [2] Kessel C. E., Poli F. M., Ghantous K., et al. Physics basis for an advanced physics and advanced technology tokamak power plant configuration: ARIES-ACT1 // Fusion Science and Technology, 2015, Vol.67, p.75.
- [3] Snipes J. A., Marmar E. S., Terry J. L., et al. Wall conditioning with impurity pellet injection on TFTR // Journal of Nuclear Materials, 1992, Vol.196-198, p.686.
- [4] Mansfield D. K., Roquemore A. L., Carroll T., et al. First observations of ELM triggering by injected lithium granules in EAST // Nuclear Fusion, 2013, Vol.53, p.113023.
- [5] Osborne T. H., Jackson G. L., Yan Z., et al. Enhanced H-mode pedestals with lithium injection in DIII-D // Nuclear Fusion, 2015, Vol.55, 063018.
- [6] Hu J. S., Ren J., Sun Z., et al. An overview of lithium experiments on HT-7 and EAST during 2012 // Fusion Engineering and Design, 2014, Vol.89, p.2875.
- [7] Дремин М. М., Капралов В. Г., Кислов А. Я., и др. Влияние напуска благородных газов на срыв разряда в токамаке Т-10 // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 4, с.58.
- [8] Krashennnikov S. I., Kukushkin A. S., Pshenov A. A. Divertor plasma detachment // Physics of Plasmas, 2016, Vol.23, 055602.
- [9] Кутеев Б. В., Сергеев В. Ю., Цендин Л. Д. О взаимодействии углеродных макрочастиц с высокотемпературной плазмой // Физика плазмы, 1984, т. 10, вып. 6, с. 1172.
- [10] Parks P. B., Leffler J. S. and Fisher R. K. Analysis of low Z_a impurity pellet ablation for fusion diagnostic studies // Nuclear Fusion, 1988, Vol.28, p.477.
- [11] Mazzitelli G., Hirooka Y., Hu J. S., et al. Conference Report on the 3rd International Symposium on Lithium Application for Fusion Devices // Nuclear Fusion, 2015, Vol.55, p.027001.
- [12] Кутеев Б.В. Диагностика плазмы методом пеллет-инжекции // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 1986, вып. 3, с.3.
- [13] Кутеев Б.В. Технологии для термоядерных реакторов, базирующиеся на инжекции макрочастиц // Журнал технической физики, 1999, т. 69, № 9, с.63.

- [14] Тимохин В. М. Исследование быстрых электронов и процесса выключения разряда методом инжекции макрочастиц в установках с магнитным удержанием плазмы : Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, 2003, Санкт-Петербург.
- [15] Maqueda R. J., Wurden G. A., Stotler D. P., et al. Gas puff imaging of edge turbulence // *Review of Scientific Instruments*, 2003, Vol.74, p.2020.
- [16] Timchenko N., Vershkov V., Karakcheev V., et al. Experimental study of particles and heat transport in T-10 Ohmic plasmas / 36th EPS Conference on Plasma Phys., Sofia, 29 June - 3 July 2009, P5.196.
- [17] Lehnen M., Alonso A., Arnoux G., et al. Disruption mitigation by massive gas injection in JET // *Nuclear Fusion*, 2011, Vol.51, p.123010.
- [18] Kallenbach A., Dux R., Fuchs J. C., et al. Divertor power load feedback with nitrogen seeding in ASDEX Upgrade // *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2010, Vol.52, 055002.
- [19] Marmar E. S., Cecchi J. L., Cohen S. A. System for rapid injection of metal atoms into plasmas // *Review of Scientific Instruments*, 1975, Vol.46, p.1149.
- [20] Gao C., Rice J. E., Sun H. J., et al. Non-local heat transport in Alcator C-Mod ohmic L-mode plasmas // *Nuclear Fusion*, 2014, Vol.54, p.083025.
- [21] Mansfield D. K., Johnson D. W., Grek B., et.al. Observations concerning the injection of a lithium aerosol into the edge of TFTR discharges // *Nuclear Fusion*, 2001, Vol.41, p.1823.
