

# ОСОБЕННОСТИ УДЕРЖАНИЯ ЭНЕРГИИ, ОБНАРУЖЕННЫЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ОМИЧЕСКОЙ $H$ -МОДОЙ НА ТОКАМАКЕ ТУМАН-3

*М.В.Андрейко, Л.Г.Аскинази, В.Е.Голант, В.А.Корнеев, С.В.Лебедев,  
Л.С.Левин, Г.Т.Раздобарин, В.В.Рождественский, А.С.Тукачинский,  
С.П.Ярошевич*

*Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН  
194021 Санкт-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 8 декабря 1993 г.

Наблюдаются новые закономерности удержания энергии в режиме с пониженным переносом плазмы при омическом нагреве – омическая  $H$ -мода. В частности, обнаружены сильные зависимости времени удержания энергии ( $\tau_E$ ) от плазменного тока и вложенной мощности и слабая зависимость от плотности. Как параметрические зависимости, так и абсолютные значения времени удержания энергии находятся в хорошем соответствии с эмпирическим законом (скейлингом), описывающим  $H$ -режим в установках с мощным дополнительным нагревом. Полученные результаты свидетельствуют о единой природе физики удержания в  $H$ -моде в установках с различной геометрией и методами нагрева. Неожиданно большое время удержания энергии – 30 мс – зафиксировано в небольшой установке ТУМАН-3. Фактор превышения над предсказанием скейлингов для омически нагреваемой плазмы составил 15.

Различные режимы удержания энергии в токамаках условно классифицируются следующим образом: омический,  $L$ - и  $H$ -режимы. В соответствии с таким разделением существуют три вида скейлингов, описывающих закономерности переноса, см. таблицу. В частности, для описания удержания энергии в режиме омического нагрева используются скейлинги, предполагающие линейную зависимость от средней плотности и коэффициента запаса устойчивости. Зависимость от размеров установки – кубическая. Типичные примеры такого типа скейлингов: "Нео-Алкаторный" [1] и "Мережкина–Муховатова" [2]. Удержание энергии в режимах с дополнительным нагревом характеризуется существенно отличающимися параметрическими зависимостями. Большинство выражений для  $L$ -режимов не предсказывают заметной зависимости от плотности и запаса устойчивости. Вместо этого скейлинги предсказывают линейную зависимость от тока и обратно пропорциональную от корня квадратного из мощности нагрева. Зависимость от размера оказывается более слабой (степень 1-2). Наиболее часто цитируемые скейлинги: "Голдстона" [3] и "ITER89-P" [4]. Параметрические зависимости  $\tau_E$  в режимах с улучшенным удержанием при дополнительном нагреве ( $H$ -режимы) незначительно отличаются от упомянутых выше выражений для  $L$ -режимов. Основное отличие состоит в абсолютной величине  $\tau_E$ . В  $H$ -моде эта величина оказывается, как правило, вдвое выше. В качестве примера можно привести скейлинг, предложенный для описания  $H$ -моды без "ELM" (Edge Localized Modes) на установках DIII-D и JET [5]. Различие параметрических зависимостей приводит к значительному различию оценок времени удержания энергии для режима омического нагрева, если в последних трех выражениях использовать в качестве мощности нагрева омическую мощность. В таблице приведены оценки  $\tau_E$  для режима омического

нагрева с током 155 кА в токамаке ТУМАН-3, выполненные с использованием различных скейлингов.

**Примеры скейлингов, описывающих время удержания в режимах омического нагрева, L- и H-модах при дополнительном нагреве**

Скейлинг	$\tau_B$ , мс
формула $(1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}, \text{ м, МА, МВт, Тл, кэВ})$	
Нео-Алкаторный $7naR^2 q_{cyl}$	1,9
Мережкина - Муховатова $1,1na^{0,25} R^{2,75} qk^{0,125} A_i^{0,5} / < T_e >^{0,5}$	2,3
Голдстона ( <i>L</i> -мода) $37I_p P^{-0,5} R^{1,75} a^{-0,37} k^{0,5} (A_i / 1,5)^{0,5}$	10,7
ITER89-P ( <i>L</i> -мода) $48I_p^{0,85} R^{1,3} a^{0,3} k^{0,5} n^{0,1} B_T^{0,2} A_i^{0,5} P^{-0,5} F[f_s^{\alpha-s} f_q^{\alpha-s}]$	9,9
DIII-D/JET ( <i>H</i> -мода) $106P^{-0,46} I_p^{1,03} R^{1,48}$	15,6

