

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ТОКА НГ ВОЛНАМИ В ТОКАМАКЕ Т-7

*В.В.Аликаев, А.А.Борщеговский, Н.Л.Васин, В.В.Волков
Ю.А.Горелов, И.Дятлов¹⁾, Д.П.Иванов, Н.В.Иванов,
В.И.Ильин, А.М.Какурин, А.Я.Кислов, П.Е.Ковров,
В.Копецкий¹⁾, В.А.Кочин, Л.Кришка¹⁾, К.И.Ликин, П.П.Хвостенко,
В.В.Чистяков, А.Ф.Шигаев*

Приводятся результаты измерений эффективности генерации тока НГ волнами в токамаке Т-7, как функции температуры электронов. Наблюдаемое увеличение эффективности с ростом температуры сопоставляется с предсказанием квазилинейной теории, дополненной предположением о наличии механизма расширения НГ спектра в коротковолновую область.

Вопрос о зависимости эффективности генерации тока нижнегибридными волнами в токамаке от температуры электронов имеет принципиальное значение для перспектив использования этого метода в реакторе. Величины эффективности, достигнутые в проведенных до настоящего времени экспериментах (см., например ¹⁻³), представляются недостаточно высокими для реактора, а первоначальное теоретическое рассмотрение механизма генерации тока ⁴ не предсказывает изменения эффективности при переходе от типичных для современных экспериментов значений температуры $T_e \sim 1$ кэВ, к реакторным $T_e \sim 10$ кэВ. В то же время, анализ экспериментальных результатов дает основание полагать, что это рассмотрение является неточным и в реальных условиях эффективность генерации тока должна зависеть от температуры электронов.

Действительно, в работах ^{5, 6} показано, что в противоречии с ⁴ нижняя по скоростям граница квазилинейного плато на функции распределения электронов v_1 не совпадает с коротковолновой границей спектра НГ волн, вводимых в плазму от внешнего источника. Вероятная причина связана с проявлением в плазме того или иного механизма расширения спектра НГ волн в сторону уменьшения продольных фазовых скоростей. Это расширение идет до достижения баланса между вводимой в плазму ВЧ мощностью, которая передается резонансным электронам за счет затухания Ландау, и мощностью потерь резонансными электронами из-за кулоновских столкновений. В случае, когда весь ток поддерживается НГ волнами, значение v_1 можно найти по известной плотности тока в плазме, приблизительно отвечающей условию $q(0) = 1$, из уравнения

$$j = \frac{en_e}{\sqrt{\pi}v_{Te}} \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} e^{-v_1^2/v_{Te}^2} = \frac{cB}{2\pi R} \quad (1)$$

Здесь n_e – плотность электронов, v_{Te} – их тепловая скорость, B – тороидальное магнитное поле, R – большой радиус тора, v_1 и v_2 – границы квазилинейного плато на функции распределения электронов. Для обычных экспериментальных условий уравнение (1) дает приближенное решение $v_1 \approx 2v_{Te}$, которое слабо зависит от других параметров плазмы. В результате в выражении для эффективности генерации тока

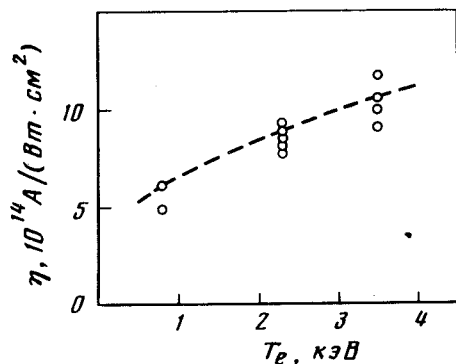
$$\eta = \frac{Z_{эфф} + 5}{6} \frac{\bar{n}_e I_{вч} R}{P + I_{вч} U} = \frac{m}{18\pi^2 e^3 L} \frac{v_2^2 - v_1^2}{\ln(v_2/v_1)} \quad (2)$$

где U – напряжение обхода, $I_{вч} = I(\Delta U/U_0)$ – генерируемый ток, P – НГ мощность, L – кулоновский логарифм, появляется зависимость от температуры электронов. В фор-

¹⁾ Институт физики плазмы АН ЧССР, Прага.

