

УЛУЧШЕННОЕ УДЕРЖАНИЕ, ИНИЦИИРОВАННОЕ НИЖНЕГИБРИДНЫМ НАГРЕВОМ В ТОКАМАКЕ ФТ-2

*В.Н.Будников, В.В.Дьяченко, Л.А.Есипов, Е.Р.Итс, С.И.Лашкул,
А.Д.Лебедев, А.Ю.Степанов, К.А.Подушникова, О.Н.Щербинин,
И.Е.Сахаров, С.В.Шаталин*

*Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН
194121 Санкт-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 24 декабря 1993 г.

После переработки 11 апреля 1994 г.

Впервые получен переход в режим улучшенного удержания в экспериментах по нижнегибридному нагреву, когда при достаточно больших плотностях наблюдался значительный нагрев ионов и электронов. Улучшенное удержание наступало после отключения импульса ВЧ нагрева. Существенную роль при этом играло снижение рециклинга водорода на периферии разряда и уширение профиля плотности тока.

В последнее время при исследовании физических процессов в плазме токамаков значительное внимание уделяется спонтанным или инициированным переходам к улучшенному удержанию энергии и частиц в разряде. Такие ситуации возникают как при диверторной конфигурации, так и в обычных, "лимитерных" разрядах, как при дополнительном нагреве, так и в плазме омического разряда [1, 2]. Наличие общих признаков, таких, как рост плотности, резкое снижение излучения в линии водорода (дейтерия), снижение МГД активности и так далее, указывает на то, что при разнообразии способов получения режима улучшенного удержания существует, возможно, общий механизм такого перехода. Для понимания этих физических процессов могут представлять интерес результаты, полученные на токамаке ФТ-2 при дополнительном нижнегибридном (НГ) нагреве.

Эксперименты проводились при достаточно больших плотностях в режиме нагрева электронов и ионов, когда токи увлечения уже отсутствуют. Характерной особенностью этих экспериментов было появление улучшенного удержания после выключения ВЧ импульса. Детальное исследование этого режима было проведено на токамаке ФТ-2 ($R = 55$ см, $a = 8$ см, $B = 22$ кГс, $I_p = 22$ кА, $t_{pl} = 40$ мс, $\bar{n}_e = (1,8 \div 2,8) \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$), ВЧ мощность до 120 кВт на частоте 920 МГц и длительностью импульса 3 мс вводилась в плазму с помощью двухвольноводного грилла с внешней стороны тора ($N_{||} = 2 \div 4$) [3]. В экспериментах в течение ВЧ импульса наблюдался рост плотности (на 20–30%), генерация высокоэнергетичных ионных "хвостов" и нагрев основной массы электронов и ионов. В этих экспериментах в омическом режиме нагрева (ОН) центральная электронная и ионная температуры составляли $T_e \simeq 600$ эВ и $T_i \simeq 100$ эВ. Прирост ионной температуры ΔT_i , определявшийся по перезарядке нейтрального водорода, составлял ~ 100 эВ при 30 кВт вводимой мощности и линейно возрастал до $\simeq 400$ эВ при 120 кВт (при плотности $\bar{n} = 2,4 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$). Увеличение электронной температуры ΔT_e , измерявшийся по мягкому рентгеновскому излучению, составляло $\simeq 200 \div 300$ эВ и слабо зависело от мощности [4]. На рис.1 в качестве примера приведены основные осциллограммы разряда для $P_{VCh} = 80$ кВт, а на рис.2 – изменения интегрального диамагнитного сигнала при различных ВЧ мощностях. Как видно, после выключения ВЧ импульса происходит спад излучения линии H_β при росте средней плотности, а

также резкое снижение МГД активности и небольшое падение напряжения U_p . Уровень возросшего во время ВЧ импульса диамагнитного сигнала сохраняется или даже подрастает в течение нескольких мс после отключения ВЧ нагрева. Эти данные об изменении внутреннего энергосодержания подтверждаются измерениями электронной и ионной температуры (рис.3) и концентрации (измеряемой 7-канальным 2-миллиметровым интерферометром).

