

НАБЛЮДЕНИЕ "БУТСТРЭП"-ТОКА В ТОРСАТРОНЕ "УРАГАН-3"

Гутарев Ю.В., Назаров Н.И., Павличенко О.С.,
Пашнев В.К., Плюснин В.В., Швец О.М.

При исследовании плазмы, создаваемой и нагреваемой при поглощении ВЧ мощности в диапазоне частот $\omega \lesssim \omega_{Hr}$ в торсатроне "Ураган-3" обнаружен однонаправленный, параллельный удерживающему магнитному полю, ток. Направление и функциональная зависимость этого тока от параметров плазмы и магнитной системы совпадает, а величина близка к "бутстрэп"-току, предсказанному неоклассической теорией для стеллараторов.

Одним из основных выводов теории переноса плазмы в тороидальных магнитных ловушках является утверждение о том, что диффузия частиц сопровождается появлением униполярного тока, так называемого "бутстрэп"-тока^{1,4}. Согласно теории, величина этого тока, с ростом параметров плазмы, должна возрастать, оказывая существенное влияние на равновесие и устойчивость плазмы. Эксперименты, направленные на обнаружение "бутстрэп"-тока, неоднократно проводились^{3,4}, однако природа наблюдаемых токов выяснена не была.

В настоящей статье мы сообщаем о наблюдении униполярного тока при ВЧ-нагреве плазмы в торсатроне "Ураган-3", поведение которого не противоречит предсказаниям неоклассической теории описания "бутстрэп"-тока в стеллараторе.

Описываемые эксперименты проводились на торсатроне "Ураган-3" в режиме ВЧ-нагрева³ при напряженностях магнитного поля $B_0 \cong 0,5$ и $4,5$ кГс, уровне ВЧ-мощности, излучаемой антенной $W = 200 \div 600$ кВт. Временная эволюция параметров плазмы при магнитном поле $B_0 \cong 4,5$ кГс представлена на рис. 1. Параметры плазмы были таковы ($n \lesssim 4 \times 10^{12}$ см⁻³, $T_e(0) < 250$ эВ, $T_i(0) \leq 900$ эВ), что в большей части сечения плазменного шнура частоты соударений электронов и ионов удовлетворяли условию $v_j < v_{Tj} \epsilon r^{3/2} / R^{5/2}$, т.е. реализовался режим бесстолкновительного переноса¹. Здесь v_{Tj} – тепловая скорость j – компоненты плазмы, r и R – малый и большой радиусы плазмы, ϵ – угол вращательного преобразования. Подробное описание условий эксперимента, методов нагрева и диагностики, поведения различных параметров плазмы приведены в работе⁶.

В экспериментах наблюдался униполярный плазменный ток, регистрируемый поясом Роговского, который достигал величины $J \leq 2$ кА при среднем энергосодержании плазмы $n(T_e + T_i) \lesssim 3 \cdot 10^{15}$ эВ · см⁻³. Было замечено, что отношение J / ψ слабо меняется при изменении параметров разряда (см. рис. 2 и 3). Здесь, ψ – поток магнитного поля дипольных токов равновесия $j_{\text{П.Ш.}}$ (токов Пфирш – Шлютера) через поверхность, охватываемую измерительной седловидной обмоткой. В работе⁵ показано, что с достаточно высокой точностью измеряемый седловидной обмоткой поток ψ совпадает с потоком магнитного поля дипольного тока равновесия

$$j_{\text{П.Ш.}} = - \frac{2c \nabla P}{B \epsilon} \cos \theta, \quad (1)$$

где P – давление плазмы и θ – полоидальный угол.

На рис. 2 и 3 приведены результаты измерения тока на стационарной стадии разряда ($t > \tau_{\text{СК}} \cong 10$ мс, $\tau_{\text{СК}}$ – скиновое время), чтобы избежать влияния токов, возникающих при быстром нагреве плазмы. Как видно из этих рисунков величина отношения J / ψ слабо меняется при широком изменении параметров плазмы и магнитной системы торсатрона "Ураган-3".

Направление плазменного тока было таково, что создаваемое им магнитное поле увеличивало угол вращательного преобразования в установке, и определялось направлением продольного магнитного поля. При изменении направления магнитного поля одновременно с изменением знака тока J меняется направление поля дипольных токов, а знак отно-

нения J/ψ оставался прежним (см. рис. 3, а). Из приведенных выше экспериментальных данных видно, что

$$J \propto \psi = C \frac{\overline{n(T_e + T_i)}}{B\tau} \quad (2)$$

Здесь C – коэффициент, зависящий от радиального распределения параметров плазмы и угла вращательного преобразования.

