

04;09;12

## **Наблюдение улучшенного удержания в центре плазмы токамака ФТ-2 при быстром подъеме тока и нижнегибридном нагреве**

© В.Н. Будников, В.В. Буланин, В.В. Дьяченко, Н.А. Жубр,  
Л.А. Есипов, Е.Р. Итс, С.И. Лашкул, А.Ю. Попов,  
А.Ю. Степанов, И.Е. Сахаров, А.С. Тукачинский

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

Поступило в Редакцию 15 мая 1997 г.

Задача оптимизации условий для центрального нижнегибридного нагрева явилась стимулом для проведения экспериментов с организацией улучшенного удержания в центре разряда по аналогии с разрядами типа разрядов с обращенным широм  $q$ -профиля. Для этих целей на токамаке ФТ-2 в ходе нижнегибридного нагрева использовался импульс быстрого подъема тока с 22 до 30 кА за 0.5 ms. В этих экспериментах было обнаружено существенное увеличение времени жизни энергии в ионной компоненте. Отмечается снижение потоков высокоэнергичных атомов перезарядки и определяемых для центральных областей разряда уровня микроколебаний плазмы. Эти и другие данные, так же как и результаты моделирования с помощью кода, использовались для выяснения механизма, приводящего к улучшению удержания энергии и частиц в центре разряда. В работе рассматривается влияние на транспортные процессы изменения как  $q$ -профиля, так и электрических полей, происходящих при быстром подъеме тока.

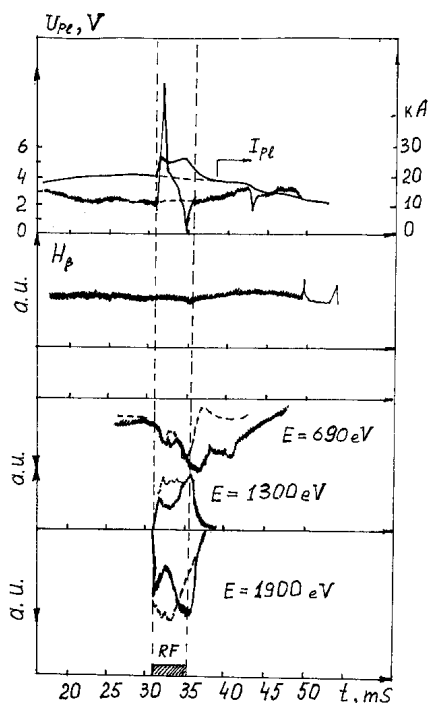
В экспериментах по нижнегибридному нагреву на токамаке ФТ-2 был обнаружен эффект перехода плазмы в режим улучшенного удержания, который по всем признакам был идентифицирован как переход в Н-моду с появлением транспортного барьера на периферии разряда [1,2]. Тем самым было показано, что, несмотря на малые размеры установки ( $R = 0.55$  м,  $a = 0.08$  м,  $B_t = 2.2$  Т,  $I_{pl} = 2$  кА,  $t_p = 50$  мс), плазма проявляет те же свойства в бифуркации состояния, которые характерны для крупных установок. Этот факт, а также задача оптимизации условий для нижнегибридного нагрева явились стимулом при проведении новых экспериментов с попыткой организации улучшенного удержания в центре разряда по аналогии с разрядами типа "super shot", "hot-ion-mode" или разряда с обращенным широм  $q$ -профиля [см., например, 3,4].

Для этих целей на токамаке ФТ-2 в ходе нижнегибридного нагрева ( $P_{RF} = 90$  кВт,  $f = 920$  МГц,  $\Delta t = 4$  мс) использовался импульс быстрого подъема тока с 22 до 30 кА ( $\Delta t_t = 2.5$  мс и временем нарастания за  $\Delta t = 0.5$  мс). В этих экспериментах было обнаружено:

1. Значительное (в 1.5–2 раза) снижение потока высокоэнергичных атомов перезарядки с  $E > 1000$  эВ при сохранении или увеличении потока, определяемого тепловыми ионами плазмы. На рис. 1 сравниваются такие потоки нейтралей с энергиями  $E = 1900$ , 1300 и 650 эВ для случаев одного ВЧ нагрева и случаев, когда одновременно использовался  $\Delta I +$  ВЧ. Здесь же приведены осциллограммы  $I_{pl}$ ,  $U_{pl}$  и излучения из плазмы в линии  $H_{\beta}$ .

