

04

## Эффект подавления флуктуаций плазмы при переходе в режим улучшенного удержания при быстром подъеме тока на токамаке ФТ-2

© В.Н. Будников, В.В. Буланин, А.В. Верс, Л.А. Есипов,  
Е.Р. Итс, С.И. Лашкул, А.В. Петров, А.Ю. Тукачинский

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

Поступило в Редакцию 4 июля 1997 г.

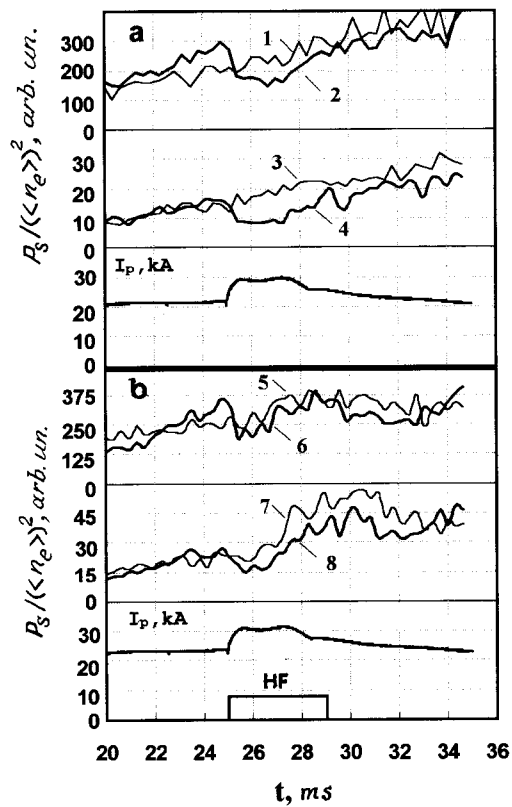
Методом коллективного рассеяния излучения  $\text{CO}_2$ -лазера проведено исследование микротурбулентности плазмы в токамаке ФТ-2 при быстром подъеме тока, когда заметным образом изменялся шир магнитного поля. В эксперименте наблюдалось подавление флуктуаций плазмы, время появления которого было скоррелировано с переходом разряда в режим улучшенного удержания. Полученные данные свидетельствуют о том, что подавление колебаний происходило преимущественно в центральной зоне токамака, обнаружено явление затягивания подавления или гистерезис. Эволюция спектральных характеристик флуктуаций в процессе подавления анализируется с использованием модельных расчетов шира магнитного поля.

В последнее время на крупных токамаках путем создания отрицательного шира магнитного поля был достигнут переход к режиму улучшенного удержания в центральных областях плазмы (см., например, [1]). Было обнаружено сильное (до 40 раз) подавление скоростей переноса заряженных частиц и энергии. В связи с этими результатами на токамаке ФТ-2 ( $R = 5 \text{ см}$ ,  $a = 8 \text{ см}$ ,  $B_t = 2.2 \text{ Т}$ ) для выяснения влияния возмущений профиля  $q(r)$  на удержание плазмы в малых токамаках были предприняты эксперименты с быстрым подъемом тока плазмы  $I_p$  [2]. Прирост тока  $\Delta I_p$  от 22 до 30 кА, который поддерживался в течение 3 ms, приводил к переходу в режим с увеличением до 3 раз временем жизни заряженных частиц и энергии ионов. Подобный переход наблюдался и в комбинированных разрядах с подъемом тока и дополнительным нагревом ВЧ излучением нижегибридного диапазона

(НГН). Совокупность экспериментальных данных [2] указывала на возникновение транспортного барьера в центральных областях разряда подобно тому, как это наблюдалось на крупных тороидальных установках.

