

04:09;12

Пристеночные явления в режимах улучшенного удержания на токамаке ФТ-2

© В.Н. Будников, В.В. Дьяченко, Л.А. Есипов, Е.Р. Итс,
С.И. Лашкул, А.Д. Лебедев, А.Ю. Степанов, И.Е. Сахаров,
В.Ю. Шориков, С.В. Шаталин, Е.О. Чечик, О.Н. Щербинин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 10 ноября 1996 г.

Анализируется обнаруженный в экспериментах по нижнегибридному нагреву на токамаке ФТ-2 переход в режим улучшенного удержания (H-моду). Основное внимание уделяется процессам, происходящим в пристеночной области: подавлению микрофлуктуаций при L–H переходе и развитию периферийной локально запертой неустойчивости — ELM-активности. Обсуждаются условия перехода в H-моду в случае только омического нагрева. Данные сопоставляются с результатами экспериментов на крупных токамаках.

Переход в режим улучшенного удержания энергии и частиц на токамаке ФТ-2 ($a = 8$ см, $R = 55$ см, $B_t = 2.2$ Тл, $I_p = 22–40$ кА) был обнаружен в экспериментах по нижнегибридному нагреву (НГН) ($P_{RF} \leq 150$ кВт, $f = 920$ МГц) после выключения ВЧ импульса: наблюдалось резкое снижение излучения в линии H_β при росте средней плотности и диамагнитного сигнала. Также отмечалось подавление МГД колебаний и небольшое снижение напряжения на обходе плазменного шнура U_p . Время жизни энергии, составлявшее при омическом нагреве ~ 0.8 мс, после окончания ВЧ импульса возрастало в 2–3 раза и становилось сравнимым с оценками, полученными по скейлингам Кэй Голдстоуна и DIII-JET [1]. Наблюдаемые явления позволили идентифицировать этот режим с H-модой. В этой работе приводятся новые экспериментальные данные, связанные с наблюдением перехода в режим улучшенного удержания.

Известно, что аномально высокий перенос тепла и частиц в токамаке и его снижение в H-моду связаны с микрофлуктуациями плазмы и их подавлением. Колебания плазмы в области частот $f < 500$ кГц в этой работе исследовались с помощью диагностик

усиленного рассеяния и рефлектометрии [2]. Зондирование плазменного шнура проводилось со стороны сильного магнитного поля необыкновенной волной на частотах 53–78 ГГц. В зависимости от частоты волна могла рассеиваться назад либо на внешней стороне тороидального плазменного шнура в своем верхнем гибридном резонансе (усиленное рассеяние), либо в области отсечки на внутренней стороне (рефлектометрия). Было обнаружено, что уже в ходе ВЧ импульса плазменные колебания уменьшаются на величину $\sim 50\%$ и максимум такого подавления находится на периферии разряда на радиусе $r = \pm 7$ см. Более того, при L–H переходе уровень колебаний на внутренней стороне тора оставался низким и после окончания ВЧ импульса. Оценки изменения энергетического времени жизни в плазме при дополнительном нагреве были затруднены из-за неучтенных потерь ВЧ мощности в районе грилла, тем не менее рост времени жизни частиц и подавление флуктуаций позволяли предположить, что транспортные потери снижаются уже в ходе НГН. Сам же процесс перехода к улучшенному удержанию маскируется дополнительным потоком нейтрального водорода со стенки, вызванным бомбардировкой поверхности надтепловыми высокоэнергичными частицами. В тех случаях, когда роль дополнительного поступления нейтрального водорода со стенки не велика, как например в экспериментах с большим плазменным током $I_{pl} = 40$ кА и $P_{LH} = 100$ кВт, характерный спад в излучении линии H_{β} наблюдался непосредственно во время ВЧ импульса.

Как уже отмечалось в работе [1], при переходе в H-режим на осциллограммах излучения H_{β} иногда возникали резкие всплески, объясняемые проявлением периферийно локально запертой неустойчивости, так называемыми ELMми. Дополнительная информация о характере этих явлений также была получена входе последних экспериментов на токамаке ФТ-2. На рис. 1, а приведены осциллограммы сигналов магнитных зондов и проинтегрированные в полосе частот от 10 до 500 кГц сигналы рефлектометра, когда в режиме H-моды наблюдалась ELM-активность. Было обнаружено, что перед ELM-вспышками магнитные зоны регистрируют возникновение характерных когерентных колебаний. Частоты колебаний такого магнитного прекурсора лежали в интервале $\nu_{prec} \approx (24–32)$ кГц. Кросскорреляционный анализ сигналов магнитных зондов позволил идентифицировать в этом случае полоидальную моду с высоким

