

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертацию Белокурова Александра Александровича
«Влияние геодезической акустической моды и инжекции макрочастицы
на динамику L-H перехода в токамаке»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.9. – физика плазмы

Одной из основных проблем современной физики управляемого термоядерного синтеза (УТС) в установках типа токамак является аномально высокий уровень потерь тепла и частиц из плазмы. Аномальный перенос связывают с развивающейся в плазме турбулентностью, которая выносит тепло и частицы поперек удерживающего магнитного поля. Предполагается, что развитие неоднородного радиального электрического поля E_r на периферии плазменного шнура приводит к неоднородности вращения в скрещенных электрическом и магнитном полях и разрыву крупных турбулентных вихрей на более мелкие, что приводит к подавлению аномального переноса. Как следствие, образуется периферийный транспортный барьер, и плазма переходит из режима с низким удержанием (L-мода) в режим с улучшенным удержанием (H-мода). На работу в H-моде нацелена физическая программа крупнейшего в мире токамака-реактора ITER, изучение механизмов L-H и обратных H-L переходов проводится на всех передовых токамаках. Появление неоднородности (шира) E_r , предшествующее L-H переходу, может быть вызвано возбуждением зональных течений, высокочастотной разновидностью которых является геодезическая акустическая мода (ГАМ), довольно часто наблюдаемая в экспериментах на токамаках. Считается, что ГАМ порождается самой турбулентностью, однако механизмы взаимодействия ГАМ и турбулентности до конца не определены. Для обеспечения длительной работы токамака в H-моде с повышенной концентрацией плазмы используется инжекция топливных пеллет, позволяющая доставлять атомы рабочего газа в центральные области плазменного шнура. Кроме того, инжекция пеллет в

периферийные области используется для подавления возникающих в Н-моде гранично-локализованных мод (ELM). Таким образом, изучение влияния ГАМ и инжекции пеллет на динамику L-H перехода является важной и актуальной задачей УТС.

Диссертация А.А. Белокурова посвящена изучению роли ширины E_r и источника частиц в инициации L-H перехода сразу в двух токамаках – ТУМАН-3М и ФТ-2. Для описания динамики L-H перехода автором использована транспортная модель, включающая уравнение переноса тепла для ионов и уравнение переноса частиц. Главной особенностью модели является зависимость коэффициента диффузии от отношения величины ширины E_r к инкременту нарастания турбулентности, что позволяет моделировать временную эволюцию радиального профиля концентрации плазмы с учетом неоднородности электрического поля, вызванной вспышками ГАМ или инжекцией криогенной пеллеты.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации – 104 страницы, включая 54 рисунка и список литературы, состоящий из 90 наименований. В первой главе приведен обширный обзор литературы по теме диссертации, описан механизм подавления аномального переноса широм E_r , выделены основные факторы, ответственные за инициирование L-H перехода. Описаны свойства ГАМ, наблюдавшейся на токамаках ТУМАН-3М, ФТ-2 и Т-10, приведены результаты экспериментов с пеллет-инжекцией на токамаках Т-10, ТУМАН-3М, DIII-D, MAST и EAST. Вторая глава посвящена моделированию режимов с ГАМ, полученных на ТУМАН-3М и ФТ-2. Подробно описана разработанная автором транспортная модель, приведены результаты моделирования разрядов ТУМАН-3М с различными параметрами ГАМ: амплитуда, длительность вспышки; определены пороговые величины этих параметров, достаточные для инициирования L-H перехода. Также приведены результаты моделирования разрядов ФТ-2 с ГАМ и низкой концентрацией плазмы, отсутствие L-H перехода в данных режимах

объяснено слишком малым источником частиц. Третья глава посвящена исследованию сценариев с инжекцией криогенных пеллет в плазму токамака ТУМАН-3М. Рассмотрено два сценария: в первом пеллета частично разрушалась и влетала в плазму в виде твердого осколка и облака газа, во втором – пеллета долетала до плазмы в целости, что способствовало ее более глубокому проникновению в плазму. В обоих случаях наблюдался L-H переход, однако во втором случае улучшение удержания длилось короткое время, после чего происходил обратный H-L переход. Согласно предложенной автором модели, в первом случае существование самоподдерживающегося режима с улучшенным удержанием связано с большим источником частиц, роль которого выполняет облако газа, образующееся в результате разрушения пеллеты. В четвертой главе особое внимание уделяется изучению роли источника частиц в инициировании L-H перехода. Расчет зависимостей локального потока частиц от градиента концентрации в омическом режиме токамака ТУМАН-3М и в режиме с высокой концентрацией в токамаке ФТ-2 показал, что величина источника частиц определяет возможность инициирования L-H перехода. В заключении изложены основные выводы, полученные в ходе исследований, а также перспективы дальнейшей работы по теме.