- [22] Milora S. L., Houlberg W. A., Lengyel L. L., et al. Pellet fuelling // *Nuclear Fusion*, 1995, Vol.35, p.657.
- [23] Lang P. T., Cierpka P., Lang R. S., et al. Compact gas gun injection system for variable sized solid pellets // *Review of Scientific Instruments*, 1994, Vol.65, p.2316.
- [24] Kuteev B. V., Sergeev V. Yu., Sudo S. Emergency discharge quench or rampdown by a noble gas pellet // *Nuclear Fusion*, 1995, Vol.35, p.1167.
- [25] Сергеев В.Ю. Управление разрядом и диагностика плазмы в токамаках и стеллараторах методом инжекции примесных макрочастиц : Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, 2004, Санкт-Петербург.
- [26] Mansfield D. K., Roquemore A. L., Schneider H., et al. A simple apparatus for the injection of lithium aerosol into the scrape-off layer of fusion research devices // *Fusion Engineering and Design*, 2010, Vol.85, p.890.

- [27] Сергеев В. Ю., Бахарева О. А., Кутеев Б. В., и др. Исследования испарения примесных макрочастиц в высокотемпературной плазме установок с магнитным удержанием // Физика плазмы, 2006, т.32, стр.398.
- [28] Kaufmann M., Lackner K., Lengyel L., et al. Plasma shielding of hydrogen pellets // Nuclear Fusion, 1986, Vol.26, p.171.
- [29] Рожанский В. А. Влияние самосогласованного электрического поля на испарение макрочастиц в горячей плазме // Физика плазмы, 1989, т.15, с.1447.
- [30] Kuteev B. V. Hydrogen pellet ablation and acceleration by current in high temperature plasmas // Nuclear Fusion, 1995, Vol.35, p.431.
- [31] Laurent L. Ultrafast transport phenomena and energy confinement in the TFR tokamak: a possible connection // Plasma Physics and Controlled Fusion, 1986, Vol.28, p.85.
- [32] Gentle K. W., Rowan W. L., Bravenec R. V., et al. Strong Nonlocal Effects in a Tokamak Perturbative Transport Experiment // Physical Review Letters, 1995, Vol.74, Iss.18, p.3620.
- [33] Tamura N., Inagaki S., Tokuzawa T., et al. Experimental study on nonlocality of heat transport in LHD // Fusion Science and Technology, 2010, Vol.58, p.122.
- [34] Sun H. J., Ding X. T., Yao L. H., et al. Experiment of non-local effect with SMBI on HL-2A // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2010, Vol.52, 045003.
- [35] Tamura N., Inagaki S., Tanaka K., et al. Impact of nonlocal electron heat transport on the high temperature plasmas of LHD // Nuclear Fusion, 2007, Vol.47, p.449.
- [36] Murakami A., Miyazawa J., Yasui K., et al. Observation of electron-temperature fluctuations triggered by supersonic gas puffing in the LHD // Plasma and Fusion Research, 2011, Vol.6, 1402135.
- [37] Gentle K. W., Bravenec R. V., Cima G., et al. The evidence for nonlocal transport in the Texas Experimental Tokamak // Physics of Plasmas, 1997, Vol.4, p.3599.
- [38] Pustovitov V. D. Nonlocal effects in energy balance in an equilibrium plasma during its fast heating/cooling in tokamaks and stellarators // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2012, Vol.54, 124036.
- [39] Giovannozzi E., Annibaldi S. V., Buratti P., et al. Vertical pellet injection in FTU discharges // Nuclear Fusion, 2005, Vol.45, p.399.
- [40] Wesson J. Tokamaks. Oxford : Clarendon Press, 2004.
- [41] Majeski R., Kugel H., Bell M. G., et al. Results from the CDX-U Lithium Wall and NSTX Lithium Pellet Injection and Evaporation Experiments. / Proc. 21st IAEA

- Fusion Energy Conference (IAEA CN-149), 16-21 October 2006, Chengdu, China, EX/P4-23.