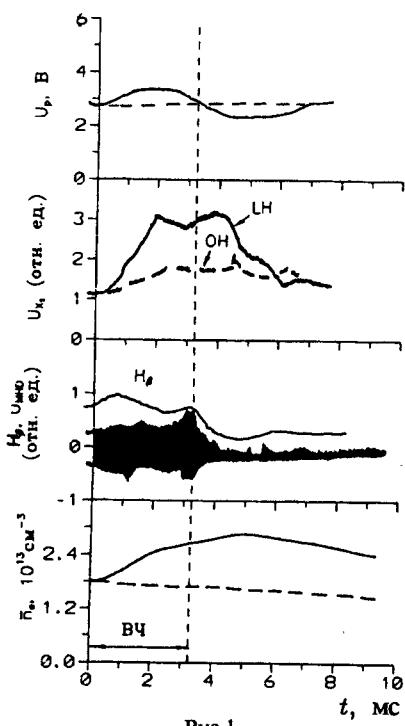


Рис.1

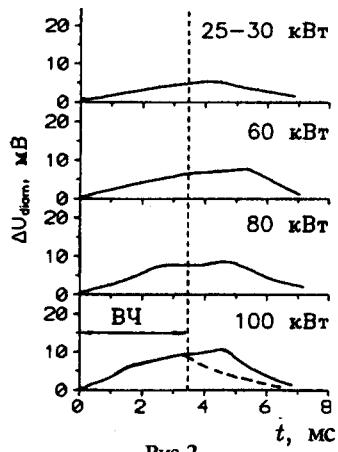


Рис.2

Рис.1. Осциллограммы разряда: $P_{\text{ВЧ}} = 80 \text{ кВт}$, U_p – напряжение на обходе плазменного шнура, U_{x_2} – сигнал мягкого рентгеновского излучения по центральной хорде, H_β – излучение линии H_β по хорде 4,5 см, U_{MHD} – сигнал с магнитных зондов, \bar{n} – средняя плотность

Рис.2. Изменение интегрального диамагнитного сигнала при различных уровнях мощности. Пунктирная линия соответствует случаю, когда улучшенное удержание не возникало

Энергетическое время жизни, равное в омическом режиме $\tau_E^{\text{OH}} = 0,8 \text{ мс}$, при ВЧ нагреве уменьшается с ростом мощности и при $P_{\text{ВЧ}} = 100 \text{ кВт}$ составляет $\tau_E^{\text{LH}} = 0,5 \text{ мс}$. В постнагревной стадии (PLH) оно резко увеличивается до $\tau_E^{\text{PLH}} = 2 \text{ мс}$, что наблюдается в широком интервале используемых мощностей генератора ($40 \div 140 \text{ кВт}$). Это значение совпадает с рассчитанным по скейлингам Мережкина – Муховатова, неоалкаторному и Кея – Голдстоуна. Следует отметить, что в постнагревной стадии возросшее время жизни почти не зависело от \bar{n} , так же как и в скейлингах Кея – Голдстоуна и DIII-D – JET. Зависимость от плотности появлялась, когда учитывались радиационные потери, измеряемые болометром. В этом случае время жизни возрастало с ростом плотности и при $\bar{n} = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ достигало 3 мс.

Малые размеры токамака и отсутствие обратных связей по равновесию плазменного шнура затрудняли получение устойчивого состояния в постнагревной стадии длительностью более 5 мс. Но в тех случаях, когда предва-

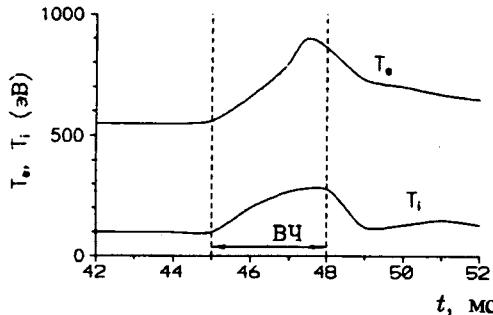


Рис.3

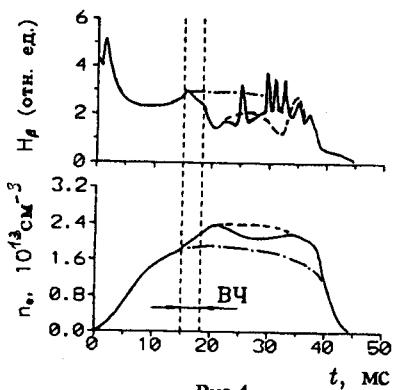


Рис.4

Рис.3. Временные изменения центральной электронной и ионной температур

Рис.4. Корреляция спада плотности и всплесков на линии H_β (ELM'ы): штриховая линия – случай без ELM'ов, штрих-пунктир – омический разряд

рительным подбором управляющих полей и напуска H_2 это удавалось сделать, продолжительность устойчивого постнагревного состояния увеличивалась до 15–20 мс. В этом случае на спектральной линии H_β иногда отмечались всплески, похожие на ELM (ELM – Edge Localised Relaxation Modes – периферийная локально запертая мода, возникающая зачастую в так называемом H -режиме – состоянии плазмы при улучшенном удержании частиц и энергий [1]). Появление таких ELM'ов приводило к некоторому снижению плотности в разряде (рис.4).

