

РЕЖИМ ОМИЧЕСКОГО НАГРЕВА С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ НА ТОКАМАКЕ "ТУМАН-3"

Л.Г.Аскинази, Т.Ю.Акатова, В.Е.Голант, М.П.Грязневич,
В.К.Гусев, Е.Р.Итс, С.В.Крикунов, Б.М.Липин,
С.В.Лебедев, К.А.Подушникова, Г.Т.Раздобарин, В.В.Рождественский,
Н.В.Сахаров, А.С.Тукачинский, А.А.Федров, Ф.В.Чернышев,
К.Г.Шаховец, С.П.Ярошевнич

При исследовании возможности подъема плотности плазмы в опытах с магнитным сжатием и вторым наращиванием тока обнаружен режим с необычно высокой плотностью. В статье приведены параметры плазмы в этом режиме и проведено сопоставление с обычным омическим нагревом.

На токамаке "ТУМАН-3"¹ проведена серия экспериментов по получению и исследованию режимов с высокой плотностью. Интерес к таким режимам обусловлен актуальностью проблемы предельной плотности^{2,3} и возможностью увеличения времени удержания энергии в случае справедливости "алкатороподобных" скейлингов. В^{4,5} имеются ясные указания на значительную роль периферийной плазмы в физических явлениях, ограничивающих плотность в токамаке. Существенное влияние на периферию может быть оказано с помощью магнитного сжатия⁶ или быстрого наращивания тока после достижения им квазистационарного значения⁷.

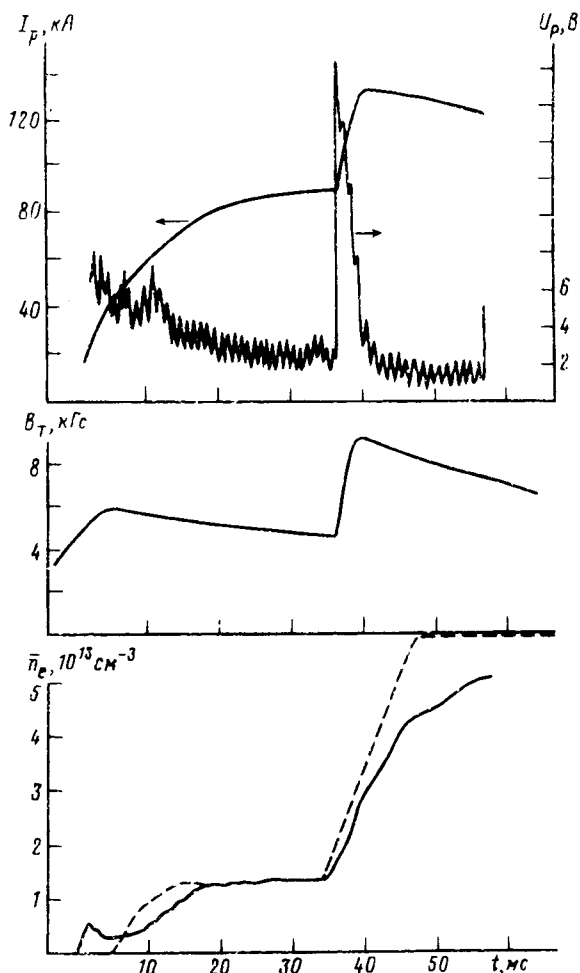


Рис. 1. Ток плазмы, напряжение на обходе, продольное поле, плотность и модельная программа для системы управления плотностью (----) в разряде с наращиванием \tilde{n}_e в процессе магнитного сжатия и второго подъема тока (HDM)

В описываемой серии опытов одновременно с магнитным сжатием по малому радиусу и подъемом тока осуществлялся дополнительный напуск газа. На рис. 1 приведены типичные осциллограммы эволюции параметров плазмы в таком эксперименте. Как видно продольное поле увеличивалось вдвое за время 3,5 см, ток плазмы примерно на 40% за 4 мс. В нижней части рисунка приведены модельная программа, использовавшаяся в системе управления плотностью, и поведение плотности в эксперименте. Максимальный рост плотности, зарегистрированный в этой серии опытов, происходил втрое: от $1,4 \cdot 10^{13}$ до $5,2 \cdot 10^{13}$ см^{-3} за время 15 мс. Параметры режима с высокой плотностью, называемого в дальнейшем *HDM* (*High Density Mode*), и исходного омического нагрева приведены в таблице. Отметим, что достигнутая средняя плотность вдвое превысила ранее существовавший на установке предел и составила 0,85 от эмпирического предела Гринвальда², что является рекордным для режимов без применения дополнительного нагрева и пеллет-инжекции.

