

## ГЕНЕРАЦИЯ ТОКА НА УСТАНОВКЕ ТОКАМАК-7 С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫХ И НИЖНЕГИБРИДНЫХ ВОЛН

В.В.Аликаев, Ю.А.Горелов, Д.П.Иванов, В.И.Ильин,  
А.Я.Кислов, П.Е.Ковров, А.М.Стефановский, А.Ф.Шербак,  
П.П.Хвостенко, В.В.Чистяков

Исследован метод генерации тока в установках типа "Токамак" с помощью СВЧ волн в диапазоне электронно-циклотронного резонанса. В качестве исходной использовалась плазма, в которой функция распределения электронов по скоростям имеет асимметричное "плато".

Генерация тока на установке Токамак с помощью СВЧ волн в диапазоне электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) имеет ряд привлекательных особенностей. Локализация вкладываемой мощности, определяемая величиной тороидального магнитного поля, позволяет надеяться на возможность формирования и поддержания требуемого профиля тока в плазме, стабилизацию пилообразных колебаний и т.д. Теоретические расчеты предсказывают относительно высокую эффективность создания ЭЦ тока в максвелловской плазме с температурой электронов  $T_e \geq 10$  кэВ<sup>1</sup>. При значении электронной температуры  $T_e \cong 1 \div 5$  кэВ регистрация заметной величины ЭЦ тока, по-видимому, возможна в немаксвелловской плазме. Поэтому в данных экспериментах в качестве исходной используется плазма, в которой с помощью нижегибридных (НГ) волн на функции распределения электронов по продольным (относительно магнитного поля) скоростям создается плато до энергий  $\sim 60$  кэВ.

**Описание эксперимента.** Эксперименты проводились на установке Т-7 ( $R = 122$  см,  $a = 35$  см)<sup>2</sup>. Нижегибридные волны возбуждались в плазме с помощью трехволноводного сфазированного излучателя<sup>3</sup>. Мощность НГ волн, вводимых в плазму  $P_{\text{вч}}$  равнялась 110 кВт, а спектральная плотность мощности имела максимум при величине продольного замедления  $N_z = 3$  ( $z$  — направление тороидального магнитного поля) в направлении токового движения электронов. Источником ЭЦ мощности являлся гиротрон ( $P_{\text{свч}} \leq 400$  кВт,  $f_g = 80$  ГГц). СВЧ энергия в виде обыкновенных волн подводилась к камере установки по сверхразмерному волноводу ( $\varnothing 80$  мм) со стороны малого магнитного поля. Пройдя плазменный шнур практически без поглощения, излучение попадало на угольный отражатель, расположенный на задней стенке вакуумной камеры. Отраженная мощность с поляризацией соответствующей необыкновенной волне распространялась под углом  $\alpha \approx 80^\circ$  к тороидальному магнитному полю в направлении противоположном токовой скорости электронов. Эксперименты проводились при значении тороидального поля  $H_T = 1,4 \div 1,8$  Тл (вблизи второй гармоники ЭЦР).

**Результаты измерений.** Осциллограммы основных параметров разряда при работе НГ системы и совместной работе НГ и ЭЦ систем представлены на рис. 1. Длительность работы НГ генератора в этой серии экспериментов составляла 120 мс. Гиротрон включался спустя 20 мс после начала работы НГ системы, длительность его СВЧ импульса равнялась 60 мс. Приведенные осциллограммы относятся к режиму работы, в котором зона второй гармоники ЭЦР смещена от центра камеры наружу на расстояние  $r = 14$  см ( $\gamma = 2\omega_{ce}/\omega_r = 1,112$ , где  $\omega_r = 2\pi f_r$  — частота гиротрона,  $\omega_{ce}$  — электронно-циклотронная частота в центре камеры). Видно, что введение ЭЦ мощности приводит к снижению разрядного напряжения ( $U_p$ ), незначительному уменьшению плотности плазмы ( $\bar{n}_e$ ) и росту радиационных потерь ( $P_r$ ). Величина поглощенной мощности регистрировалась по сигналу производной диамагнетизма плазмы (рис. 1). Изменение напряжения на разряде и производной диамагнетизма плазмы  $\dot{W}_1$  в зависимости от локализации зоны второй гармоники ЭЦР или величины  $\gamma$  показаны на рис. 2. Для случая  $\gamma = 1,046$  (локализация зоны ЭЦР на расстоянии  $r = 6$  см наружу тора,  $r$  — смещение, по малому радиусу) приводятся два значения  $\dot{W}_1$ . Большое значение  $\dot{W}_1$  получено при работе НГ системы и

соответствуют ЭЦ мощности, поглощенной как тепловыми электронами, так и электронами НГ плато, меньшее значение получено путем вычитания поглощенной ВЧ мощности в омической плазме с очень близкими параметрами из первого и соответствует мощности, поглощенной электронами НГ плато. Следует отметить, что при  $\gamma = 1,1$  СВЧ мощность поглощается в плазме только при работе НГ системы и, по-видимому, связана с взаимодействием ЭЦ волн только с электронами НГ плато. При значении  $\gamma = 1,177$ , т.е. когда зона ЭЦР локализована в непосредственной близости от диафрагмы ( $r \approx 21$  см), вводимая СВЧ мощность сильно меняет параметры разряда: наблюдается значительный, в  $2 \div 2,5$  раза рост величины  $\bar{n}_e$  и  $P_\gamma$ .