- [42] Hu J. S., Zuo G. Z., Li J. G., et al. Investigation of lithium as plasma facing materials on HT-7 // *Fusion Engineering and Design*, 2010, Vol.85, p.930.
 - [43] Zuo G. Z., Hu J. S., Zhen S., et al. Comparison of various wall conditionings on the reduction of H content and particle recycling in EAST // *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2012, Vol.54, p.015014.
 - [44] Tabarés F. L., Oyarzabal E., Martin-Rojo A. B., et al. Reactor plasma facing component designs based on liquid metal concepts supported in porous systems // *Nuclear Fusion*, 2017, Vol.57, 016029.
 - [45] Kuteev B. V., Sergeev V. Yu., Krylov S. V., et al. Conceptual analysis of a tokamak reactor with lithium dust jet // *Nuclear Fusion*, 2010, Vol.50, 075001.
 - [46] Loarte A., Lipschultz B., Kukushkin A. S., et al. ITER Physics Basis, Chapter 4: Power and particle control // *Nuclear Fusion*, 2007, Vol.47, S203.
 - [47] Sergeev V. Yu., Kuteev B. V., Bykov A. S., et al. Conceptual design of divertor and first wall for DEMO-FNS // *Nuclear Fusion*, 2015, Vol.55, 123013.
 - [48] Михайлов В. Н., Евтихин В. А., Люблинский И.Е., и др. Литий в термоядерной и космической энергетике XXI века. М. : Энергоатомиздат, 1999.
 - [49] Nygren R., Lithium safety and handling / *Proc. 3rd International Symposium on Lithium Applications for Fusion Devices*, 9-11 October 2013, Frascati, Italy, Special session VIII.
 - [50] Правила устройства и безопасной эксплуатации установок, работающих со щелочными металлами / Отв.ред. В. П. Матвеев. Обнинск : ГНЦ ФЭИ, 1995.
 - [51] Vershkov V. A., Mirnov S. V., Evtikhin V. A. et al. Experiments with lithium gettering in T-10 tokamak / *Proc. 22nd IAEA Fusion Energy Conference (IAEA CN-165)*, 13-18 October 2008, Geneva, Switzerland, EX/P4-14.
 - [52] Kugel H. W., Bell M. G., Bell R., et al. Effect of lithium PFC coatings on NSTX density control // *Journal of Nuclear Materials*, 2007, Vol.363-365, p.791.
 - [53] Puiatti M. E., Spizzo G., Auriemma F., et al. Wall conditioning and density control in the reversed field pinch RFX-mod // *Nuclear Fusion*, 2013, Vol.53, 073001.
 - [54] Sun Z., Hu J. S., Zuo G. Z., et al. Influence of lithium coatings with large-area coverage on EAST plasma performance // *Fusion Engineering and Design*, 2014, Vol.89, p.2886.

- [55] Vershkov V. A., Mirnov S. V., Evtikhin V. A. et al. Lithium gettering in T-10 tokamak / Proc. 34th EPS Conference on Plasma Phys., Warsaw, 2 - 6 July 2007, P1.059.
- [56] Tabarés F. L., Ochando M.A., Medina F., et al. Plasma performance and confinement in the TJ-II stellarator with lithium-coated walls // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2008, Vol.50, 124051.
- [57] Вершков В. А., Вуколов Д. К., Кулешин Э. О., и др. Модернизированная эндоскопическая оптическая система токамака Т-10. Первые экспериментальные результаты // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 4, стр.80.
- [58] Bell M. G., Kugel H. W., Kaita R., et al. Plasma response to lithium-coated plasma-facing components in the National Spherical Torus Experiment // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2009, Vol.51, 124054.
- [59] Maingi R., Boyle D. P., Canik J. M., et al. The effect of progressively increasing lithium coatings on plasma discharge characteristics, transport, edge profiles and ELM stability in the National Spherical Torus Experiment // Nuclear Fusion, 2012, Vol.52, 083001.
- [60] Taylor C. N., Allain J. P., Heim B., et al. Surface chemistry and physics of deuterium retention in lithiated graphite // Journal of Nuclear Materials, 2011, Vol.415, p.S777.
