

ГЕНЕРАЦИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ТОКОВ И УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСОМ В ТОРОИДАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ ПРИ АЛЬФВЕНОВСКОМ НАГРЕВЕ

*Р.А. Демирханов, А.Г. Киров, Л.Ф. Ручко,
А.В. Сукачев*

В режиме альфвеновского нагрева на стеллараторе $P-0$ получены квазистационарные токи увлечения с $\langle j \rangle \approx 30 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ ($J_p = 1,2 \text{ кА}$, $q \approx 2,2$). Обнаружено, что при распространении волны в направлении диамагнитного дрейфа электронов происходит уменьшение переноса частиц и энергии плазмы по малому радиусу.

Возможность генерации стационарных токов в тороидальных системах без магнитного поля с помощью низкочастотных ($\omega = 10^6 \div 10^7 \text{ сек}^{-1}$) бегущих электромагнитных полей была показана экспериментально в работах [1, 2]. В настоящее время эксперименты по генерации токов увлечения проводятся в основном в области более высоких частот (нижнегибридный резонанс [3 – 5]). В то же время использование радиоволн более низкочастотного альфвеновского диапазона ($\omega < \omega_{ci}$) для возбуждения стационарных токов в магнитных ловушках имеет ряд преимуществ [6, 7]. Кроме того, переход к более низким частотам может позволить также управлять переносом плазмы по малому радиусу [7, 8]. Ранее

нами были исследованы нагрев плазмы с помощью альфвеновских волн [9] и радиальная структура возбуждаемых в плазме ВЧ полей [10]. В настоящей работе представлены результаты экспериментов по возбуждению альфвеновскими волнами токов увлечения и по управлению переносом плазмы поперек магнитного поля.

Винтовой ВЧ контур установки возбуждал в плазме винтовые стоячие или бегущие волны, распространяющиеся одновременно в тороидальном

и азимутальном направлении с фазовой скоростью $v_{\phi} = v_{\phi} + v_z =$

$$= \pm \left(\frac{\omega a}{m} \frac{B_{\phi}}{B_{\phi}} - \frac{\omega R}{n} \frac{B_z}{B_z} \right), \text{ где } m = 2, n = 2 - \text{соответственно азимуталь-$$

ное и тороидальное волновое число, $R = 50$ см, $a = 3,5$ см — большой и малый радиус плазмы, $\omega = 5 \cdot 10^6$ сек $^{-1}$. Знак "+" соответствует вращению волны в направлении диамагнитного дрейфа электронов ("диамагнитное" вращение), "-" — "парамагнитному" вращению. Эксперименты проводились на водороде и гелии при давлениях $p = 10^{-4} \div 10^{-3}$ тор. Большая мощность ВЧ генераторов позволяла работать в режимах и без омического нагрева и наблюдать ток увлечения в чистом виде. Вследствие относительно низкой температуры ($T_e = 10 \div 20$ эВ) и большой плотности плазмы ($n_e \lesssim 10^{14}$ см $^{-3}$) постоянная времени плазменного шнура $\tau_p = L_p/R_p \approx 10^{-4}$ сек была меньше длительности импульса ВЧ поля $\tau_{ВЧ} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ сек.

Эксперименты показали, что при выполнении условия $\omega = k_{||} c_A$ в плазме возбуждается альфвеновская волна с $E_z/E_{\phi} \ll 1$ [10] и происходит интенсивное поглощение ВЧ мощности. В тех условиях, когда ток омического нагрева отсутствовал, включение ВЧ поля приводило к нагреву плазмы и возбуждению квазистационарного тока с длительностью равной длительности ВЧ импульса (рис.1, поглощаемая мощность $\tilde{P} \approx 150 \div 200$ кВт.). При изменении направления распространения волны менялся знак тока. Характерным было то, что при распространении волны в направлении диамагнитного дрейфа электронов плотность плазмы и энергетическое время жизни были большими, чем при распространении волны в "парамагнитном" направлении.