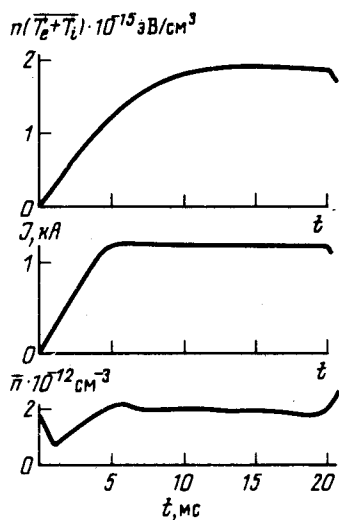


Рис. 1

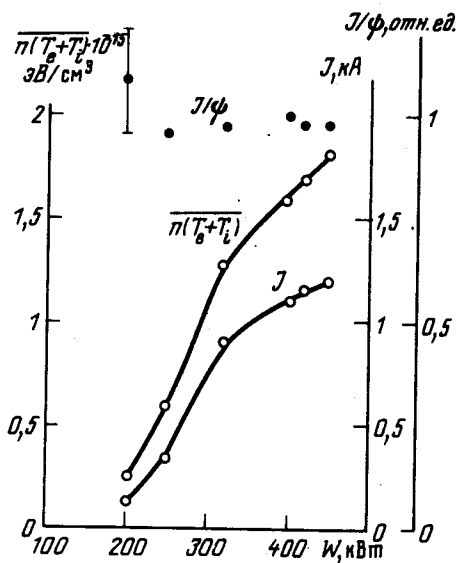


Рис. 2

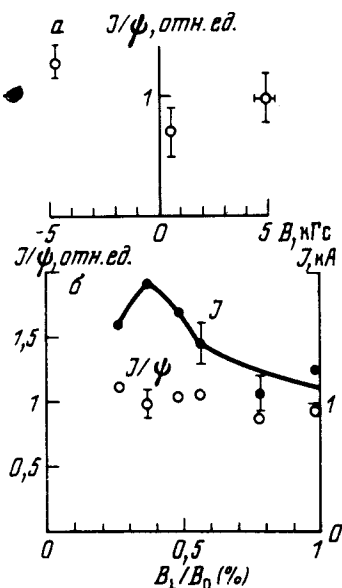


Рис. 3

Выражение для плотности "бутстрэп"-тока в бесстолкновительной области можно представить в виде ⁸:

$$j = - \frac{A(r) \nabla P}{(r/R)^{1/2} B\tau} \quad (3)$$

где $A(r)$ – коэффициент, различный для токамаков и стеллараторов.

Используя выражение (3) величину "бутстрэп"-тока можно записать в виде

$$J = \frac{\overline{A} n(T_e + T_i)}{(a/R)^{1/2} B\tau} \quad (4)$$

где a — радиус плазменного шнура. Из выражений (2) и (4) следует, что функциональная зависимость тока; наблюдаемого в эксперименте, совпадает с предсказаниями теории.

Проведенные оценки показывают, что использование выражения для "бутстрэп"-тока в стеллараторе согласно работе ⁷ дает величину тока в $1,5 \div 2$ раза меньшую, чем полученную в эксперименте. Теория переноса для токамаков ¹ предсказывает величину "бутстрэп"-тока почти в $3 \div 5$ раз, превышающую экспериментально измеренную.

Таким образом, в тортатроне "Ураган-3" в режиме ВЧ-нагрева плазмы при $\beta = 8\pi P/B^2 \lesssim 0,5\%$ наблюдался продольный ток, который по направлению и функциональной зависимости от параметров плазмы и магнитной системы установки совпадает, а по величине близок к "бутстрэп"-току, предсказанному неоклассической теорией для тороидальных магнитных ловушек и, в частности, для стеллараторов.

Литература

1. Галеев А.А., Сагдеев Р.З. "Неоклассическая" теория плазмы. Кн.: Вопросы теории плазмы, 1973, вып. 7, с. 205.
2. Kovrizhnykh L.M. Neoclassical Theory of Transport Processes in Toroidal Magnetic Confinement Systems with Emphasis on Non-Axisymmetric Configurations Nuclear Fusion, 1984, 24, 851.
3. Дикий А.Г., Кузнецов Ю.К., Пашнев В.К., Тонкопряд В.М. Исследование токов равновесия в плазме стелларатора. Физика плазмы, 1977, 3, 6.
4. Treffert J.D., Shohet J.L. Measurement of Self-Generated Pfirsch-Schluter and Bootstrap Currents in Proto-Cleo Stellarator. In: 11 th Eur. Conf. Controlled Fusion and Plasma Phys., Aachen, 1983, p. 231.
5. Bakaev V.V., Bondarenko S.P., Bronnikov V.V., et al. Currentless Plasma Production and Heating in the Torsatron "Uragan-3" by RF Waves. In: Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fus. Res., 1984: Proc. of 10-th Conf., London, 12-19 Sept., 1984, IAEA, v. 2, p. 397.
6. Berezhny V.L., Besedin N.T., Vasil'ev M.P. et al. Effects on the Equilibrium and Stability of High- β RF-Heated Plasma in the "Uragan-3" Torsatron. In: 11-th Internat. Conf. on Plasma Physics and Contr. Nucl. Fus. Res., Kyoto, 1986, IAEA-CN-47/D-III-5.
7. Ohkawa T., Chu M.S. Bootstrap Current in Stellarators. International Stellarator/Heliotron Workshop (IAEA Technical Commetee Meeting). Kyoto, 1986, F.7.

Поступила в редакцию

7 апреля 1987 г.

После доработки

5 июня 1987 г.