2. Существенное (примерно в 2–3 раза) увеличение времени жизни энергии в ионной компоненте. Это время определялось по росту и спаду центральной ионной температуры. В ряде экспериментов оно становилось сопоставимым со временем жизни частиц. На рис. 2 приведены изменения центральной ионной температуры для трех различных сценариев разряда, когда использовался (а) один быстрый подъем тока  $\Delta I$ , (б) только дополнительный ВЧ нагрев и (с) совместно ВЧ и  $\Delta I$ .

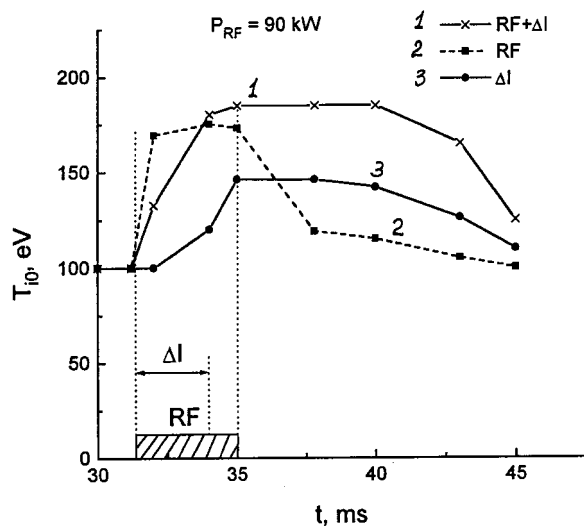
3. Характерный рост плотности плазмы, объясняемый увеличением времени жизни частиц в центре разряда. При этом плотный центральный ядро сохранялся и в постнагревной стадии более 5 мс. Профили плотности плазмы  $n_e(r)$  для 4 моментов времени (ОН, в конце ВЧ импульса и спустя 5 и 10 мс после отключения дополнительного нагрева) приведено на рис. 3.



**Рис. 1.** Осциллограммы основных параметров разряда: ток плазмы —  $I_{pl}$ ; напряжение на обходе плазменного шнура —  $U_{pl}$ ; излучение из плазмы в линии  $H_{\beta}$  и потоки нейтралей перезарядки с энергиями  $E = 1900, 1300$  и  $650$  eV, приведенные для двух разных случаев дополнительного нагрева: ВЧ (тонкая пунктирная линия) и совместный (ВЧ+ $\Delta I$ ) нагрев.

4. Увеличение скорости вращения плазмы в 2–3 раза. Этот результат был получен в ходе кросскорреляционной обработки сигналов МГД-зондов.

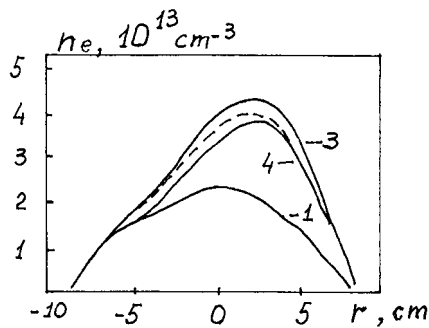
5. Значительное подавление микроколебаний плазмы в центральных областях разряда, определявшееся по рассеянию излучения СО-2 лазера. Измерения проводились в области частот (100–800) kHz. Диагностика позволяла исследовать флуктуации электронной плотности в диапазоне волновых чисел  $k_{\perp} = (12–30) \text{ см}^{-1}$ . Излучение СО<sub>2</sub> лазера реги-



**Рис. 2.** Поведение ионной температуры в трех случаях: быстрый подъем тока —  $\Delta I$ ; (ВЧ+ $\Delta I$ ) и один ВЧ дополнительный нагрев.

стрировалось при малых углах рассеяния в объеме, вытянутом вдоль зондирующего лазерного луча в вертикальном направлении. В эксперименте сравнивались сигналы при зондировании вдоль центральной и смещенной на 6 см боковой хорд. Подавление плазменных колебаний, регистрируемых вдоль центральной хорды, наблюдалось при быстром подъеме тока, а также одновременном использовании  $\Delta I + \text{ВЧ}$ . Измерения рассеянного излучения при зондировании вдоль периферийной хорды показали, что уровень флуктуация здесь не изменяется. В случае же одного ВЧ нагрева микроколебания плазмы не подавлялись ни в центре, ни на периферии [5].

