

ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМА ОМИЧЕСКОГО НАГРЕВА В ТОКАМАКЕ "ТУМАН-3" В НИЗКОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В.Е.Голант, А.В. Григорьев, М.П.Грязневич,
С.В.Лебедев, Б.М.Липин, В.В.Рождественский,
Н.В.Сахаров, К.Г.Шаховец

Проделаны оценки времени удержания энергии в режиме омического нагрева в широком диапазоне токов по плазме при наличии сильных пилообразных колебаний плотности и других параметров. Отмечены особенности нагрева ионов и влияние дрейфа запертых частиц на профили концентрации.

Малое аспектное отношение токамака "Туман-3" ($a = 24$ см, $R = 55$ см) приводит к появлению ряда особенностей режима омического нагрева^{1, 2, 4}. Большая крутизна позволяет получать сильноточные омические разряды с низким запасом устойчивости $q < 3$ в низких для токамаков магнитных полях. В этих условиях высоких значений может достигать величина $\bar{\beta}_T$. Кроме того, при относительно низких величинах ионной температуры достигается малая величина параметра столкновительности ионов ν_i^* ¹. В режимах с низкими q наблюдались сильные пилообразные колебания плотности плазмы и ряда других параметров³. В этой статье приводятся результаты исследований режима омического нагрева в токамаке "Туман-3" в широком диапазоне токов по плазме $30 \leq I_p \leq 170$ кА и магнитных полей $1,5 \leq B_T \leq 7$ кГс при $q \sim 2,2 \div 2,9$ ($q = 5a^2 B_T / RI_p$).

Для подготовки камеры к эксперименту использовалась чистка низкотемпературным индукционным разрядом в кислороде. Кислородный разряд оказался эффективным способом удаления из камеры углеродных соединений. Эффект чистки в кислороде в течение $3 \div 5$ часов значительно превосходит эффект многосуточной тренировки в водороде и чистки тлеющим разрядом в инертных газах. Для последующего удаления кислорода использовался индукционный разряд в водороде. Применение кислородной очистки привело к заметному улучшению МГД устойчивости омического режима и некоторому снижению напряжения на обходе шнура.

На рис. 1 представлена зависимость средней по сечению шнура величины $\bar{\beta}_p$, полученной из диамагнитных измерений, от средней по диаметру плотности для различных значений плазменного тока ($30 \leq I_p \leq 150$ кА) и тороидального поля. С ростом I_p от 50 до 150 кА измеренная с помощью томсоновского рассеяния температура электронов на оси шнура возрастает от 150 до 500 эВ. Напряжение на обходе U_p составляет $1,8 \div 2,5$ В, соответствующее значение $Z_{eff} < 1,5$. Несмотря на ряд упомянутых выше существенных особенностей режима омического нагрева, имеет место обычная для токамаков линейная зависимость $\bar{\beta}_p$ от концентрации. Для режимов с $I_p \approx 30$ кА и $I_p \approx 60$ кА величина $\bar{\beta}_p$ определена вплоть до предельных значений плотности $\bar{n}_e \sim 8 \cdot 10^{12}$ см⁻³ и $\bar{n}_e \sim 2 \cdot 10^{13}$ см⁻³. В режиме $I_p \approx 60$ кА и $B_T \approx 2,8$ кГс достигнутому значению $\bar{\beta}_p \approx 0,4$ соответствует высокая для режима омического нагрева величина $\bar{\beta}_T \approx 1,3\%$. Определенное по данным рис. 1 среднее время удержания энергии не имеет заметной зависимости от тока по плазме. При плотности $\bar{n}_e \approx 8 \cdot 10^{12}$ см⁻³ величина $\tau_E \sim 1,2 \div 1,6$ мс для разных режимов. Значения τ_E примерно соответствуют алкаторному скейлингу $n_e \chi_e = \frac{n_e a^2}{6\tau_E} \sim 5 \cdot 10^{17}$ см⁻¹ · с⁻¹.

Следует отметить, что описываемые в³ сильные пилообразные колебания, наблюдавшиеся и в данных опытах, отсутствуют на сигнале, снимаемом с диамагнитной петли.

Как отмечалось в работах^{1, 2}, температура ионов в установке "Туман-3" не меняется при увеличении тороидального поля и слабо падает с ростом плотности. Аналогичные результаты получались и в описываемых экспериментах с улучшенной очисткой камеры. Эти

два обстоятельства, с учетом малых значений $\nu_i^* < 1$, указывают на определенную роль запертых частиц в энергобалансе ионов. На рис. 2. показано поведение измеренной по спектру атомов перезарядки ионной температуры в центре шнура при увеличении плазменного тока для режимов с $q < 3$. Возрастание температуры отличается от зависимости $T_i = 6 \cdot 10^{-7} (I_p B_T \bar{n}_e R^2)^{1/3}$, приведенной на том же рисунке.