*H*-мода в режиме омического нагрева (омическая *H*-мода) впервые была обнаружена на токамаке DIII-D [6]. В этих экспериментах время удержания энергии превысило Нео-Алкаторный скейлинг в 1,2 раза. В экспериментах с омической *H*-модой на ТУМАН-3 зафиксировано превышение  $\tau_E^{NA}$  в 2–4 раза [7, 8]. Таким образом, можно предположить, что закономерности переноса в омической *H*-моде отличаются от наблюдаемых в омическом режиме. Настоящая серия экспериментов была предпринята для установления зависимости  $\tau_B$  от различных параметров плазмы в омической *H*-моде. Опыты были проведены после боронизации стенок разрядной камеры, что позволило значительно расширить диапазон доступных плотностей и токов [9]. Сопоставление данных, полученных до и после боронизации, предоставило уникальную возможность оценить влияние вложенной мощности на удержание в режиме без дополнительного нагрева при неизменных  $I_p$ ,  $B_T$ ,  $\bar{n}$ ,  $R$ ,  $a$ .

Эксперименты были проведены в боронизированной камере при следующих параметрах разряда:  $R_0 = 0,53$  м,  $a_l = 0,22$  м,  $B_T \leq 0,7$  Тл,  $I_p \leq 160$  кА,  $\bar{n}_e \leq 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $T_{e0} \leq 0,7$  кэВ,  $T_{i0} \leq 0,2$  кэВ. Боронизация сопровождалась следующими типичными для данной процедуры, улучшениями характеристик плазмы: снижение концентрации примесей в 2–8 раз и эффективного заряда плазмы в 1,5–2,0 раза, значительное уменьшение интенсивности мягкого рентгеновского излучения (в 10 раз) и 50%-ное увеличение предельной плотности. Кроме того, были наблюдены некоторые новые явления. Обнаружено, что в омической *H*-моде около 20% полного тока имеет неиндуктивную природу ("бутстреп"-ток). Несмотря на снижение вкладываемой мощности в результате боронизации, температура электронов изменилась незначительно, что свидетельствует об улучшении удержания энергии в плазме [9].

В боронизированной камере удалось увеличить ток по плазме до 160 кА. Омическая *H*-мода в этих условиях инициировалась импульсным увеличением скорости напуска рабочего газа – подобно тому, как это происходило в предыдущих экспериментах [7]. Измерения времени удержания энергии в омической *H*-моде с током по плазме 63, 112 и 155 кА показали сильную зависимость  $\tau_B$  от  $I_p$ , см. рис.1 (в этой серии концентрация менялась от 1,7 до  $3,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , коэффициент запаса устойчивости – от 2,4 до 3,1). Такая зависимость находится в противоречии с Нео-Алкаторным скейлингом и сходна с предсказаниями скейлингов для плазмы с дополнительным нагревом. При

максимальном токе экспериментальное время удержания энергии составило 30 мс, что в 15 раз превысило  $\tau_E^{NA}$ .

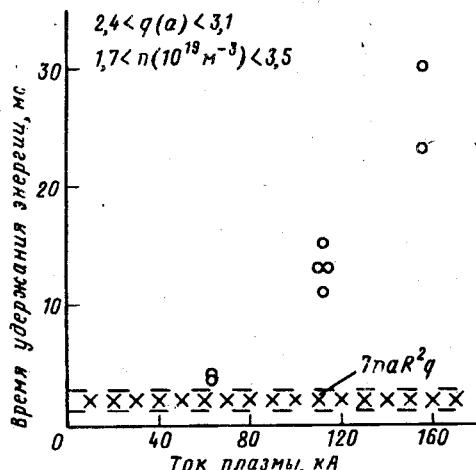


Рис.1

Рис.1. Зависимость времени удержания энергии от тока. Закрашенная область соответствует предсказаниям Нео-Алкаторного скейлинга при  $\bar{n} = (1,7 - 3,5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и  $q = 2,4 - 3,1$

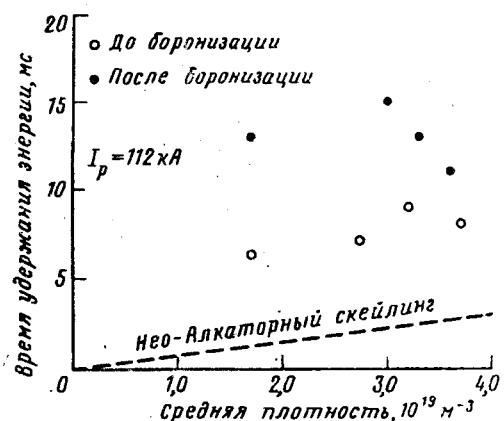


Рис.2

Рис.2. Зависимость времени удержания энергии от плотности в режиме с током 112 кА до (o) и после (•) боронизации

