

Отзыв

на диссертацию Белокурова А.А. «ВЛИЯНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЫ И ИНЖЕКЦИИ МАКРОЧАСТИЦЫ НА ДИНАМИКУ L-Н ПЕРЕХОДА В ТОКАМАКЕ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Известно, что турбулентный перенос частиц и тепла в токамаке может подавляться при существенной вариации по радиусу среднего по времени радиального электрического поля. Такая вариация приводит к неоднородности полоидального электрического дрейфа и декорреляции турбулентных возмущений концентрации и температуры в радиальном направлении. Уменьшение амплитуды турбулентных возмущений в свою очередь ведет к существенному уменьшению средних по времени потоков плазмы в случайных электрических полях, вызванных турбулентностью. Радиальное электрическое поле в плазме близко к неоклассической формуле, что подтверждается многочисленными экспериментами. Такое электрическое поле зависит от градиента концентрации и от ионной температуры. При уменьшении турбулентного переноса градиент концентрации увеличивается и электрическое поле становится больше. Это приводит к дальнейшему подавлению турбулентности, возникает система с положительной обратной связью. На периферии плазмы, где неоклассическое поле и его вариация изначально наиболее сильные образуется транспортный барьер – область с пониженными турбулентными эффективными коэффициентами переноса. В результате токамак переходит в режим с улучшенным удержанием плазмы – Н-режим. Такой режим очень выгоден с точки зрения времени удержания энергии и частиц в токамаке-реакторе, и поэтому планируется как основной режим работы.

В силу положительной обратной связи между полем и градиентом концентрации существуют параметры разряда, при которых в зависимости от предыстории может реализовываться как режим без улучшенного удержания плазмы, так и Н-режим. Диссертация посвящена исследованию таких режимов, в которых динамические процессы – инжекция пеллеты или развитие геодезической акустической моды (ГАМ) приводят к переходу в Н-режим. Инжекция топливных пеллет планируется в ИТЭР и ДЕМО. Геодезические акустические моды возникают спонтанно и фиксируются диагностиками на современных токамаках. Н-режим работы является целевым для будущих токамаков-реакторов, и сейчас является наиболее исследуемым режимом современных токамаков. Поэтому диссертационная работа Белокурова А. А. является актуальной.

Диссертация содержит введение, четыре главы и заключение. Во введении автор описывает круг проблем по теме диссертации. Также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 дается обзор литературы. Автором перечислены работы, в которых развита теория и описаны экспериментальные наблюдения подавления турбулентного переноса в токамаке при развитии Н-режима, и связи Н-режима с пороговой величиной радиальной производной полоидального вращения плазмы. Описаны экспериментальные наблюдения ГАМ при переходе в Н-режим на токамаке ТУМАН-3М и экспериментальные наблюдения ГАМ в токамаке ФТ-2, не приводящие к переходу в Н-режим. Описаны экспериментальные наблюдения по инициации Н-режима инжекцией пеллеты в токамаках ТУМАН-3М, T-10, DIII-D, MAST и EAST.

В Главе 2 проведен анализ сценариев, при которых переход в Н-моду вызван ГАМ. Параметры ГАМ в токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2 взяты частично из эксперимента, частично из гирокинетического моделирования кодом ELMFIRE. Возмущение электрического поля, связанное с ГАМ, наложено на неоклассическое электрическое поле, соответствующее профилям концентрации и температуры. Эволюция профиля концентрации рассчитывается из уравнения диффузии с заданным распределением источника. Показано, что расположение и амплитуда ГАМ в токамаке ТУМАН-3М могут приводить к переходу плазмы в Н-режим. В некоторых режимах для правильного описания эволюции плазмы надо учесть накопленный эффект изменения концентрации за счет серии вспышек ГАМ. Существуют пороговая амплитуда и частота ГАМ, необходимые для перехода в Н-режим. В токамаке ФТ-2 расположение и величина источника частиц и ГАМ не благоприятны для L-H перехода, и даже двукратное увеличение амплитуды и продолжительности ГАМ не приводит к появлению Н-режима, что подтверждается и экспериментом.

В Главе 3 описываются результаты эксперимента по переводу плазмы в режим улучшенного удержания за счет инжекции пеллеты и их анализ. Показано экспериментально, что при появлении связанного с частично разрушенной пеллетой большого источника частиц на периферии плазмы временное изменение потоков может инициировать переход в Н-режим. Проведено численное моделирование такого сценария с самосогласованным учетом изменения профиля концентрации и температуры плазмы и электрического поля.