По теоретическим представлениям переход в режим с улучшенным удержанием связан в конечном счете с подавлением турбулентных флуктуаций плазмы [4]. Для экспериментального определения такой связи на токамаке ФТ-2 были проведены исследования поведения турбулентности плазмы малого масштаба (0.01–1 см) методом коллективного рассеяния излучения CO<sub>2</sub>-лазера под малыми углами. Диагностическая схема, разработанная на ФТ-2, позволяла проводить параллельный анализ  $K$ -спектра флуктуаций [3]. Методом гомодинного детектирования одновременно регистрировалось рассеяние на флуктуациях четырех различных пространственных масштабов для диапазона волновых чисел  $K_{\perp} = 6.3\text{--}40\text{ см}^{-1}$  и в частотной области от 0.02 до 2 МГц. Лазерный луч направлялся вдоль центральной вертикальной хорды малого сечения ( $X = 0$ ) и вдоль периферийных хорд, отстоящих от оси разряда на расстоянии  $X = +6\text{ см}$  и  $+6.5\text{ см}$  в сторону внешнего обхода тора. При малых углах рассеяния в условиях эксперимента на ФТ-2, когда регистрировалось излучение, рассеянное на всей длине лазерного пучка в объеме плазмы, спектр мощности выходных сигналов приемников  $P_s(F)$  определялся интегралом от локального спектра мощности флуктуаций электронной плотности вдоль всей хорды зондирования.

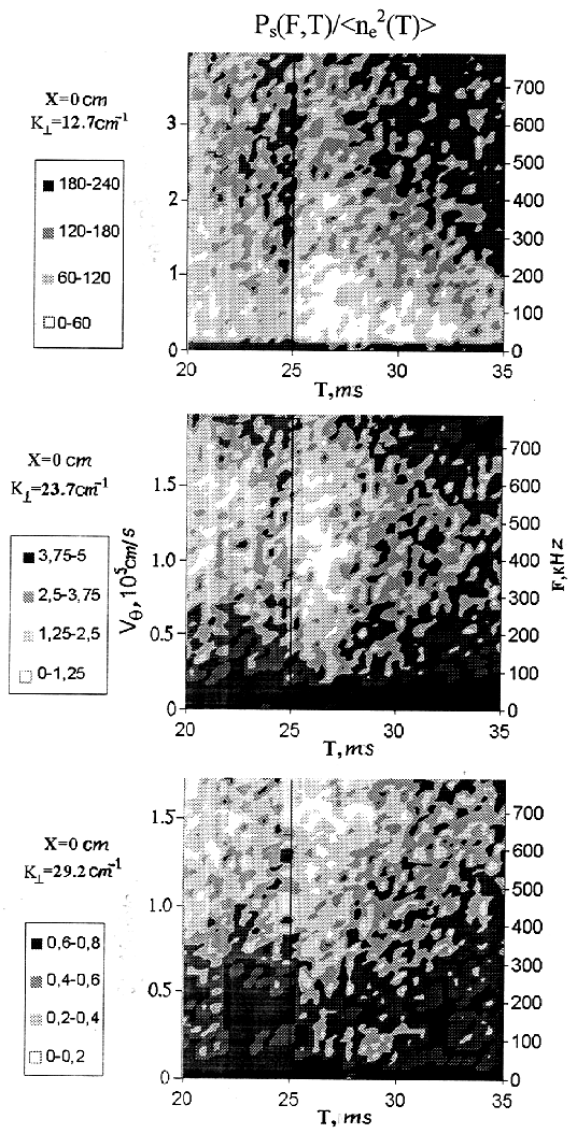
На рис. 1, а приведены для сравнения временные зависимости относительной величины  $P_s/(\langle n_e \rangle)^2$ , усредненной в полосе частот  $F$  от 100 до 800 кГц, для омического (ОН) разряда и разряда с приростом тока ( $\Delta I_p$ ). Нормировка на квадрат среднехордовой плотности плазмы  $\langle n_e \rangle$  проведена для того, чтобы исключить из рассмотрения возрастание  $P_s$  из-за всегда наблюдавшегося при подъеме тока и нижнегибридном нагреве увеличения  $\langle n_e \rangle$ . Данные для двух значений волнового числа  $K_{\perp}$ , полученные при центральном зондировании ( $X = 0$ ), представлены в одних и тех же относительных единицах. Видно, что включение дополнительного тока сразу приводило к уменьшению уровня флуктуаций. Примечательно, что низкий уровень турбулентности сохранялся длительное время после окончания плоской части импульса добавочного тока. Такой временной характер в подавлении флуктуаций малого масштаба коррелирует с длительным временем существования высокого уровня плотности плазмы при возникновении улучшенного удержания заряженных частиц [2]. В комбинированных разрядах (НГН+ $\Delta I_p$ )