- [61] Mazzitelli G., Apicella M. L., Frigione D., et al. FTU results with a liquid lithium limiter // Nuclear Fusion, 2011, Vol.51, 073006.
- [62] Innocente P., Mansfield D. K., Roquemore A. L., et al. Lithium wall conditioning by high frequency pellet injection in RFX-mod // Journal of Nuclear Materials, 2015, Vol.463, p.1138.
- [63] Whyte D. G., Evans T. E., Wong C. P. C., et al. Experimental observations of lithium as a plasma-facing surface in the DIII-D tokamak divertor // Fusion Engineering and Design, 2004, Vol.72, p.133.
- [64] Majeski R., Jardin S., Kaita R., et al. Recent liquid lithium limiter experiments in CDX-U // Nuclear Fusion, 2005, Vol.45, p.519.
- [65] Zuo G. Z., Ren J., Hu J. S., et al. Liquid lithium surface control and its effect on plasma performance in the HT-7 tokamak // Fusion Engineering and Design, 2014, Vol.89, p.2845.
- [66] Ren J., Hu J. S., Zuo G. Z., et al. First results of flowing liquid lithium limiter in HT-7 // Physica Scripta, 2014, Vol.T159, 014033.

- [67] Ruzic D. N., Xu W., Andruczyk D., et al. Lithium-metal infused trenches (LiMIT) for heat removal in fusion devices // *Nuclear Fusion*, 2011, Vol.51, 102002.
- [68] Majeski R., Doerner R., Gray T., et al. Enhanced Energy Confinement and Performance in a Low-Recycling Tokamak // *Physical Review Letters*, 2006, Vol.97, 075002.
- [69] Jaworski M. A., Abrams T., Allain J. P., et al. Liquid lithium divertor characteristics and plasma-material interactions in NSTX high-performance plasmas // *Nuclear Fusion*, 2013, Vol.53, 083032.
- [70] Zuo G. Z., Hu J. S., Li J. G., et al. First results of lithium experiments on EAST and HT-7 // *Journal of Nuclear Materials*, 2011, Vol. 415, p.S1062.
- [71] McCarthy K. A. Safety issues related to liquid metals / *Proc. APEX Meeting*, Albuquerque, NM, 27–31 July 1998.
- [72] Люблинский И. Е. Литий в энергетическом термоядерном реакторе // *ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез*, 2006, вып. 3, стр.3.
- [73] Zuo G. Z., Hu J. S., Maingi R., et al. Mitigation of plasma-material interactions via passive Li efflux from the surface of a flowing liquid lithium limiter in EAST // *Nuclear Fusion*, 2017, Vol.57, 046017.
- [74] Kaita R., Majeski R., Doerner R., et al. Liquid Lithium Limiter Effects on Tokamak Plasmas and Plasma-Liquid Surface Interactions / *Proceedings of 19th IAEA Fusion Energy Conference*, Lyon, France, 14-19 October 2002, Paper EX/P4-19.
- [75] Ren J., Zuo G. Z., Hu J. S., et al. A flowing liquid lithium limiter for the Experimental Advanced Superconducting Tokamak // *Review of Scientific Instruments*, 2015, Vol.86, p.023504-1.
- [76] Hu J. S., Zuo G. Z., Ren J., et al. First results of the use of a continuously flowing lithium limiter in high performance discharges in the EAST device // *Nuclear Fusion*, 2016, Vol.56, 046011.
- [77] Mirnov S. V., Azizov E. A., Evtikhin V. A., et al. Experiments with lithium limiter on T-11M tokamak and applications of the lithium capillary-pore system in future fusion reactor devices // *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2006, Vol.48, p.821.
- [78] Apicella M. L., Mazzitelli G., Pericoli Ridolfini V., et al. First experiments with lithium limiter on FTU // *Journal of Nuclear Materials*, 2007, Vol.363-365, p.1346.
- [79] Kugel H. W., Allain J. P., Bell M. G., et al. NSTX plasma operation with a Liquid Lithium Divertor // *Fusion Engineering and Design*, 2012, Vol.87, p.1724.