В Главе 4 проведен аналогичный анализ режимов работы токамака ФТ-2 с большой концентрацией плазмы. Показано, что распределение источника ионизации в таких разрядах благоприятно для перехода в Н-режим.

В Заключении приведены основные результаты диссертации.

Основные новые результаты, полученные в работе:

- 1) Впервые проведен численный анализ влияния ГАМ в токамаках ФТ-2 и ТУМАН-3М на подавление турбулентности и переход в Н-режим.
- 2) Впервые были проведены эксперименты по инициации Н-режима с помощью тангенциальной инжекции пеллеты в периферийную плазму в токамаке ТУМАН-3М, и предложена модель, позволяющая спрогнозировать возможность перехода в зависимости от распределения источника частиц, связанного с инжекцией пеллеты.
- 3) Впервые эта же модель применена для анализа перехода в Н-режим в разрядах высокой плотностью в ФТ-2

Практическая значимость работы подтверждается тем, что в ней представлена и проверена на основе эксперимента достаточно простая модель, позволяющая объяснить широкий класс экспериментальных наблюдений и обладающая предсказательной способностью.

Замечания по диссертации сводятся к следующим:

- 1) На рис. 3 и аналогичных ему рис. 33, 49 дается зависимость потока частиц от градиента концентрации с учетом зависимости коэффициента диффузии от ширины вращения плазмы (уравнение 2). Из обсуждения этих графиков не понятно, каким образом зависимость коэффициента диффузии от ширины пересчитана в зависимость от градиента концентрации. Даже для постоянной температуры ионов ширина

пропорционален производной электрического поля, а значит, не градиенту концентрации, а радиальной производной градиента концентрации.

- 2) Указано, что из-за периодического характера ГАМ шир вращения, связанный с ГАМ, надо уменьшить пропорционально коэффициенту, определяемому отношением частоты ГАМ и инкремента неустойчивости. Для токамаков ТУМАН-ЗМ и ФТ-2 этот коэффициент приблизительно 0.2. Затем указано, что при анализе развития Н-моды под действием ГАМ электрическое поле ГАМ и неоклассическое поле складываются. Как при этом учтен коэффициент в эффективном шире за счет ГАМ?
- 3) На рис. 44а, 45а – не обсуждается, почему интегральный источник частиц в случае разрушенной пеллеты существенно больше. При разрушении пеллеты количество вещества в ней не увеличивается.
- 4) На рис. 49а показан случай, когда без источника ионизации, связанного с пеллетой, Н-режим невозможен. Не объяснено, почему он остается, когда источник частиц, связанный с пеллетой, исчезает.
- 5) Можно отметить некоторую небрежность в оформлении результатов работы. Уравнения пронумерованы частично. Подписи к графикам оказываются на другой странице. Понятия вводятся в рассмотрение до их формального определения, например, шир вращения упоминается уже в начале Главы 1, а его определение дается гораздо позже. В Главе 3 «*Для того, чтобы исключить неоднозначность, связанную с выбором турбулентной моды, значения инкремента нарастания турбулентности независимо определялись из гирокинетического моделирования с посредством кода ELMFIRE и линейного кода GENE [89].*» Результаты моделирования кодом GENE затем не приведены. Иногда некорректно описаны причинно-следственные связи, о которых можно заключить из эксперимента. Например, в п. 1.2 делается утверждение «*При этом момент перехода обычно соответствует исчезновению колебаний ГАМ. Данное наблюдение позволяет предположить, что радиальное электрическое поле ГАМ может служить фактором, ответственным за переход в режим улучшенного удержания.*»

Сделанные замечания не затрагивают основных выводов и результатов диссертации. Диссертация А.А. Белокурова представляет собой законченное исследование, а автореферат и опубликованные работы в достаточной мере отражают содержание диссертации.

Работа удовлетворяет всем требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.09 – физика плазмы, а А.А. Белокуров несомненно заслуживает присвоения искомой степени.

Официальный оппонент,
доктор физ.-мат. наук,
ведущий научный сотрудник НЛ ПМИПСТ
ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
195251 ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург
+7921 977 82 59
E.Kaveeva@spsstu.ru

Подпись: *Л*
УДО
Ведущий с
по кадрам.
25.04.2022

Кавеева Елизавета Геннадьевна

25.04.2022