Таким образом, в нашем эксперименте при быстром подъеме тока отмечаются все признаки перехода к улучшенному удержанию в центре разряда, так же как и на больших установках, таких как TFTR, DIII-D и Tore Supra [3,4]. Во всех отмечаемых случаях улучшенное удержание в центре плазменного столба наблюдалось на стадии роста плазменного тока при дополнительном нагреве или в режиме токов увлечения. В этих



**Рис. 3.** Профили плотности плазмы  $n_e(r)$  в эксперименте с  $(ВЧ+\Delta I)$  для 4 моментов времени: 1 — 30-я ms, омический нагрев; 2 — 35-я ms (показана пунктиром); 3 — 37-я ms и 4 — 40-я ms.

работках было экспериментально показано, что в разряде происходит формирование отрицательного значения шира  $q$ -профиля. Снижение теплопереноса могло быть следствием этого факта. В нашем случае нет таких прямых измерений, но моделирование с помощью "ASTRA"-кода указывает на то, что в условиях эксперимента на токамаке ФТ-2 через  $\Delta\tau = 1-2$  ms также происходит заметное уплощение профиля плотности тока в центре, которое приводит для области  $r \leq 2$  см к низким значениям шира  $s = (r/q)(dq/dr) \sim 0$ . Тем самым можно связать наблюдаемые явления с перестройкой профиля канала тока. В то же время обращает на себя внимание тот факт, что снижение потоков быстрой компоненты нейтрали перезарядки, так же как и подавление флуктуаций, начинается раньше, т. е. сразу с момента включения подъема тока. Это наводит на мысль, что в плазме при подъеме тока проявляются процессы, связанные не только с диффузией продольных электрических полей, приводящие к изменению профиля плотности тока, но и процессы обусловленные резким изменением радиального распределения самих этих полей. Мы предполагаем, что в этом случае важную роль должен играть пинч Уэера [6]. В частности, на начальной стадии подъема тока возникает такой  $\text{grad} E_{\parallel}$ , что на периферии разряда продольное электрическое поле становится в несколько раз больше значения его в центре. В этом случае для таких больших  $E_{\parallel}$  направленный внутрь поток запертых частиц —  $\sim \sqrt{\epsilon} c E_{\parallel} / B_p$  может скомпенсировать и даже

превысить их диффузионные потери. Одновременно должна увеличиться и продольная скорость ансамбля запертых ионов. Усиление пинчевания, а также некоторый рост продольной скорости могут привести к заметному изменению доли запертых ионов. Этим можно объяснить падение потоков высокоэнергичных атомов перезарядки, измеряемых анализатором в эксперименте с  $\Delta I + ВЧ$  (пункт 1). Процессы, связанные с пинчеванием заряженных частиц, могут в конечном счете сказаться на распределении радиальных электрических полей и временах удержания в плазме.

Из приведенных фактов видно, что плазменные процессы при быстром подъеме тока носят сложный характер и требуют более аккуратного теоретического и экспериментального рассмотрения.

Авторы выражают благодарность F.X. Soldner (JET, UK) и В.А. Рожанскому (СПбГТУ, Россия) за обсуждение результатов экспериментов.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ № 95–02–04072 и гранта INTAS–RFBR 95–1351.

## Список литературы

- [1] *Budnikov V.N. et al. // Proceeding of 23rd EPS Conf. on Controlled Fus. and Pl. Fus. Kiev, 1996. P. 779–782.*
- [2] *Будников В.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23, В. 1. С. 53–58.*
- [3] *Batha S.H. et al. // Phys. Plasma. 1996. V. 3 (4). P. 1348–1354.*
- [4] *Strait E.J. et al. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. N 24. P. 4421–4424.*
- [5] *Andrejko M.V., Askinazi L.G., Budnikov V.N. et al. IAEA–CN–64/AP2–13. Montreal, 1996.*
- [6] *Rojanskii V., Tendler M. // Rev. Plasma Phys. / Ed. by B.B. Kadomtsev. Consultants Bureau. N.Y., 1996. V. 19. P. 147.*