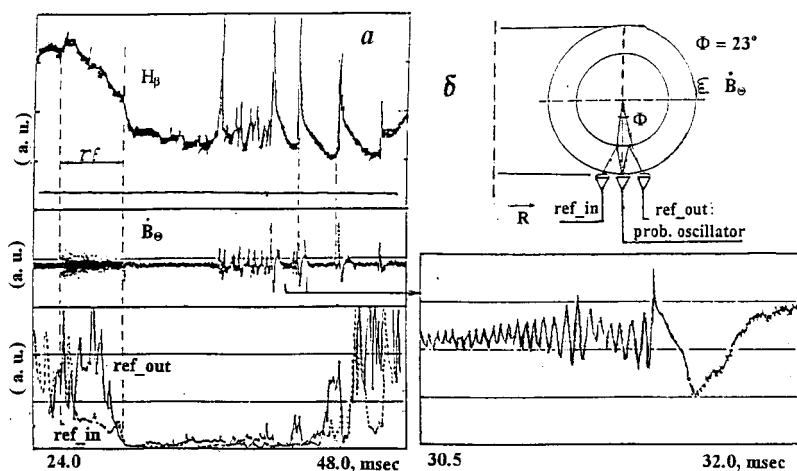


Рис. 1. *a* — осциллограммы интенсивности излучения в линии H_β , сигнала магнитного зонда B_θ и рефлектометра при переходе в H-моду. Всплески H_β связаны с ELM-неустойчивостью. Магнитный прекурсор, отмеченный стрелкой, приведен в увеличенном масштабе. Пунктиром обозначен рефлектометрический сигнал с внутренней антенны — (ref_in); (ref_out) — сигнал внешней антенны, *б* — схема расположения антенн рефлектометра.

m , наиболее вероятно с $m \sim 9$, развивающуюся на резонансной магнитной поверхности $q = 4.5$. Схема расположения антенн рефлектометра показана на рис. 1, б. Зондирование плазмы в этих измерениях проводилось на частоте 27 ГГц. Мощность вводилась в виде обыкновенной волны через антенну, расположенную внизу тороидальной камеры. Две другие соседние антенны (ref_in) (ref_out), расположенные в этом полоидальном сечении, служили приемниками сигнала, отраженного от внутренней и внешней областей тороидального плазменного шнура соответственно. Информация о колебаниях плазмы содержалась в амплитудной модуляции отраженного излучения. При переходе в H-моду рефлектометром, так же как и магнитными зондами, регистрировалось подавление микрофлуктуаций. Причем снижение турбулентности отмечалось во всем спектральном диапазоне $f < 500$ кГц. Вместе с тем перед каждым

ЕЛМ-всплеском синхронно с магнитным прекурсором отмечалась раскачка когерентных колебаний на частотах, соответствующих моде, определяемой по магнитным зондам. Они были локализованы на периферии разряда со стороны слабого магнитного поля на радиусе $r = 6$ см, где $q = 4$. Как видно из рис. 1, *a*, они проявляются в основном на сигнале внешней антенны (ref_out). Для объяснения наблюдаемых явлений можно сопоставить результаты наших измерений с экспериментами на больших токамаках. Так, в условиях перехода в режим Н-моды и возникновения ЕЛМ-неустойчивостей появление характерного магнитного прекурсора связывалось здесь с развитием резистивных баллонных мод на периферии разряда. Такие ЕЛМ-неустойчивости классифицировались как ЕЛМы III-го типа в отличие от ЕЛМов I и II-го типов, вспышка которых рассматривалась в основном с точки зрения развития идеальных баллонных мод [3].

Известно, что переход из L- в H-моду происходит в тех случаях, когда тепловой поток через сепаратрису плазменного шнура достигает некоторой пороговой величины P_{thr} [4]. Так, рассчитанное по скейлингу, полученному для токамака ASDEX $P_{thr} = 0.04 \times n_e \cdot S \cdot B_t$ [МВт, $m^{-3} \cdot 10^{20}$, m^{-2} , Тл], при $\bar{n}_e = 3 \cdot 10^{19} m^{-3}$ пороговое значение для FT-2 $P_{thr} = 55$ кВт. В то же время на основе экспериментальных данных в режиме омического нагрева (ОН) тепловой поток через последнюю замкнутую магнитную поверхность (LCFS) разряда с учетом радиационных потерь P_{rad} и затрат, связанных с изменением внутреннего энергосодержания dW/dt , оценивался как $P_{LCFS} = P_{ОН} - P_{rad} - dW/dt = (30-40)$ кВт, таким образом, $P_{thr} > P_{LCFS}$ и, следовательно, для L-H перехода требовался дополнительный энерговклад, который и обеспечивался НГ нагревом. Можно предположить, что улучшенное удержание, начавшись при НГН, сохранялось и после его окончания только из-за эффекта гистерезиса, т. е. в силу условия $P_{thr}^{L-H} > P_{thr}^{H-L}$. Этот факт отмечался также и на крупных установках [4]. При обратном H-L переходе существует более низкое пороговое значение мощности, что связано, по-видимому, с уширением профиля канала тока и снижением рециклинга водорода на периферии разряда [1].