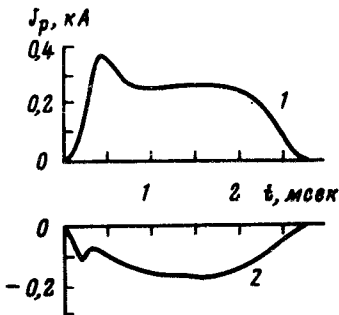


Рис.1. Оциллограммы тока увлечения в плазме при различном направлении распространения ВЧ волны. $B_z = 5,4$ кГс, $\dot{\epsilon}_0 = 0,2$, $p = 1,5 \cdot 10^{-3}$ тор, гелий: 1 — "диамагнитное" вращение; 2 — "парамагнитное" вращение

Максимальные токи увлечения достигались при "диамагнитном" направлении распространения ВЧ поля и составляли при работе на водороде $J_p \approx 1,2$ кА ($\langle j \rangle \approx 30$ А · см $^{-2}$) при $\tilde{P} = 380$ кВт, $n_e \approx 10^{14}$ см $^{-3}$, $T_e = 15 \div 20$ эВ. Ток увлечения в этих условиях увеличивал угол вра-

шательного преобразования и коэффициент запаса устойчивости $q = \frac{1}{i_0 + i_j}$ достигал величины $q \approx 2,2$, $\beta_p = 8\pi < nT > / (B_{\phi 0} + B_{\phi j})^2 \approx 2,5$.

С точностью до двойки средняя плотность тока совпадает с вычисленной по формуле $j = \frac{\sigma_{11}}{\sigma_j} \frac{e}{m \nu} \frac{k_{11}}{\omega} \tilde{Q}$ [\tilde{Q} — мощность, поглощаемая в единице объема]. Имееется, однако, ряд эффектов, которые не могут быть, объяснены существующей в настоящее время теорией и требуют дальнейшего исследования. К ним относятся, например, возбуждение заметных стационарных токов стоячей электромагнитной волной и уменьшение токов, возбуждаемых при "парамагнитном" направлении распространения волны, при увеличении тороидального магнитного поля.

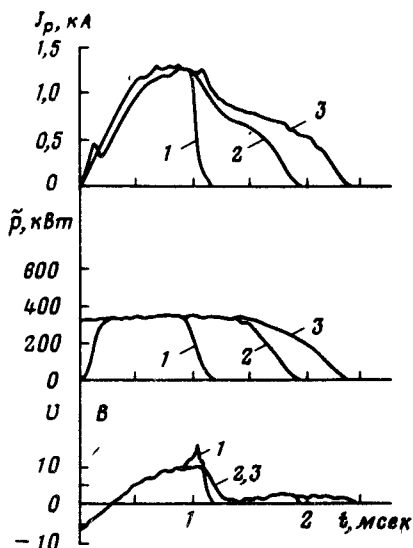


Рис. 2

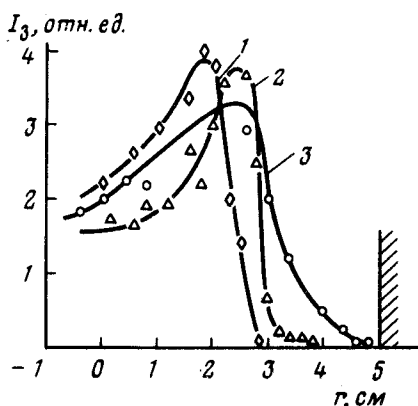


Рис. 3

Рис.2. Осциллограммы тока в плазме, поглощаемой ВЧ мощности и обходного напряжения при различной длительности ВЧ импульса (1, 2, 3). $B_z = 4$ кГс, $i_0 = 0,2$, $p = 1,5 \cdot 10^{-3}$ тор, водород, "диамагнитное" вращение ВЧ волны