муле (2) предполагается, что генерируемый ток протекает вблизи оси плазменного шнура, где плотность плазмы $n_e \approx 1,5 \bar{n}_e$.

Настоящая работа посвящена первым результатам по экспериментальной проверке зависимости эффективности η от температуры электронов, полученным на токамаке Т-7. С этой целью установка была оснащена системой электронно-циклотронного нагрева плазмы, включающей два гиротрона на длину волны 4,6 мм, суммарной мощностью 400 кВт. СВЧ мощность вводилась со стороны малого магнитного поля в виде обыкновенных волн. Нижнегибридный комплекс токамака Т-7 (см. ¹) состоит из генератора с максимальной мощностью 600 кВт, работающего на частоте 900 МГц, и трехволноводного грилла, максимум спектра которого лежит вблизи $N_{\parallel} = 3$.



Зависимость эффективности генерации тока НГ волнами от температуры электронов плазмы. Пунктирная кривая — результат расчета по формуле (2)

Эксперименты проводились в трех режимах работы токамака. В первом режиме при значении тороидального поля $B = 19$ кГс, токе плазмы $I = 110$ кА, величине эффективного заряда $Z_{\text{эфф}} = 2,5$ и НГ мощности $P = 40$ кВт температура электронов составляла $T_e = 0,8$ кэВ. Во втором режиме с $B = 23$ кГс, $I = 180$ кА, $Z_{\text{эфф}} = 2,5$ и $P = 180$ кВт температура возрасла до $T_e = 2,3$ кэВ. В третьем режиме с $B = 23$ кГс, $I = 180$ кА, $Z_{\text{эфф}} = 5$ и $P = 180$ кВт, который отличался от первых двух использованием ЭЦ нагрева, было достигнуто значение $T_e = 3,5$ кэВ. Плотность плазмы в данных режимах составляла $\bar{n}_e = 3 \div 7 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-3}$. Плотность измерялась с помощью СВЧ интерферометра на длине волны 1 мм, температура электронов и эффективный заряд плазмы определялись из результатов спектроскопических рентгеновских измерений в диапазоне энергий 3 — 10 кэВ.

Результаты измерений эффективности генерации тока в перечисленных режимах представлены на рисунке. При определении эффективности η в качестве P использовалась мощность, вкладываемая в волну, бегущую в сторону токового движения электронов. Согласно расчетам, в нашем случае эта мощность составляла $\approx 70\%$ от полной НГ мощности, вводимой в плазму. Кроме экспериментальных данных на рисунке пунктирной кривой показан результат вычисления зависимости эффективности от температуры по формуле (2). При этом в качестве v_2 выбиралась характерная фазовая скорость вводимой в плазму НГ волны, которая для определенности была выбрана $v_2 = 10^{10} \text{ см/с}$.

На рисунке видно, что в исследованном диапазоне температур наблюдается тенденция к увеличению эффективности с ростом T_e . В пределах точности эксперимента это увеличение согласуется с результатом расчета по формуле (2).

Литература

1. Alikae V. V. et al. Proc. 9 Conf. Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res. IAEA, Vienna, 1983, 1, 227.
2. Lloyd B. et al. Proc. of the IAEA Techn. Committee Meeting. Culham Laboratory, 1983, Report CLM-CD, v.I, p. 250.
3. Motley R. et al. Ibid., v. II, p. 299.
4. Fisch N.J. Phys. Rev. Lett., 1978, 41, 873.

5. *Аликаев В.В. и др.* Физика плазмы, 1985, 11, 53.

6. *Иванов Н.В.* Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез, 1985, вып. 3, 22.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
14 мая 1986 г.