Переход к обсуждению наблюдаемых явлений, следует напомнить, что существует ряд экспериментальных и теоретических работ, указывающих на то, что удержание частиц и энергии в плазме токамака существенным образом зависит от профиля плотности тока (см., например, [5–7]). У нас имеются свидетельства (например, индуктивные изменения на напряжении обхода), что в ходе НГ эксперимента происходит модификация канала тока. Некоторый рост U_p во время ВЧ импульса можно объяснить сужением канала тока вследствие охлаждения периферии, связанного с резким увеличением потока водорода со стенки камеры и диафрагмы из-за бомбардировки быстрыми ионами. Выключение ВЧ нагрева создает условия более низкого рециклинга на периферии, что и проявляется в уменьшении излучения линии H_β . В центральной части разряда также происходят существенные изменения. По данным спектрометрических и рентгеновских измерений из-за роста электронной температуры в течение ВЧ импульса происходит дополнительная ионизация примесей ($0^{+6} \rightarrow 0^{+7+8}$) и пикирование профиля Z_{eff} . Как показывают оценки, при $P_{ВЧ} = 100 \div 120$ кВт Z_{eff} в центре достигает 5,5 хотя среднее значение, определенное по проводимости, изменяется с $Z_{eff}^{OH} = 2,5$ до $Z_{eff}^{LH} = 4$. После выключения НГ нагрева происходит охлаждение центрального канала, что при сохранении высокого значения $Z_{eff}(0) \sim 5,5$ должно приводить к снижению проводимости в центральной части плазменного шнура и "выталкиванию" части тока на периферию. Эти качественные рассуждения были подтверждены расчетами с помощью кода "Astra", ранее использовавшегося для анализа эксперимента на токамаке "Туман-3" [2]. Результаты такого моделирования представлены на рис.5. За счет роста j и $grad j$ в районе резонансных по-

верхностей $q = 2; 3$ можно объяснить подавление крупномасштабных колебаний с $t \sim 1$. Это, наряду с прекращением бомбардировки стенки быстрыми ионами, должно способствовать снижению рециклинга на периферии и улучшению термоизоляции. Кроме того, уширение профиля тока и приближение его к профилю, более устойчивому по отношению к раскачке мелкомасштабных колебаний с $t \gg 1$, должно приводить к подавлению этих мод и соответственно к уменьшению внутреннего переноса тепла и частиц [5, 7]. Улучшением термоизоляции в постнагревной стадии и объясняется повторный рост на рис.3 центральной ионной температуры со 100 до 150 эВ, что близко к значению $T_i^A = 160$ эВ, полученному по формуле Арцимовича. Исходное же значение $T_i \leq 100$ эВ в омическом режиме свидетельствует о том, что в малых токамаках изначально из-за большого влияния стенки (охлаждение) устанавливается узкий профиль $T_e(r)$. Это приводит к "недогреву" ионов. Снижение рециклинга, вызванного отключением НГ нагрева, так же как и уширение профиля тока, позволяет получить в малом токамаке режим, характерный для больших установок.

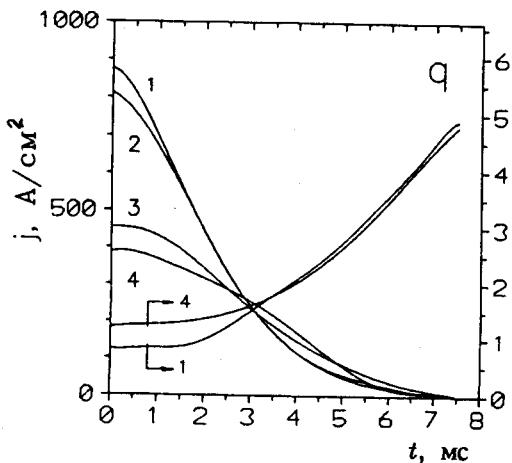


Рис.5. Распределение запаса устойчивости q и плотности тока j , полученное по транспортному коду: 1 – перед ВЧ нагревом, 2 – в конце ВЧ импульса, 3 и 4 – через 1 мс и 3 мс, соответственно, после выключения ВЧ нагрева

Таким образом, в эксперименте, в котором был осуществлен эффективный нагрев электронов и ионов с помощью НГ волн, после выключения импульса нагрева наблюдалось существенное увеличение времени удержания энергии и частиц. Улучшение термоизоляции мы связываем с уширением профиля плотности тока и снижением рециклинга водорода на периферии разряда.

1. ASDEX Team, Nucl. Fusion **29** (11), 1959 (1989).
2. V.E.Golant and S.V.Lebedev, Tuman-3 team, Collection of Papers at TCM-RuST, Wurzburg, Germany (1992), p.27.
3. V.N.Budnikov, Nucl. Fusion **31** (4), 611 (1991).
4. V.O.Alexandrov et al., Proc. 20th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. Lisboa 4, 1505 (1993).
5. J.A.Wessen, Nucl. Fusion, **18** (1), 87 (1978).
6. K.Toi et al., Nucl. Fusion **19** (12), 1643 (1979).
7. Н.В.Иванов, Физика плазмы **9** (4), 703 (1983).