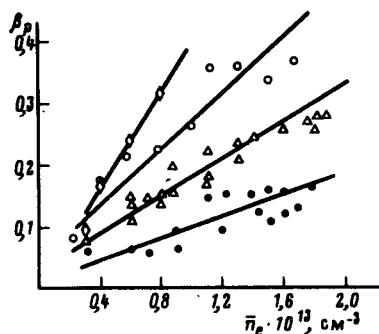


Рис. 1

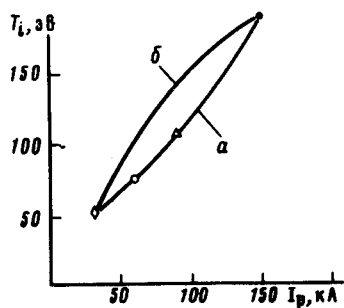


Рис. 2

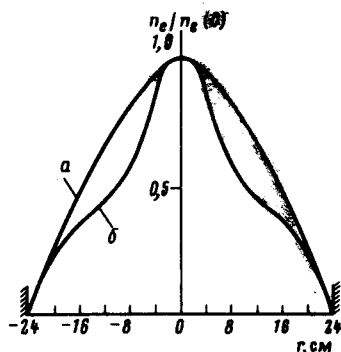


Рис. 3. Приведенные профили концентрации для режимов с низким и высоким запасом устойчивости. $I_p = 60$ кА: а - $q = 2,4$; б - $q = 4,7$; $\bar{n}_e = 1 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$

Рис. 1. Зависимость величины β_p от \bar{n}_e для различных режимов омического нагрева: $\diamond - I_p \approx 32$ кА, $B_T \approx 1,8$ кГс, $q \approx 2,9$; $\circ - I_p \approx 60$ кА, $B_T \approx 2,8$ кГс, $q \approx 2,4$; $\Delta - I_p \approx 95$ кА, $B_T \approx 4,3$ кГс, $q \approx 2,3$; $\bullet - I_p \approx 150$ кА, $B_T \approx 6,4$ кГс, $q \approx 2,2$

Рис. 2. Изменение температуры ионов при увеличении тока плазмы для режимов с $q < 3$: $\diamond - B_T \approx 1,8$ кГс, $\bar{n}_e \approx 4 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$; $\circ - B_T \approx 2,8$ кГс, $\bar{n}_e \approx 8 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$; $\Delta - B_T \approx 4,3$ кГс, $\bar{n}_e \approx 1 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$; $\bullet - B_T \approx 6,4$ кГс, $\bar{n}_e \approx 1,2 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$. а - Эксперимент, б - $T_i = 6 \cdot 10^{-7} (B_T I_p \bar{n}_e R^2)^{1/3}$

Отмеченные в работе ³ сильные пилообразные колебания плотности в центральной области разряда (до 30% $\Delta n_0 / n_0$) хорошо объясняются большой скоростью неоклассического пинча запертых частиц, которая может достигать значения $v_{нк} \sim 10^3$ см/с⁵. Увеличение запаса устойчивости путем подъема тороидального поля при фиксированном токе плазмы приводит к подавлению внутренних срывов. В таком режиме пинч запертых частиц должен приводить к сильному обострению радиального профиля плотности. Измеренные 8-канальным двухмиллиметровым интерферометром радиальные распределения приведены на рис. 3. Профиль плотности для низких $q \approx 2,4$ усреднен во времени по периоду колебаний. Видно, что при увеличении запаса устойчивости происходит значительное сужение профиля в центральной области. Распределение концентрации на периферии остается широким. Выяснение баланса частиц в режиме с высоким запасом устойчивости является задачей проводимого в настоящее время численного моделирования процессов переноса.

Таким образом, в токамаке "Туман-3" удалось получить в режиме омического нагрева с низким тороидальным полем высокие значения среднего по сечению параметра $\bar{\beta}_T$ (при $B_T \sim 3$ кГс $\bar{\beta}_T \sim 1,3\%$). Малое аспектное отношение ($R/a = 2,3$) приводит к низкому значению параметра столкновительности уже при сравнительно невысоких температурах ($\nu_i^* < 1$ в значительной части сечений плазмы). С ним связано также усиление влияния неоклассических эффектов на поведение плазмы, в частности обострение радиального профиля плотности при высоких q и большая амплитуда колебаний плотности в режиме с низким q ($\Delta n_0/n_0$ до 30%). Несмотря на эти особенности, в режимах с малым магнитным полем удержание энергии описывается скейлингом, характерным для типичных режимов омического нагрева токамаков.

Литература

1. Golant V.E., Gornostaev S.V., Grigoriev A.V. et al. Proc. of the X-th Eur. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. Moscow, 1981, 1, A-12.
2. Воробьев Г.М., Голант В.Е., Горностаев С.В. и др. "Физика плазмы" 1983, 9, 105.
3. Голант В.Е., Евтушенко Т.П., Лебедев С.В. и др. "Физика плазмы", 1982, 8, 1167.
4. Golant V.E., Goncharov S.G., Gornostaev S.V., et al. Proc of the XI-th Eur. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. Aachen, 1983, 1.
5. Днестровский Ю.Н., Неудачин С.В., Переверзев Г.В. Препринт ИАЭ-3690/6, М., 1982.

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

Поступила в редакцию
26 сентября 1983г.
После переработки
19 ноября 1983г.