Следует подчеркнуть новизну и высокую научную значимость полученных А.А. Белокуровым результатов. Эксперименты по тангенциальной инжекции пеллеты с целью инициирования L-H перехода на токамаке ТУМАН-3М проведены впервые. По их результатам определены условия инжекции, наиболее подходящие для инициации L-H перехода. С помощью построенной автором модели впервые качественно описана динамика L-H перехода в сценариях с ГАМ в токамаке ТУМАН-3М и обосновано отсутствие L-H перехода в сценариях с ГАМ и низкой концентрацией в токамаке ФТ-2. Кроме того, предсказанная возможность L-H перехода в ФТ-2 при более высокой концентрации была подтверждена в эксперименте. Таким образом, данный подход является универсальным и

может быть использован для предсказания условий, необходимых для осуществления перехода в режим улучшенного удержания на других токамаках.

Достоверность полученных А.А. Белокуровым результатов не вызывает сомнений. Результаты проведенного моделирования находятся в согласии с экспериментами. При моделировании режимов с ГАМ ее частота и амплитуда определялись с помощью диагностики допплеровского рассеяния, позволяющей измерять скорость вращения флуктуаций плотности плазмы, и диагностики плазмы пучком тяжелых ионов, позволяющей измерять эволюцию потенциала плазмы в центральных областях шнура. Оценки инкремента нарастания турбулентности сравнивались с результатами гирокинетических расчетов.

По диссертации есть следующие вопросы и замечания:

- Для достоверных измерений колебаний электрического потенциала плазмы с помощью диагностики пучком тяжелых ионов (ДПТИ) необходимо, чтобы время пролета зондирующей частицы по плазме было существенно меньше периода исследуемых колебаний. Каковы параметры диагностического пучка ДПТИ на токамаке ТУМАН-ЗМ: зондирующий ион, энергия и ток пучка? Как соотносится время пролета зондирующей частицы по плазме с периодом колебаний ГАМ?
- Во введении описаны результаты экспериментов на токамаке Т-10, в которых с помощью ДПТИ были измерены колебания электрического потенциала плазмы и показано, что частота и амплитуда ГАМ постоянны по радиусу, из чего делается вывод, что на Т-10 ГАМ является глобальной модой колебаний потенциала. Автор приводит другую интерпретацию: локализованное на периферии возмущение E_r приводит к колебаниям потенциала по всему малому радиусу плазмы. В таком случае колебания потенциала на всем малом радиусе были бы синфазны. Однако на Т-10 было показано, что существует ненулевая фазовая задержка между колебаниями потенциала, измеренными ДПТИ в центральной области

шнура и зондом ленгмюра на периферии, а также наблюдалось увеличение этой задержки и падение коэффициента когерентности между сигналами ДПТИ и зонда ленгмюра при движении области измерения ДПТИ вглубь плазменного шнура (V.N. Zenin et al. Problems of atomic sci. and technol. 2018, № 6. Series: Plasma Physics (118), p. 321-323).

- Главным преимуществом Н-моды по сравнению с L-модой является существенный рост энергетического времени жизни плазмы τ_E . При обсуждении режимов с L-H переходом на токамаке ТУМАН-3М не приводятся временные зависимости энергосодержания в плазме и не рассчитывается τ_E .
- На рисунках 23 и 24 показан потенциал плазмы в токамаке ТУМАН-3М на $r=6$ см, и он имеет положительную величину. Плазма токамака в омическом режиме, как правило, характеризуется отрицательным электрическим потенциалом в центральных областях шнура. С чем связан положительный потенциал плазмы в данном эксперименте?
- В тексте диссертации содержатся опечатки, на некоторых рисунках подписи слишком мелкие и читаются с трудом (например, на рис. 18а (стр. 49), 30 (стр. 64), 32 (стр. 66), 52 (стр. 96)). На рисунке 35 (стр. 72) не обозначены буквы (а) и (б).

Указанные замечания не снижают научную значимость и общую положительную оценку работы.

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, были представлены на международных конференциях, отражены в 16 публикациях в российских и зарубежных изданиях, в том числе в ведущих рецензируемых журналах – Nuclear Fusion и Plasma Physics and Controlled Fusion. В 5 публикациях А.А. Белокуров является первым автором.

Диссертация А.А. Белокурова представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на высоком уровне. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание. Представленная работа соответствует критериям Положения о присуждении

ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, которые предъявляются к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Александр Александрович Белокуров достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. – физика плазмы.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт» (123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

Тел. +7 916 243 53 10, e-mail: khabanov@phystech.edu.

Хабанов Филипп Олегович

« 05 » июля 2022 г.

Подпись Хабанова Ф.О. удостоверяю,

Главный ученый секретарь

НИЦ «Курчатовский институт»

К.А. Сергунова

