

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И СКОРОСТИ ТОРОИДАЛЬНОГО И ПОЛОИДАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЙ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ.

*В.И.Бугаря, А.В.Горшков, С.А.Грашин, И.В.Иванов,
В.А.Крупин, Л.И.Крупник, И.С.Недзельский, А.В.Мельников,
К.А.Разумова, Ю.А.Соколов, В.М.Трухин*

На токамаке ТМ-4 выполнены измерения скоростей тороидального и полоидального вращений и потенциала плазмы в режиме омического нагрева. Величина потенциала в центре шнура составляет $-100 \div -700$ В. Значения скоростей в центральной части шнура совпадают с неоклассическими, а на периферии существенно меньше неоклассических.

Вращение плазмы в установках токамак в последнее время интенсивно исследуется теоретически и экспериментально¹⁻⁵. Такой интерес во многом определяется возможной связью вращения шнура с радиальным переносом частиц и тепла.

Неоклассическая теория¹⁻³ дает следующие выражения для полоидальной V_p и тороидальной V_T скоростей примесного иона с зарядом Z ³:

$$V_{PZ}^{\text{neo}} = -\frac{c T_i}{e B_T} \left[\frac{\partial}{\partial r} \ln n_i - \frac{1}{Z} \frac{\partial}{\partial r} \ln n_Z + (1-k - \frac{1}{Z}) \frac{\partial}{\partial r} \ln T_i \right] ; \quad (1)$$

$$V_{TZ}^{\text{neo}} = -\frac{c T_i}{e B_P} \left[\frac{\partial}{\partial r} \ln n_i + (1-k) \frac{\partial}{\partial r} \ln T_i + \frac{e}{T_i} E_r \right] ; \quad (2)$$

где n_Z и n_i – концентрации ионов и протонов, T_i – ионная температура, E – радиальное электрическое поле, B_T и B_P – продольное и полоидальное магнитные поля, k – численный коэффициент, зависящий от частот ион-ионных столкновений¹.

В задачу эксперимента входило сравнение экспериментальных величин V_T и V_p с неоклассическими значениями (1) и (2). Скорости вращения измерялись по доплеровскому смещению линий ионов CV (2271 Å), OV (2781 Å), CIII (2296 Å), наблюдавшихся в двух противоположных направлениях относительно вращения. Одновременно по доплеровскому уширению спектральных линий определялась величина T_i .

Измерения проводились при следующих параметрах плазмы ТМ-4: малый радиус по диафрагме $a_L = 8,5$ см, большой радиус $R = 53$ см, $B_T = 13 \div 15$ кЭ, ток разряда $I_p = 21 \div 26$ кА, эффективный заряд плазмы $Z_{eff} = 2,0 \div 2,5$, средняя концентрация $n_e = (0,6 \div 4,5) \cdot 10^{13}$ см⁻³. Радиальные распределения T_e , T_i и n_e приведены на рис.1, а. Величины T_i , а также V_p и V_T для ионов CV, OV, CIII (рис.1, б, в) измерены на хордах, соответствующих максимумам пространственных распределений свечения этих ионов.

В центральных областях шнура направление полоидальной скорости совпадает с направлением электронного диамагнитного дрейфа, а направление тороидальной скорости противоположно току плазмы. На периферии направления и тороидального и полоидального вращений меняет знак. Зеркальное изменение направления тороидальной скорости наблюдается при изменении направления тока плазмы, а полоидальной – при изменении направления тороидального магнитного поля.

Сравнение величин $V_p^{\text{эксп}}$ и V_p^{neo} (рис.1, б) показывает, что неоклассика удовлетворительно описывает эксперимент в центральных областях шнура (ион CV), но качественно расходится с ним на периферии (ион CIII).

Необходимая для определения $V_T^{\text{нео}}$ величина E_r была оценена из уравнения радиального баланса сил:

$$0 = - \frac{\partial}{\partial r} (n_Z T_i) + Z e n_Z E_r + \frac{Z e}{c} n_Z (V_{PZ}^{\text{эксп}} B_T - V_{TZ}^{\text{эксп}} B_P); \quad (3)$$

при этом значения $V_T^{\text{нео}}$, определенные из (2), составляли: $V_T^{\text{нео}}(\text{CV}) = -(6 \pm 3) \cdot 10^5 \text{ см/с}$; $V_T^{\text{нео}}(\text{OV}) = (4 \pm 3) \cdot 10^6 \text{ см/с}$; $V_T^{\text{нео}}(\text{СIII}) = (10 \pm 5) \cdot 10^6 \text{ см/с}$. Из сравнения с $V_T^{\text{эксп}}$ (рис.1,б) видно, что на периферии шнура значение $V_T^{\text{нео}}$ также более чем на порядок превышает измеренное.

В тех же экспериментах проводилось измерение профиля потенциала плазмы методом зондирования пучком быстрых ионов Cs^+ ⁶. Потенциал измерялся вдоль траектории пучка ионов. Результаты этих измерений приведены на рис.2.

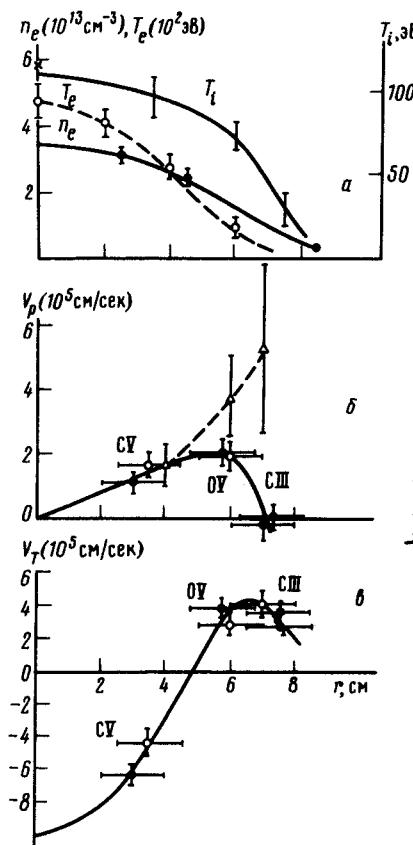


Рис.1.