Рис.3. Распределение ионного тока насыщения на зонд по радиусу при различном направлении вращения волны. $B_z = 3,6$ кГс, $i_0 = 0,4$, $p = 1,3 \cdot 10^{-3}$ тор, гелий: 1 — "диамагнитное" вращение, $\langle \tilde{B}_\phi (r = 5 \text{ см}) \rangle \approx 30$ Гс; 2 — стоячая волна, $\langle \tilde{B}_\phi (r = 5 \text{ см}) \rangle \approx 30$ Гс; 3 — "парамагнитное" вращение, $\langle \tilde{B}_\phi (r = 5 \text{ см}) \rangle \approx 45$ Гс

На рис.2 показаны осциллограммы разрядов, в которых ток в плазме поддерживался как с помощью воздушного трансформатора, так и за счет эффекта увлечения бегущим ВЧ полем. Видно, что после окончания импульса напряжения на обходе ток сначала уменьшается на 20 — 30%, а затем продолжает существовать, пока в плазму вводится ВЧ мощность (рис.2, кривые 2, 3).

Зависимость радиального профиля плотности плазмы от направления вращения волны характеризует рис.3. Из этих экспериментов следует, что при "диамагнитном" направлении вращения ВЧ волны происходит значительное уменьшение переноса плазмы по малому радиусу, а при "парамагнитном" — его увеличение. Действительно, сравнение с теорией [7, 8] показывает, что в этих условиях влияние вращающегося ВЧ поля на диффузию должно быть заметным, так как величина скорости радиального движения плазмы под действием ВЧ волны v_{r1} , вычисленная по формуле $v_{r1} \approx \frac{k_{\phi} \tilde{Q}}{\omega e n_e B_z}$ [8], близка к диффузионной скорости

v_{r2} , которая оценивалась по времени распада плотности τ_n после быстрого выключения ВЧ импульса ($\tau_{\text{выкл}} \ll \tau_n$) и по характерному размеру неоднородности Δ , $v_{r2} \sim \Delta / \tau_n$. Эти результаты качественно объясняют уменьшение энергетического времени жизни плазмы в режиме нагрева волной, вращающейся в "парамагнитном" направлении.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что альфвеновский метод генерации тока является достаточно эффективным и может обеспечить поддержание тока после исчезновения индукционного электрического поля. Кроме того, изменением направления распространения волны по азимуту можно оказывать существенное влияние на перенос плазмы поперек магнитного поля.

Авторы благодарны Э.П.Сидорову за стимулирующие дискуссии.

Поступила в редакцию
13 ноября 1980 г.

Литература

- [1] P.S.Thonemann, W.T.Cowling, P.A.Davenport. *Nature*, 169, 34, 1952.
- [2] R.A.Demirkhanov, Yu.S.Khodyrev, N.I.Leontev, T.I.Gutkin. *Nucl. Fusion*, suppl.-part 1, 259, 1962.
- [3] R.Klima et al. In *Annual Progress 1978*. IPPCZ-227, Prague, 1979, p.7.
- [4] S.Takamura et al. 2-nd Int. Symp. on Heating of Toroidal Plasmas, Como, Italy, 1980.
- [5] R.J.La Haye et al. *Nucl. Fusion*, 20, 218, 1980.
- [6] N.J.Fisch, C.F.Carney Current Generation with Low-Frequency Waves. Preprint PPPL, Princeton, 1979.
- [7] S.Inoue, K.Itoh. 8-th Int. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res. IAEA-CN-38/Z-2, Brussels, 1980; Preprint HIFT-26, Hiroshima, 1980.
- [8] В.В.Немов. *Физика плазмы*, 4, 1280, 1978.
- [9] A.G.Kirov et al. 9-th Europ Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys., Oxford, 1979, 1, p.18.
- [10] A.G.Kirov, L.F.Ruchko, A.V.Sukachov. 2-nd Int. Symp. on Heating of Toroidal Plasmas, Como, Italy, 1980.