**Рис. 1.** *a* — временные зависимости относительной величины  $P_s / \langle n_e \rangle^2$  для омического режима разряда (кривые 1, 3) и разряда с приростом тока (2, 4) при центральном зондировании ( $X = 0$ ), для 1 и 2 —  $K_{\perp} = 12.7 \text{ cm}^{-1}$ , для 3 и 4 —  $K_{\perp} = 18.2 \text{ cm}^{-1}$ , *b* — те же зависимости в омическом (5, 7) и комбинированном режимах (НГН+ $\Delta I_p$ ) (6, 8), 5, 6 —  $K_{\perp} = 12.7 \text{ cm}^{-1}$ , 7, 8 —  $K_{\perp} = 18.2 \text{ cm}^{-1}$ .

также отмечалось уменьшение интенсивности флуктуаций (см. рис. 1, *b*). Это ослабление флуктуаций было локализовано в диапазоне волновых чисел —  $15\text{--}25 \text{ cm}^{-1}$ . Как и в случае с приростом тока, низкий уровень флуктуаций отмечался длительное время, что соответствовало

обнаруженному в тех же разрядах увеличению времени удержания энергии ионов [2]. При рассмотрении полученных данных следует иметь в виду, что в эксперименте регистрировалось излучение, рассеянное в объеме вытянутом вдоль всей вертикальной хорды зондирования. Поэтому относительно малое уменьшение выходных сигналов фотоприемников (рис. 1) могло в действительности отражать факт сильного подавления флуктуаций в узком интервале по малому радиусу токамака. В измерениях отсутствовала возможность прямого определения зоны наибольшего подавления. Однако перемещая объем рассеяния вдоль большого радиуса токамака, можно было косвенным образом оценить пространственную область подавления микротурбулентности. Предпринятые с этой целью измерения с периферийным расположением хорды зондирования показали, что уровень флуктуаций или совсем не изменяется при подъеме тока, или незначительно уменьшается только в начале импульса дополнительного тока. Эти данные, видимо, свидетельствуют о том, что по крайней мере через 2 ms после начала нарастания тока подавление флуктуаций в отличие от обычного L–H перехода (см. [4]) захватывает центральную область разряда ( $r < 5$  cm). Другие косвенные данные о положении зоны подавления микротурбулентности могут быть получены из спектральных измерений рассеянного излучения. На рис. 2 показаны временные эволюции относительных спектров флуктуаций  $P_s(F)/((n_e))^2$  в режиме с подъемом тока при центральном зондировании. Видно, что с началом подъема тока, отмеченным на рис. 2 вертикальной прямой, флуктуации начинают подавляться в широкой частотной полосе. Эта полоса, которая соответствует пониженному уровню колебаний и в омической стадии разряда, явным образом смещается с ростом  $K_{\perp}$  в более высокочастотную область. Через 3 ms спектральная зона подавления сужается, наблюдаясь, однако, до 10 ms после старта дополнительного тока. Смещение области подавления с ростом  $K_{\perp}$  допускает интерпретацию, основанную на том, что появление каждой частотной компоненты в спектрах определяется доплеровским смещением  $F = K_{\perp} V_{\theta} / 2\pi$  ( $V_{\theta}$  — полоидальная скорость распространения колебаний), а наличие многих частотных компонент в спектре  $P_s(F)$  при фиксированном  $K_{\perp}$  в основном связаны с радиальной неоднородностью  $V_{\theta}$  в объеме рассеяния, вытянутом вдоль всей вертикальной хорды. Если представить  $P_s$  в виде зависимости от скорости  $V_{\theta}$  (рис. 2), то можно видеть, что подавление в начальной стадии подъема тока проявляется для разных  $K_{\perp}$  приблизительно в одной и той же широкой области скоростей  $V_{\theta} = 5 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$  cm/s. С течением времени



**Рис. 2.** Временные эволюции относительных спектров флуктуаций  $P_s(F) / \langle n_e \rangle^2$  в режиме с подъемом тока при центральном зондировании.