- [80] Mirnov S. V., Belov A. M., Djigailo N. T. et al. Experimental test of the system of vertical and longitudinal lithium limiters on T-11M tokamak as a prototype of plasma facing components of a steady-state fusion neutron source // Nuclear Fusion, 2015, Vol.55, 123105.
- [81] ENEA-Fusion web site. URL: <http://www.fusione.enea.it/FTU/index.html.en>
- [82] Doerner R. P., Krashenninnikov S. I., Schmid K. Particle-induced erosion of materials at elevated temperature // Journal of Applied Physics, 2004, Vol.95, p.4471.
- [83] Sun Z., Hu J. S., Zuo G. Z., et al. Development of and experiments with liquid lithium limiters on HT-7 // Journal of Nuclear Materials, 2013, Vol.438, p.S899.
- [84] Kugel H. W., Bell M., Berzak L., et al. Physics design requirements for the National Spherical Torus Experiment liquid lithium divertor // Fusion Engineering and Design, 2009, Vol.84, p.1125.
- [85] Apicella M. L., Apruzzese G., Mazzitelli G., et al. Lithization of the FTU tokamak with a critical amount of lithium injection // Plasma Physica and Controlled Fusion, 2012, Vol.54, 035001.
- [86] Evtikhin V. A., Lyublinski I. E., Vertkov A. V. et al. Lithium divertor concept and results of supporting experiments // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2002, Vol.44, p.955.
- [87] Rindt P., Lopes Cardozo N. J., van Dommelen J. A. W., et al. Conceptual design of a pre-loaded liquid lithium divertor target for NSTX-U // Fusion Engineering and Design, 2016, Vol.112, p.204.
- [88] Sudo S., Tamura N., Muto S., et al. Plasma Diagnostics with Tracer-Encapsulated Solid Pellet // Plasma and Fusion Research, 2014, Vol.9, 1402039.
- [89] Тимохин В. М., Сергеев В. Ю., Кутеев Б. В, Исследование выключения разряда в токамаке Т-10 методом инъекции примесных макрочастиц с большим Z // Физика плазмы, 2001, т. 27, стр. 1.
- [90] Strachan J. D., Mansfield D. K., Bell M. G., et al. Wall conditioning experiments on TFTR using impurity pellet injection // Journal of Nuclear Materials, 1994, Vol.217, p.145.
- [91] Mansfield D. K., Hill K. W., Strachan J. D., et al. Enhancement of Tokamak Fusion Test Reactor performance by lithium conditioning // Physics of Plasmas, 1996, Vol.3, p.1892.
- [92] Budny R. V. Comment on Li pellet conditioning in tokamak fusion test reactor // Physics of Plasmas, 2011, Vol.18, 092506.

- [93] Kugel H. W., Bell M., Bell R., et al. Initial NSTX Lithium Pellet Injection / APS DPP, Savannah, GA, November 15-19, 2004.
- [94] Munaretto S., Dal Bello S., Innocente P., et al. RFX-mod wall conditioning by lithium pellet injection // Nuclear Fusion, 2012, Vol.52, 023012.
- [95] Garzotti L., Innocente P., Martini S., et al. Noncryogenic pellet injector for diagnostic purposes on the RFX reversed field pinch // Review of Scientific Instruments, 1999, Vol.70, p.939.
- [96] Pelekasis N., Benos L., Static arrangement of a capillary porous system (CPS): Modelling // Fusion Engineering and Design, 2017, Vol.117, p.180.
- [97] Belopolsky V. A., Skokov V. G., Timokhin V. M., et al. Studies of Carbon Pellet Ablation in T-10 Plasmas / 30th EPS conference on Plasma Phys. and Contr. Fusion, St. Petersburg, 7-11 July 2003 ECA Vol. **27A**, P-3.117.
- [98] Sergeev V., et al. Plasma diagnostics on Asdex Upgrade by means of carbon pellet injection / 21st EPS conference on Plasma Phys. and Contr. Fusion, Montpellier, 27 June-1 July 1994, ECA Vol. **18B**, p.1364.