Не имея возможности в краткой заметке детально описать физические процессы, сопровождающие переход в режим *HDM*, ограничимся перечислением и иллюстрацией основных свойств плазмы в новом состоянии. Во-первых следует отметить, что достигнутая плотность по-видимому не была предельной, поскольку срыв в разряде не происходил, а рост плотности был ограничен производительностью системы напуска газа, использованной в данных опытах. Не свидетельствует о приближении к пределу и величина радиационных потерь. Как видно на рис. 2, *a* эти потери возрастают при увеличении плотности, однако даже при $\bar{n}_e = 5,2 \cdot 10^{13}$ см^{-3} радиационные потери составляют половину вложенной омической мощности. Не происходит и катастрофического роста эффективного заряда, рис. 2, *б*. Во-вторых, как было обнаружено *HDM* характеризуется интенсивными пилообразными колебаниями температуры, причем их амплитуда и период в разрядах с более высокой концентрацией больше, чем в разрядах с меньшей \bar{n}_e . Типичное поведение интенсивности мягкого рентгена, рассчитанной по

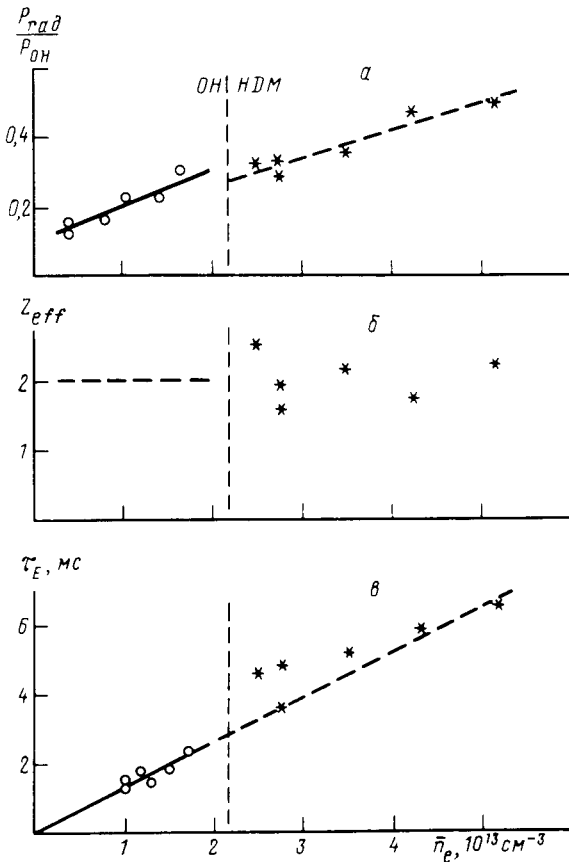


Рис. 2. Зависимость доли радиационных потерь (*a*), эффективного заряда (*б*) и времени удержания энергии (*в*) от плотности в *OH* и *HDM*

этим данным температуры электронов и усредненной плотности, представлены на рис. 3. Временное поведение J_{sxr} характеризовалось спонтанным возрастанием амплитуды колебаний и одновременным уменьшением интенсивности через 8–10 мс после начала роста плотности. По-видимому, такая эволюция J_{sxr} обусловлена завершением перераспределения профиля плотности тока и соответствующим расширением области $q(a) < 1$ (подобный эффект был обнаружен нами ранее⁵, однако для подтверждения этой гипотезы необходимо провести расчеты диффузии тока. Отметим также, что одновременно с возрастанием амплитуды "пики" практически прекращается рост плотности.