этот интервал сужается к диапазону вблизи  $V_\theta \approx 10^5$  cm/s. При известном радиальном профиле  $V_\theta(r)$  этот диапазон по скорости можно соотнести с областью подавления флуктуаций по малому радиусу. По неоклассическим оценкам скорость  $10^5$  cm/s соответствует градиентной области с  $r \approx 4$  cm.

Таким образом, при подъеме тока наблюдается подавление флуктуаций плазмы малого масштаба. Период наблюдения этого подавления коррелирует со временем возникновения улучшенного удержания заряженных частиц и энергии ионов. По теоретическим представлениям подавление флуктуации может быть связано с возникновением областей с отрицательным или нулевым широм магнитного поля  $s = (r/q)dq/dr$ . Для условий токамака ФТ-2 были проведены оценки эволюции профиля  $q(r)$  и соответственно  $s(r)$  путем моделирования процесса подъема тока с помощью кода АСТРА. Такое моделирование показало, что в начале импульса тока на периферии разряда возникает область с уплощенным распределением  $s(r) > 0$ , которая с течением времени перемещается к оси разряда, где через 1.5–2 ms образуется широкая зона со значением  $s \approx 0$ . Однако, как видно из рис. 2, сильное подавление флуктуаций в широкой спектральной полосе наблюдалось еще до возникновения в центральной зоне области с  $s \approx 0$ . Можно предположить, что в условиях эксперимента подавление колебаний связано с небольшими нестационарными уплощениями профиля с  $s(r) > 0$ , возникающими при диффузии тока. Однако факт подавления флуктуаций сразу в широком частотном диапазоне делает более правдоподобным предположение о том, что уменьшение уровня турбулентности связано с быстрой перестройкой шира вращения. Такую перестройку можно ожидать, например, из-за изменения скоростей пинчевания Уэера (Ware) при возникновении в плазме сильно неоднородного продольного электрического поля [2]. Как показало моделирование, через относительно короткое время — 5 ms возмущенное распределение  $q(r)$  релаксирует к равновесному стационарному профилю, соответствующему полному току в плазме. Поэтому сохранение пониженного уровня флуктуаций при больших временах ( $> 5$  ms), как вид гистерезисного явления, видимо, не связано с деформацией  $q(r)$ . Подобные явления отмечаются и на крупных токамаках и находят свое подтверждение в различных моделях перехода к улучшенному удержанию (см., например, [5]).

Данная работа проводилась при поддержке РФФИ (грант 97–02–18119), INTAS (грант 94–2236) и INTAS–RFBI (грант 95–1351).

## Список литературы

- [1] *Levinton F.M., Zarnstorff M.C., Batha S.H.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. N 24. P. 4417–4420.
- [2] *Lashkul S.I., Budnikov V.N., Bulanin V.V.* et al. // 24EPS Conf. on Controll. Fusion and Plasma Phys. Abstracts, 1997. P. 199.
- [3] *Budnikov V.N., Bulanin V.V., Dyachenko V.V.* et al. // Proc. of 23 Europ. Phys. Soc. Conf. on Controll. Fusion and Plasma Phys. 1996. V20C. P. 855–858.
- [4] *Burrell K.H.* // Phys. Plasmas. 1997. V. 4. N 5. P. 1489–1518.
- [5] *Rozhanksy V., Tendler M., Voskoboynikov S.* // Proc. of 23 Europ. Phys. Soc. Conf. on Controll. Fusion and Plasma Phys. 1996. V. 20C. P. 444–447.