Рис.1. Радиальные распределения: а – концентрации электронов n_e , электронной T_e и ионной T_i температур (x – значение T_i в центре шнура, определенное по спектру нейтралов перезарядки); б – полоидальной скорости; в – тороидальной скорости. Скорости вращения измерялись в режимах без смещения (●) и со смещением шнура (○). Δ – неоклассические значения полоидальной скорости для ионов CV, OV, СIII на 4, 6 и 7 см соответственно

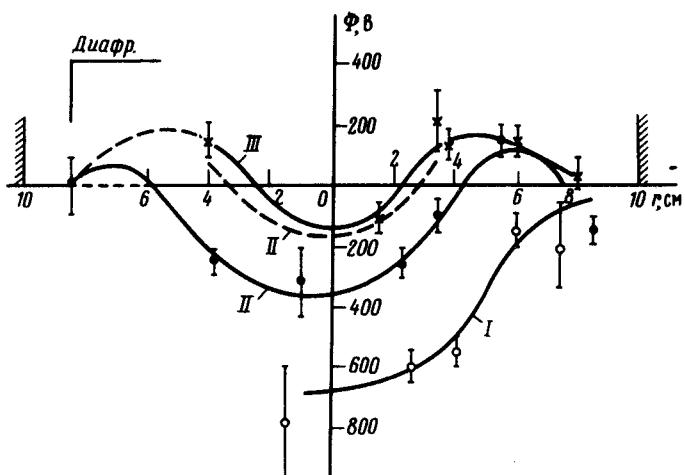


Рис.2.

Рис.2. Радиальные распределения потенциала плазмы: I – $\bar{n}_e = (4 \div 5) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; II – $\bar{n}_e = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ – без смещения, --- со смещением в сторону противоположную тороидальному дрейфу ионов; III – $\bar{n}_e = 0,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$

Большой отрицательный потенциал в центральной части шнура ($|\Phi| \gg T_i$) может определяться уходом из плазмы надтепловых локально запертых ионов с энергиями $E_i \sim |\Phi|$. Для проверки этого предположения мы провели измерения $\Phi(r)$, V_p и V_T в условиях, когда равновесное положение плазменного шнура было смещено относительно центра камеры ($\Delta r \sim 0,5$ см).

Как известно⁷, в тороидальной плазме токамака распределение уровней с одинаковой глубиной локальной магнитной ловушки — δ симметрично и имеет области, в которых ловушки отсутствуют. При смещении положения равновесия по вертикали, картина становится асимметричной: со стороны, противоположной смещению, область с $\delta = 0$ увеличивается. В условиях, когда тороидальный дрейф локально запертых ионов направлен в эту сторону, их уход на стенку затруднен.

Результаты такого эксперимента приведены на рис.2 (пунктирная кривая). Было обнаружено, что $|\Phi|$ в центральной части плазмы уменьшился, однако величина электрического поля при этом практически не изменилась. Не изменились и скорости вращения (рис.1, б, в, плавые кружки).

С ростом \bar{n}_e от $0,5 \cdot 10^{13}$ см⁻³ до $4 \cdot 10^{13}$ см⁻³ ширина периферийной зоны с положительным потенциалом уменьшается (рис.2), при этом наблюдается нарастание энергетического времени жизни от 0,4 мс до 1,5 мс. Наличие положительного потенциала свидетельствует о повышенных потерях из электронной компоненты. Из других экспериментов⁸ мы знаем, что коэффициенты диффузии и электронной теплопроводности в токамаке быстро возрастают на периферии плазмы, в зоне шнура с $q(r) > 2$. В экспериментах на ТМ-4 эта область занимает внешнюю половину радиуса плазмы. Поэтому естественно связать положительный потенциал на периферии с разрушением магнитной структуры в этой области.

Значительно более низкие величины $V_T^{\text{эксп}}$ в сравнении с $V_T^{\text{нео}}$ на периферии могут свидетельствовать о сильном торможении тороидального момента. Эта тормозящая сила должна приводить к повышенному радиальному дрейфу частиц.

Авторы выражают благодарность Ю.Н.Днестровскому и П.Н.Юшманову за плодотворные дискуссии.

Литература

1. Hazeltine R.D. Phys. Fluids, 1974, 17, 961.
2. Boozer A.N. Phys. Fluids, 1976, 19, 149.
3. Bell M.G. Nucl. Fusion, 1979, 19, 133.
4. Suckewer S., Eubank et al. Nucl. Fusion, 1981, 21, 1301.
5. Bugayev V.I., Gorshkov A.V., Grashin S.A. et al. 9-th International Conf. on Plasma Phys. and Contr., Nucl. Fusion Res., Baltimore, IAEA-CN-41/S-4.
6. Разумова К.А., Соколов Ю.А., Бондаренко И.С., Крупник Л.И., Недзельский И.С. Письма в ЖТФ, 1981, 7, 1516.
7. Грибов Ю.В., Цаун С.В., Юшманов П.Н. Препринт ИАЭ-3681/7, М.: 1982.
8. Berlislav A.B., Bobrovskii G.A., Vasin N.L. et al. 9-th Intern. Conf. on Plasma Physics and Nucl. Fus. Res., Baltimore, 1982, IAEA-CN-41/I-6.

Поступила в редакцию
1 августа 1983 г.