- [99] Strelkov V. S., History of the T-10 Tokamak: Creation and Development // Plasma Physics Reports, 2001, Vol.27, p.819.
- [100] Позняк В. И., Гридина Т. В., Питерский В. В., и др. Исследование динамики высокоэнергетичных электронов по их электронно-циклотронному излучению в токамаке Т-10 // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2011, вып. 4, стр.90.
- [101] Багдасаров А. А., Бузанкин В. В., Васин Н. Л., и др. Девятиканальный интерферометр субмиллиметрового диапазона для измерения концентрации электронов на установке «Токамак-10» / В сб. «Диагностика плазмы», вып.4 (1), М. : Энергоатомиздат, 1981, стр.141.
- [102] Горбунов Е. П., Денисов В. Ф., Нестеров П. К., и др. Применение многоканального лазерного интерферометра вертикального зондирования для измерения профиля плотности плазмы на токамаке Т-15 // Физика плазмы, 1992, т.18, вып.2, стр.162.
- [103] Горбунов Е. П., Денисов В. Ф., Крупин В. А., и др. Особенности измерения плотности плазмы на Токамаке-10 интерферометром с длиной волны 337 мкм при пеллет-инжекции и СВЧ-нагреве / Сборник материалов IV Российского семинара «Современные средства диагностики плазм и их применение для контроля веществ и окружающей среды», Москва, МИФИ, 12-14 ноября 2003 г., стр.55.

- [104] Соколов М. М. Разработка информационных систем для работы с экспериментальными данными установок управляемого термоядерного синтеза ; Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Москва, 2004.
- [105] Vershkov V. A., Sarychev D. V., Notkin G. E., et al. Review of recent experiments on the T-10 tokamak with all metal wall // Nuclear Fusion, 2017, Vol.57, 102017.
- [106] Sarychev D. V., Bolometry. In: Fusion Physics, ed. Kikuchi M. et al., Vienna : IAEA, 2012, p.378.
- [107] Орловский И. И. Динамика вращения винтовых магнитных структур в плазме токамака : Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Москва, 2006.
- [108] Борщеговский А. А. Гиротронный комплекс установки Т-10 / Тезисы докладов XXXI Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 16-20 февраля 2004 г., М56.
- [109] Ledl L., Burhenn R., Lengyel L., et al. Study of carbon pellet ablation in ECR-heated W7-AS plasmas // Nuclear Fusion, 2004, Vol.44, p.600.
- [110] Люблинский И. Е., Вертков А. В., Евтихин В. А. Физико-химические основы использования лития в жидкометаллических системах термоядерного реактора // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2007, вып. 4, стр.13.
- [111] Timokhin V. M., Skokov V. G., Sergeev V. Yu., et al. T-10 discharge control by method of lithium pellet-injection and by injection of superdense supersonic gas jets / 33nd EPS Conference on Plasma Phys. Roma, 19 - 23 June 2006, P-4.092.
- [112] Timokhin V. M., Skokov V. G., Sergeev V. Yu., et al. Injector of lithium jet for T-10 wall conditioning / 34th EPS Conference on Plasma Phys., Warsaw, 2 - 6 July 2007, P2.025.
- [113] FMC corporation, FMC Lithium Division, product data sheet on the web site. URL: <http://www.fmclithium.com/Portals/FMCLithium/content/docs/DataSheet/QS-PDS-2060%20r1.pdf>
- [114] Yakovleva M., Fitch K. B., Li Y., et al. Stabilized Lithium Metal Powder (SLMP™) – Material and Application Technologies for High Energy Li-ion Batteries / 26th International Battery Seminar & Exhibit, Fort Lauderdale, FL, March 16th-19th, 2009.
- [115] Hirsch M., Baldzuhn J., Beidler C., et al. Major results from the stellarator Wendelstein 7-AS // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2008, Vol.50, 053001.

- [116] Ledl L., Verunreinigungspelletinjektion am Stellarator Wendelstein 7-AS (Dissertation), IPP Report III/257 February 2000.
