

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Федерального
исследовательского центра
«Институт общей физики
им. А.М. Прохорова
Российской академии наук»

д.ф.-м.н.



/ Гарнов С.В./

« _____ » _____ 20__ г

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу **Белокурова Александра Александровича** «Влияние геодезической акустической моды и инъекции макрочастицы на динамику L-N перехода в токамаке», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы».

Актуальность темы диссертации

Режим улучшенного удержания (или H-мода), характеризуется подавленным переносом тепла и частиц на периферии плазмы в термоядерных установках. Этот режим является предпочтительным с точки зрения увеличения энергетического выхода режимом функционирования будущего токамака-реактора. Все строящиеся и проектируемые установки ориентированы на работу в H-моду. H-мода станет приоритетной для токамака ITER, на котором планируется продемонстрировать управляемый термоядерный синтез с энергетическим выходом в 10 раз превышающим энергетические затраты на нагрев плазмы. На проектируемом в настоящее время в России токамаке ТРТ так же планируется работа в режиме H-моды. Предпочтение отдается H-моду потому, что в этом режиме подавленного турбулентного переноса энергетическое время жизни примерно в 2 раза

больше по сравнению с L-модой. Поэтому поиск условий и способов инициирования режима улучшенного удержания, является одной из ключевых задач физики плазмы.

Цель диссертационной работы

Целью работы является определение роли различных факторов (шира радиального электрического поля, уровня турбулентности и источника частиц), ответственных за переключение в режим улучшенного удержания энергии плазмы в токамаке.

Оценка структуры и содержания диссертации

Диссертация Белокурова А.А. содержит 104 страницы, включая 54 рисунка и список литературы, состоящий из 90 источников. Текст диссертации подразделяется на введение, в котором сформулирован круг проблем по теме диссертации, показана актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы цели и задачи работы, положения, выносимые на защиту, а также приведены формальные сведения об апробации работы и список публикаций автора по теме диссертации.

В 1 главе дан обзор литературы по теме диссертации. Описывается теория переключения режимов удержания в токамаке, приводятся экспериментальные наблюдения геодезической акустической моды (ГАМ) в токамаках ТУМАН-3М, ФТ-2, Т-10, а также результаты экспериментов по переключению режимов удержания с помощью инжекции пеллеты в токамаках ТУМАН-3М, Т-10, DIII-D, MAST и EAST.

Во 2 главе приведены результаты исследования возможности инициирования перехода в режим улучшенного удержания (H-моду) вспышкой ГАМ на примере сценариев в токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2, а также сравнение результатов этого исследования с экспериментом. В токамаке ТУМАН-3М в сценариях с ГАМ может происходить переход в H-моду, в токамаке ФТ-2 в сценариях с ГАМ переход не наблюдается. На основе разработанной автором модели, использующей уравнения переноса с нелинейным коэффициентом диффузии, показано, что для инициирования перехода в H-моду вспышка ГАМ должна иметь параметры, превышающие пороговые: длительность вспышки, амплитуда электрического поля, частота, т.д. Принципиальная возможность инициирования также зависит от величины источника частиц – так, например, в разрядах с ГАМ в токамаке ФТ-2 источник частиц слишком мал, чем объясняется отсутствие перехода в H-моду.

В 3 главе приведены результаты исследования возможности инициирования перехода в H-моду в токамаке ТУМАН-3М с помощью инъекции криогенной топливной пеллеты. Показано, что увеличенный источник частиц за счет частичного разрушения инжектируемой пеллеты, поступающей в плазму в виде облака газа, создает достаточные условия для существования самоподдерживающейся H-моды, в то время как испарение твердого осколка пеллеты служит триггером, запускающим инициирование перехода в H-режим.

4 глава посвящена роли источника в инициировании перехода в H-моду. Рассмотрены сценарии в токамаке ФТ-2 с большой концентрации плазмы, в которых оказывается достижима H-мода, отмечено существование изотопного эффекта в инициировании перехода в H-моду.

В Заключении сформулированы выводы и приведены основные результаты диссертации, указаны перспективы дальнейшего исследования.

Новизна и научная ценность полученных результатов

Впервые проанализированы и объяснены в рамках общих представлений о нелинейном характере коэффициента диффузии различные сценарии на различных токамаках: ГАМ и пеллет-инжекция в токамаке ТУМАН-3М с последующим L-H переходом или без него, а так же ГАМ на ФТ-2 без L-H перехода.

Впервые, на примере режимов с интенсивными колебаниями ГАМ и с L-H переходом на токамаке ТУМАН-3М и без такового на токамаке ФТ-2, проанализирована взаимосвязь различных факторов, влияющих на возможность перехода – таких, как возмущение шира радиального электрического поля и величина источника частиц. Впервые были проведены эксперименты по тангенциальной инъекции замороженной макрочастицы в токамаке с целью инициирования L-H перехода и исследования параметров и механизмов, ответственных за инициирование L-H перехода.