Переход в режим улучшенного удержания в последних экспериментах на токамаке FT-2 удалось осуществить в условиях только омического нагрева. Для этой цели с помощью управля-

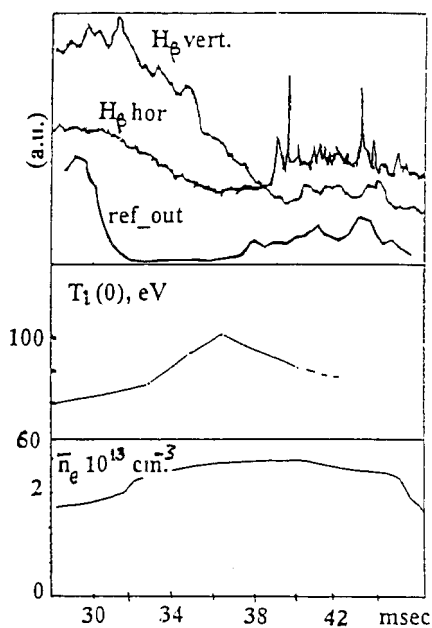


Рис. 2. Экспериментальные данные для омического L–H перехода. H_{β}^{vert} и H_{β}^{hor} — спектральные сигналы по двум взаимноперпендикулярным хордам: вертикальной и горизонтальной соответственно. (ref_out), $T_i(0)$, \bar{n}_e — рефлектометрический сигнал внешней антенны, центральная ионная температура и средняя плотность соответственно.

ющих полей на 3-й мс разряда плазма прижималась к наружной стороне тороидальной камеры. Такое контролируемое смещение (в пределах 0.5 см) приводило к характерному снижению излучения линии H_{β} , как показано на рис. 2 для двух взаимноперпендикулярных центральных хорд. Одновременно с этим наблюдалось и подавление микрофлуктуаций, рост средней плотности и ионной температуры $T_i(0)$ плазмы. Здесь выполнение условия $P_{LCFS} \geq P_{thr}^{L-H}$ обеспечивалось уменьшением P_{rad} . Измерения в тени диафрагмы с помощью ленгмюровского зонда показали, что в ходе такого перемещения на внешней стороне тороидального плазменного шнура в тени диафрагмы на радиусе $r = 8.5$ см (в отличие от внутренней

стороны) происходит заметное увеличение плотности n_{eL} с $(1-1.5) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ до $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и температуры T_{eL} с $(5-10) \text{ эВ}$. Можно отметить, что в этом случае в режиме H-моды реализуется более продолжительное без EIM-неустойчивостей состояние плазмы. В качестве причин подавления турбулентности плазмы на периферии разряда в публикациях рассматривается несколько механизмов, в частности рост шира вращения плазмы. Определенную роль в этом может играть также и снижение сил трения, связанное с уменьшением концентрации нейтрального водорода [5].

Таким образом, приведенные экспериментальные данные указывают на существенную роль параметров пристеночной плазмы, влияющих на условия L-H перехода. Было обнаружено, что при подавлении микроколебаний наблюдается полоидальная асимметричность в их изменениях. Особую роль при переходе в режим улучшенного удержания, по-видимому, играют условия, создаваемые на внешней стороне тороидального плазменного шнура со стороны слабого магнитного поля, где при L-H переходе обнаруживается наиболее сильное снижение плазменных флуктуаций и излучения в линии H_β . В этом результаты наших измерений согласуются с выводами, полученными на других более крупных токамаках [6].

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект N 95-02-04072.

Список литературы

- [1] Будников В.Н. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 59. В. 10. С. 685-689.
- [2] Будников В.Н. и др. // Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 10. С. 865-871.
- [3] Zohm H. et al. // Nuclear Fusion. 1992. V. 32. N 3. P. 481-489.
- [4] Zohm H. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1995. V. 37. P. 437-446.
- [5] Hahn T.S., Burrell K.N. // Phys. Plasma. 1995. V. 2 (5). P. 1648-1651.
- [6] Rhode T.L. et al. // Nuclear Fusion. 1993. V. 33. N 12. P. 1787-1797.