- [117] Müller H. W., Lang P. T., Büchl K., et al. Improvement of q-profile measurement by fast observation of pellet ablation at ASDEX Upgrade // Review of Scientific Instruments, 1997, Vol.68, p.4051.
- [118] Тимохин В. М., Кутеев Б. В., Сергеев В. Ю., и др. Эффект узколокализованного повышенного испарения углеродных макрочастиц в стеллараторе Wendelstein 7-AS // Письма в ЖТФ, 2004, т.30, вып.7, стр.83.
- [119] Кирнева Н. А., Мартынов А. А., Павлов Ю. Д., и др. Эмпирическая формула для профиля электронной температуры плазмы в омическом режиме в токамаке T-10 // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2014, вып. 1, стр.56.
- [120] Terry J. L., Marmor E. S., Snipes J. A., et al. Imaging of lithium pellet ablation trails and measurement of q profiles in TFTR // Review of Scientific Instruments, 1992, Vol.63, p.5191.
- [121] Прист Э., Форбс Т. Магнитное пересоединение: магнитодинамическая теория и приложения. Москва : Физматлит, 2005.
- [122] Ivanov A.A., Martynov A.A., Medvedev S.Yu., et al., Modeling of MHD Events during Pellet-Plasma Interaction in Tokamak / 34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw, 2 – 6 July 2007, P-4.069.
- [123] Ivanov N. V., Kakurin A. M. Locking of Small Magnetic Islands by Error Field in T-10 Tokamak / 38th EPS Conference on Plasma Physics, Strasbourg, 27 June – 1 July 2011, P2.080.
- [124] Кадомцев Б. Б. // Физика плазмы, 1975, т.1, с.710. (Цитируется по: Кадомцев Б.Б. Избранные труды. В 2 т. Т.1. М. : Физматлит, 2003, с.381.
- [125] Мартыненко Ю. В., Московкин П. Г. Об эмиссии частиц графита при срывах плазмы в токамаках // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 1999, вып. 2, стр.31.
- [126] Morita S., Shirai Y., Goto M., et al. Observation of ablation and acceleration of impurity pellets in the presence of energetic ions in the CHS heliotron/torsatron // Nuclear Fusion, 2002, Vol.42, p.876.
- [127] Бахарева О. А., Сергеев В. Ю., Кутеев Б. В., и др. Исследование углеродных облаков в плазме стелларатора Wendelstein 7-AS // Физика плазмы, 2005, т.31, стр.316.

- [128] Sergeev V. Yu., Khlopenkov K. V., Kuteev B. V., et al. Experiments on Li pellet injection into Heliotron E // Plasma Physics and Controlled Fusion, 1998, Vol.40, p.1785.
- [129] Krasheninnikov S. I., Pigarov A. Yu., Smirnov R. D., et al. Theoretical Aspects of Dust in Fusion Devices // Contributions to Plasma Physics, 2010, Vol.50, p.410.
- [130] Крупин В.А., Немец А.Р., Ключников Л.А. и др., Комплекс спектроскопических диагностик для измерения абсолютной величины и радиального распределения эффективного заряда плазмы на токамаке Т-10 // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2016, вып. 1, стр.81.
- [131] Dr.Dennis Mansfield, private communication.
- [132] Perkins F. W., Post D. E., Uckan N. A., et al. ITER Physics Basis, Chapter 1: Overview and summary // Nuclear Fusion, 1999, Vol.39, p.2137.
- [133] Federici G., Kemp R., Ward D., et al. Overview of EU DEMO design and R&D activities // Fusion Engineering and Design, 2014, Vol.89, p.882.
- [134] Wenninger R., Arbeiter F., Aubert J., et al. Advances in the physics basis for the European DEMO design // Nuclear Fusion, 2015, Vol.55, 063003.
- [135] Nagayama Y. Liquid lithium divertor system for fusion reactor // Fusion Engineering and Design, 2009, Vol.84, p.1380.
- [136] Goldston R. J., Myers R., Schwartz J. The lithium vapor box divertor // Physica Scripta, 2016, Vol.T167, 014017.