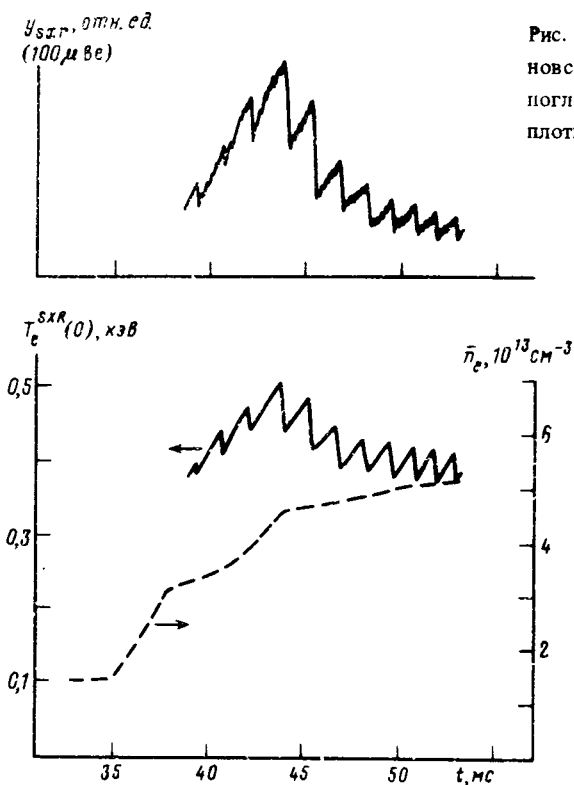


Рис. 3. Эволюция интенсивности мягкого рентгеновского излучения плазмы, рассчитанной методом поглотителей температуры в центре и средней плотности в разряде с HDM

Особый интерес представляют измерения времени удержания энергии в HDM, поскольку в ряде экспериментов^{7,8} было наблюдеено насыщение линейной зависимости $\tau_E(\bar{n}_e)$ при приближении к предельным плотностям. На рис. 2, в показаны результаты измерения τ_E на "ТУМАН'e-3" в режиме обычного омического нагрева и в HDM при близких величинах коэффициента запаса устойчивости $q(a)$ (здесь не учитывалась dW/dt , что несколько занижает τ_E^{HDM} при $t < 45$ мс, пока температура и плотность нарастают, см. рис. 3). Таким образом $\tau_E^{HDM}(\bar{n}_e)$ не испытывает насыщения при больших концентрациях и возможно несколько превышает экстраполяцию линейной зависимости, типичной для режимов омического нагрева с низкой плотностью в "ТУМАН'e-3". Оценки времени удержания частиц, полученные при анализе уравнения баланса с источником, определенным по свечению D_α , показывают, что τ_p в HDM возрастает в 5–6 раз по сравнению с OH и составляет ≈ 15 мс.

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод о существенном влиянии способа формирования плазменного шнура на предельно достижимую в нем плотность. Линейная зависимость $\tau_E(n_e)$ в HDM вплоть до максимальной плотности свидетельствует о переходе в режим с улучшенным удержанием, подобный наблюдавшимся на ASDEX'e⁸ и на DIII-D¹⁰. HDM характеризуется увеличением времени удержания частиц в 1,5 раза по отношению к экстраполяции зависимости $\tau_p \sim \bar{n}_e$.

Параметры плазмы в *HDM* и в *OH*

	I_p кА	B_T кГс	q^{cyl}	\bar{n}_e 10^{13} см^{-3}	T_{e0} кэВ	T_{i0} кэВ	τ_E мс	τ_p мс	Z_{eff}	β_T^{max} %	$\bar{\beta}_T$ %	β_p
<i>OH</i>	94	4,5	2,7	1,4	0,4	0,11	1,5	2,5	2,0	1,9	0,4	0,15
<i>HDM</i>	120	6,7	3,2	5,2	0,5	0,17	6,5	15	2,2	3,5	0,9	0,44

Литература

1. Воробьев Г.М. и др. Физика плазмы, 1983, 9, 105.
2. Greenwald M. et al. Nucl. Fus., 1988, 28, 2199.
3. Toi K. et al. Nucl. Fus., 1979, 19, 1643.
4. Stäbler A. et al. Proc. 16 Eur. Conf. on Contr. Fus. and Plas. Phys., Venice, 1989, 13B-1, 23.
5. Wesson J.A. et al. Nucl. Fus, 1989, 29, 641.
6. Bender S.E. et al. Proc. 11 Eur. Conf. on Contr. Fus. and Plas. Phys., Aachen, 1983, 7D-I, 111.
7. Аскинази Л.Г. и др. Впор. Ат. Науки и Техн., Терм. Синт., 1988, 3, 53.
8. Söldner F.X. et al. Phys. Rev. Lett., 1988, 61, 1105.
9. Efthimion P.C. et al. Proc. 14 Eur. Conf. on Contr. Fus. and Plas. Phys., Madrid, 1987, 11D-I, 136.
10. Schissel D.P. et al. Proc. 16 Eur. Conf. on Contr. Fus. and Plas. Phys., Venice, 1989, 13B-I, 115.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию