

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу В.Г. Скокова
"Физические процессы при инъекции углерода и лития в виде макрочастиц и
пылевых струй в установки с магнитным удержанием плазмы",
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук
по специальности 01.04.08 - «Физика плазмы»

В ходе работы термоядерных установок на поверхность обращенных к плазме элементов (ОПЭ) стенки приходят экстремальные потоки тепла и частиц. Текущие эксперименты показывают, что в условиях будущих реакторов можно ожидать плавление и частичное разрушение ОПЭ в зонах пиковых нагрузок даже при использовании наиболее тугоплавких материалов, как вольфрам. Поэтому ведутся разработки дополнительных методов контроля пристеночной плазмы для смягчения нагрузок на ОПЭ, а также методов возобновления рабочей поверхности. Инжекция макрочастиц в плазму, является одним из перспективных методов, позволяющим выполнять обе эти функции.

На сегодняшний день наиболее яркие результаты получены при инъекции в плазму частиц лития. Литий является одним из самых легких элементов и хорошо совместим с высокотемпературной плазмой установок с магнитным удержанием. При его использовании обычно наблюдается снижение коэффициента рециклинга водорода, снижение концентрации примесей в плазме и улучшение параметров ее удержания. Работы по данному направлению ведутся в большинстве стран мира, участвующих в термоядерной программе.

При этом количество экспериментальных работ с литием не так велико в силу технической сложности таких экспериментов, вызванной высокой химической активностью лития. Поэтому тема диссертационной работы

В.Г. Скокова входит в число **актуальных** научных проблем управляемого термоядерного синтеза.

Диссертационная работа состоит из четырех глав. В первой главе приводится аналитический обзор литературы, рассматриваются основные методы инжекции частиц в установки с магнитным удержанием плазмы, а также основные успехи в области управления разряда с помощью лития.

Во второй главе описаны основные методики эксперимента, особенности и результаты испытаний разработанного источника литиевой пыли, а также сравнение полученных характеристик с зарубежными аналогами.

Третья глава посвящена экспериментам по инжекции углеродной пыли в условиях токамака T-10 и стелларатора Wendelstein 7-AS. Обсуждается зависимость скорости испарения инжектируемых частиц от их начального размера. Описаны два новых режима испарения, которые отличаются от ожидаемого по модели нейтрального экранирования поведения. В первом режиме изменение скорости испарения связано с появлением возмущений в плазме, инициированных инжектируемой частицей, при этом происходит более глубокое проникновение частицы в центр шнура. Установлен критический размер частиц, при котором происходит данное явление в условиях токамака T-10. Приводится теоретическое описание полученных экспериментальных наблюдений. Второй режим связан с отрывом от инжектируемой частицы в ходе ее движения более мелких фрагментов в результате мощных тепловых нагрузок, что приводит к повышенной скорости испарения. Приводятся оценки размеров и скорости оторвавшихся фрагментов.

В четвертой главе обсуждаются результаты исследований на токамаке T-10 по инжекции литиевых частиц. Приведены результаты экспериментов по инжекции цилиндрических микрочастиц, а также литиевой пылевой струи. В первом случае влияние на основные характеристики разряда оказалось мало. Во втором случае удалось добиться существенного снижения

коэффициента рециклинга водорода. При этом эффективный заряд плазмы увеличился в отличие от ряда других экспериментов с литием. Квазистационарная часть разряда при инъекции литиевой пыли описана на основе уравнений баланса частиц в нульмерном приближении, получено хорошее согласие с экспериментом.

Для анализа поведения макрочастиц в плазме использовались апробированные ранее спектроскопические и микроволновые методы диагностики и теоретические модели, что обеспечивает **достоверность** полученных результатов.

Оценивая диссертацию в целом, можно выделить следующие наиболее важные и интересные результаты:

1. Создан источник направленного потока литиевой пыли для инъекции в установки с высокотемпературной плазмой, определены его основные характеристики и режимы работы. Основные параметры источника сопоставимы с ведущими мировыми аналогами. Успешно продемонстрирована работа источника в условиях токамака T-10.

2. В экспериментах по инъекции углеродной пыли в плазму токамака T-10 и стелларатора Wendelstein 7-AS были экспериментально показаны два новых режима локального изменения скорости испарения частиц. Отмечается возможность повышенной глубины проникновения частиц в плазму при превышении некоторого критического размера, что может оказаться полезно для повышения эффективности ввода топлива в реактор. Это может быть, действительно, полезно, однако необходимо оценить, насколько критичными для плазмы являются возмущения, создаваемые частицей.

3. Экспериментально продемонстрировано позитивное влияние инъекции литиевой пыли в плазму токамака T-10 на характеристики разряда. В частности, показано снижение коэффициента рециклинга водорода. Положительным результатом инъекции лития можно назвать также небольшое уменьшение концентрации углерода (материала лимитера) в

плазме, хотя оно оказалось меньше, чем можно было ожидать. Вероятно, для получения лучших характеристик требуется дальнейшее совершенствование данной методики.

Полученные результаты и разработанные методики инъекции частиц обладают высокой **практической значимостью** и могут найти применение в строящемся токамаке Т-15 и других установках с магнитным удержанием плазмы.

По работе могут быть сделаны следующие замечания.

1. Заключение об инъекции литиевой пыли как о наиболее эффективном инструменте для управления балансом плазмы выглядит не вполне обоснованным, так как не проводится сравнения с альтернативными методами, например, с использованием обращенных к плазме элементов на основе жидкого лития. В частности, в работе не приводится сравнение полученных результатов с недавними экспериментами на токамаке Т-10 с вольфрамовым и литиевым лимитерами.

2. В работе даны подробные характеристики плазмы в ходе экспериментов, но не приведена температура лимитера, на котором ожидалось осаждение лития. В силу относительно низкой температуры испарения лития этот параметр может быть очень важен. Слишком высокая температура поверхности могла быть причиной низкой эффективности осаждения лития и, соответственно, низкого подавления распыления углерода.

3. Выводы об изменении химического состава поверхности инжектируемых частиц на атмосфере сделаны на основе визуального осмотра. Было бы полезно использовать дополнительные методы анализа, а также определить толщину прореагировавшего слоя. В работе не описано также влияние состояния поверхности частиц на эффективность воздействия на плазму.

4. Отдельные разделы диссертации (в целом хорошо оформленной) имеют недоработки. Вводная часть диссертации (стр.4), которая открывает

диссертацию, имеет целый ряд неточностей. Крайне сжато описаны используемые в расчетах модели, основные формулы предлагается искать во внешних источниках.

Однако указанные замечания не являются принципиальными возражениями по сути выполненной работы.

Автореферат отражает содержание диссертации.

По **научной и практической** значимости работа удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по **специальности 01.04.08 - физика плазмы**.

Официальный оппонент

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики плазмы,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»

Адрес: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

Эл. почта: YMGasparyan@mephi.ru, тел.: 8(495)7885699 доб.9983

Юрий Микаэлович Гаспарян

14 мая 2018 г.