Зависимости времени удержания энергии от вложенной мощности и плотности исследовались в режиме с током 112 кА. Значительное снижение напряжения на обходе в результате боронизации позволило получить разряды с одинаковыми основными параметрами плазмы ( $I_p$ ,  $B_T$ ,  $\bar{n}$ ,  $R$ ,  $a$ ) и различной вложенной мощностью. Напряжение на обходе плазмы и соответственно вложенная мощность в упомянутом режиме после боронизации [9] снизились в 2 раза. Несмотря на снижение мощности, температура плазмы в омической  $H$ -моде при той же плотности практически не изменилась, что свидетельствует о значительном росте времени удержания энергии.  $\tau_E$  как функция плотности представлено на рис.2. Здесь видно, что точки, соответствующие режиму после боронизации, лежат значительно выше полученных в неборонизированной камере. Как свидетельствует этот же рисунок, зависимость  $\tau_E$  от плотности весьма слабая. Там же для сравнения приведена зависимость, предсываемая Нео-Алкаторным скейлингом. Полученные данные недостаточны для точного определения зависимости времени удержания энергии от мощности и плотности, однако они определенно указывают на отличие закономерностей  $\tau_E$  в омической  $H$ -моде от скейлингов OH и их сходство со скейлингами для плазмы с дополнительным нагревом.

Неожиданно хорошее согласие было обнаружено при сопоставлении наблюденных экспериментально закономерностей с предсказанием скейлинга для  $H$ -режима без ELM'ов. Сопоставление было проведено с "DIII-D/JET" скейлингом [5]. Отметим, что этот скейлинг был предложен для плазмы в больших установках (DIII-D, JET, ASDEX) с мощным дополнительным нагревом. На рис.3 видно, что точки для ТУМАН'a-3 лежат вблизи аппроксимации для трех токамаков. Эти данные свидетельствуют о сходстве физики удержания в  $H$ -

режиме независимо от метода нагрева и размеров установки. Следует также отметить простоту геометрии токамака ТУМАН-3, в которой были получены описываемые результаты. ТУМАН-3 не имеет дивертора, а сечение плазмы в нем ограничено круговой диафрагмой.

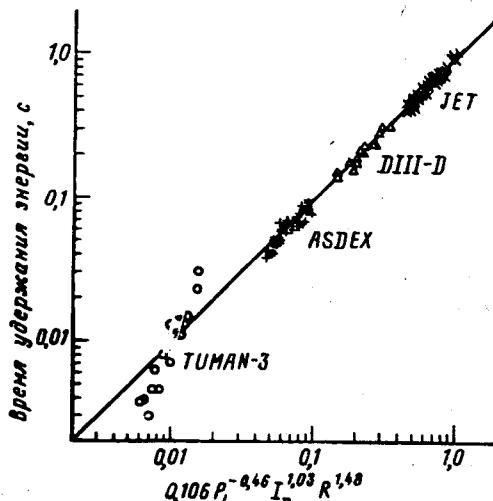


Рис.3. Время удержания энергии как функция предсказаний скейлинга DIII-D/JET, предложенного для  $H$ -моды без "ELM'ов"

Обнаруженные параметрические зависимости  $\tau_E$  в омической  $H$ -моде позволяют надеяться на дальнейшее улучшение удержания после модернизации токамака ТУМАН-3, в результате которой  $I_p$  можно будет увеличить до 200 кА. Можно также прогнозировать значительный рост  $\tau_E$  при работе токамаков DIII-D, JET, ASDEX в омической  $H$ -моде, поскольку в этом случае вводимая мощность в несколько раз меньше, чем при использовании дополнительного нагрева.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-02-3342).

1. B.Blackwell, C.L.Fiore, R.Gandy et al., Proc. IX IAEA Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res., (Baltimore, 1982), 1983, Vienna, II, p.27.
2. В.Г.Мережков, В.С.Муховатов, Письма в ЖЭТФ 33, 463 (1981).
3. R.J.Goldston, Plasma Phys. and Contr. Fus. 26, 87 (1984).
4. P.N.Yushmanov, Nucl. Fus. 30, 1999 (1990).
5. D.P.Schissel, J.C.DeBoo, K.H.Burrell et al., Nucl. Fus. 31, 73 (1991); T.C.Simonen et al., Preprint GA-A28711, 1991.
6. D.P.Schissel, N.Brooks, K.H.Burrell et al., Proc. 16th Eur. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys., Venice, 13B-I, 115 (1989).
7. L.G.Askinazi, T.Yu.Akatova, V.E.Golant et al., Proc. 17th Eur. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys., Amsterdam, 14B-I, 411 (1990).
8. M.V.Andrejko, L.G.Askinazi, V.E.Golant et al., Proc. XIV IAEA Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res., (Wurzburg, 1992), 1993, Vienna, I, p.485.
9. L.G.Askinazi, V.E.Golant, A.I.Kanaev et al., Proc. 20th Eur. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys., Lisboa 17C-IV, 1509 (1993).