Достоверность полученных результатов

Полученные в результате работы результаты являются экспериментально обоснованными. Моделирование сценариев L-H перехода в токамаке Туман-3М и отсутствие перехода в токамаке ФТ-2 использует преимущественно экспериментальные данные. Достоверность модели подтверждается успешным применением ее для описания различных режимов на двух токамаках – ТУМАН-3М и ФТ-2. Достоверность результатов

обеспечивается многократно повторёнными измерениями и сравнением результатов различных диагностик.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования в организациях, ведущих исследования в области физики плазмы - НИЦ "Курчатовский институт", ИОФ РАН, ИПФ РАН, НИЯУ «МИФИ», ИЯФ СО РАН, ФТИ РАН, ИТЭР-Центр.

Замечания по диссертации

Необходимо отметить следующие замечания и пожелания:

1. На странице 23, первый абзац сверху, приведена формула для частоты геодезической акустической моды (ГАМ): $f_{ГАМ} = \sqrt{(T_e + T_i) / M_i} (1 / 2\pi R)(1 + 1/q^2)$ [29, 33, 34], (T_e и T_i – электронная и ионная температуры плазмы, M_i – масса иона в атомных единицах, R – большой радиус токамака, q – запас устойчивости). Ошибочно указано, что массу ионов нужно брать в атомных единицах. Здесь массу ионов следует брать в единицах системы СИ, то есть, в килограммах.

2. На странице 33, первый абзац, сказано: *В экспериментах на токамаке ТУМАН-3М характерное время энергообмена между электронами и ионами предполагалось превышающим время испарения пеллеты для подобных разрядов, т.е. существенного изменения ионной температуры при инжекции происходить не должно, поэтому основной вклад в радиальное электрическое поле вносит именно градиент концентрации плазмы.* Передача импульса и энергии от электронов к ионам происходит за времена электрон-ионных столкновений, а этот процесс относится к одному из наиболее быстрых столкновительных процессов в плазме, и имеет характерный временной масштаб 10^{-6} с, в то время как испарение пеллеты, в соответствии с приведенными осциллограммами происходит за времена около 2 мс. А изменения ионной температуры происходят за времена сравнимые с энергетическим временем жизни ионов. Именно с этой величиной и нужно сравнивать время испарения пеллеты.

3. Если посмотреть на зависимость частоты ГАМ от параметров плазмы, то можно обнаружить, что эта частота в основном зависит от суммы электронной и ионной температур. При этом в эксперименте наблюдается довольно сильное изменение частоты ГАМ в одном импульсе и даже возникновение двух всплесков с разными частотами одновременно. Это указывает на то, что радиус, на котором возникает ГАМ, может

меняться в течение одного импульса. В тоже время при моделировании инициирования L-N перехода в токамаке ТУМАН-3М взято положение ГАМ в одном месте, на радиусе 20 см. Хотелось бы высказать пожелание, выполнить моделирование при меняющемся по радиусу положении ГАМ, и получить зависимость порогового значения амплитуды ГАМ от положения ГАМ.

Следует отметить, что высказанные замечания не затрагивают справедливость сделанных в работе выводов, и не влияют на ее значимость.

Заключение по диссертационной работе

Диссертация Белокурова Александра Александровича «Влияние геодезической акустической моды и инъекции макрочастицы на динамику L-N перехода в токамаке» является законченной научно-квалификационной работой, имеющей важное теоретическое и практическое применение. Текст автореферата соответствует всем основным положениям и результатам, изложенным автором в диссертации. Диссертация соответствует заявленной специальности 1.3.9 – «Физика плазмы». Основные положения, выносимые на защиту, апробированы на международных и российских конференциях и опубликованы в 16 статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, и соответствуют изложенным в диссертации результатам.

По объему, научной новизне, практической ценности и достоверности результатов диссертация Белокурова А.А. полностью соответствует требованиям, изложенным в пунктах 9 – 11, 13 и 14 действующего "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 11 сентября 2021 г. № 1539), предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Александр Александрович Белокуров заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы».

Отзыв составлен заведующим лабораторией ионно-циклотронного нагрева ИОФ РАН, кандидатом физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «физика плазмы», Алексеем Ивановичем Мещеряковым, тел.: (8)-499-503-87-77, доб. 5-44, e-mail: meshch@fpl.gpi.ru, адрес: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, на основе обсуждения

содержания диссертации на семинаре отдела физики плазмы ИОФ РАН, который состоялся 20 сентября 2022 г.

Отзыв обсуждён и одобрен на заседании Учёного совета отдела физики плазмы ИОФ РАН, протокол № 465 от 20 сентября 2022 г.

С обработкой моих личных данных, связанных с защитой диссертации, согласен.

Заведующий лабораторией ионно-циклотронного нагрева
отдела физики плазмы ИОФ РАН, к.ф.-м.н.

А.И. Мещеряков

Подпись заведующего лабораторией к.ф.-м.н. А.И. Мещерякова заверяю

ВРИО ученого секретаря ИОФ РАН, д.ф.-м.н.

В.В. Глушков



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

телефон: +7 499 503 8724

e-mail: office@gpi.ru

http://www.gpi.ru/