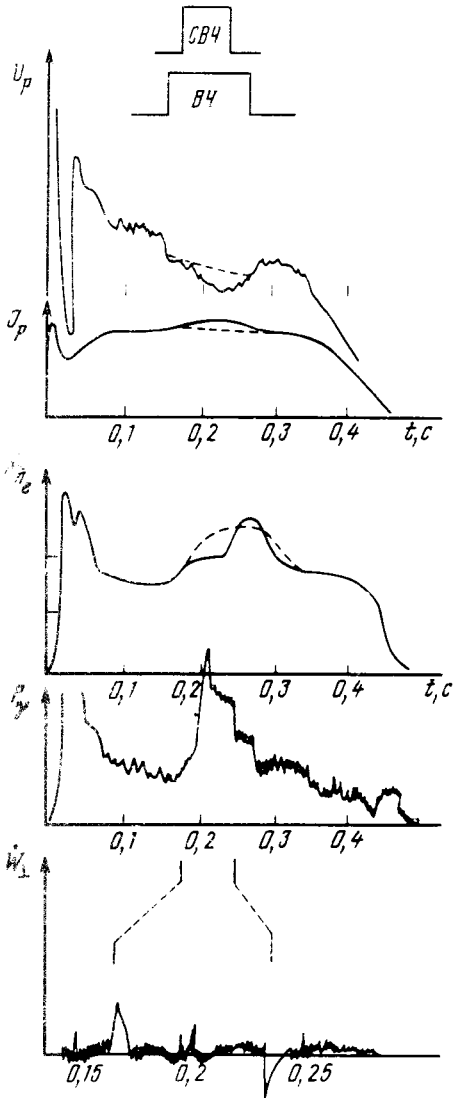


Рис. 1

Рис. 1. Осциллограммы: напряжения разряда  $U_p$ , средней по центральной хорде плотности плазмы  $\bar{n}_e$ , радиационных потерь из плазмы  $P_\gamma$ , производной диамагнитного сигнала (диамагнетизма плазмы)  $\dot{W}_\perp, P_{\text{вч}} = 110$  кВт,  $P_{\text{свч}} = 360$  кВт,  $\gamma = 1,112$

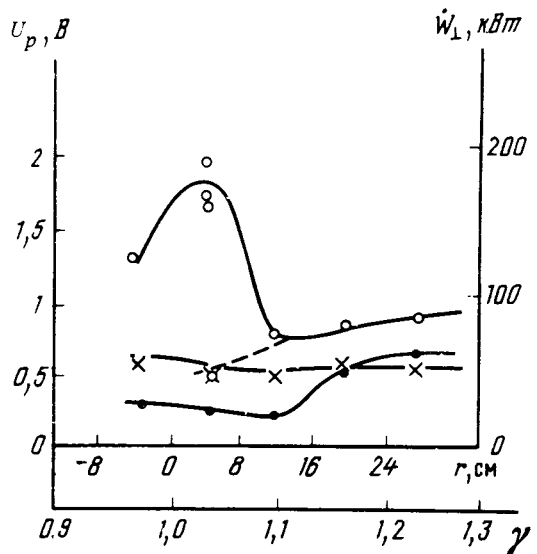


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость производной диамагнетизма плазмы ( $\dot{W}_\perp$ ) и напряжения разряда ( $U_p$ ) от значения  $\gamma$  или положения второй гармоники ЭЦР по малому радиусу тора ( $r$ )  $\circ - \dot{W}_\perp$  при работе НГ и ЭЦ систем;  $\bullet - \dot{W}_\perp$  при поглощении ЭЦ мощности электронами НГ плато;  $\times - U_p$  при работе НГ системы;  $\bullet - U_p$  при работе НГ и ЭЦ систем.

Значение электронной температуры  $T_e$  и ее распределение по малому радиусу плазмы определялись из измерений спектров рентгеновского излучения в диапазоне энергий от 2 до 10 кэВ. Как показали эти измерения величина температуры в центре плазмы  $T_e(0)$  сильно зависела от  $\gamma$  при фиксированном значении вводимой в камеру мощности  $P_{\text{свч}}$ . Наибольшее значение  $T_e(0)$  наблюдалось при  $\gamma = 1,046$ , что соответствует положению зоны второй гармоники ЭЦР вблизи центра плазменного шнура. При этом значении поглощенная мощность  $P_{\text{полг}}$  максимальна и большая часть этой мощности поглощается тепловыми электронами (рис. 2). При больших  $\gamma$ , когда поглощение происходит за счет взаимодействия ЭЦ волн с электронами НГ пучка, в пределах точности измерений  $T_e(r)$  не менялась.

В экспериментах проводились хордовые измерения спектров рентгеновского излучения в диапазоне энергий  $E_\gamma = 20 \div 100$  кэВ как при совместной работе НГ и ЭЦ систем, так и при работе одной НГ системы. Эти изменения позволили определить радиальные распределения интенсивности рентгеновского излучения  $J(r)$  при различных энергиях  $E_\gamma$ . При работе одной НГ системы распределения  $J(r)$  при различных энергиях  $E_\gamma$  были подобны. Для качественной характеристики локализации НГ пучка в плазме на рис. 3 представлено распределение  $J(r)$  при  $E_\gamma = 30$  кэВ.

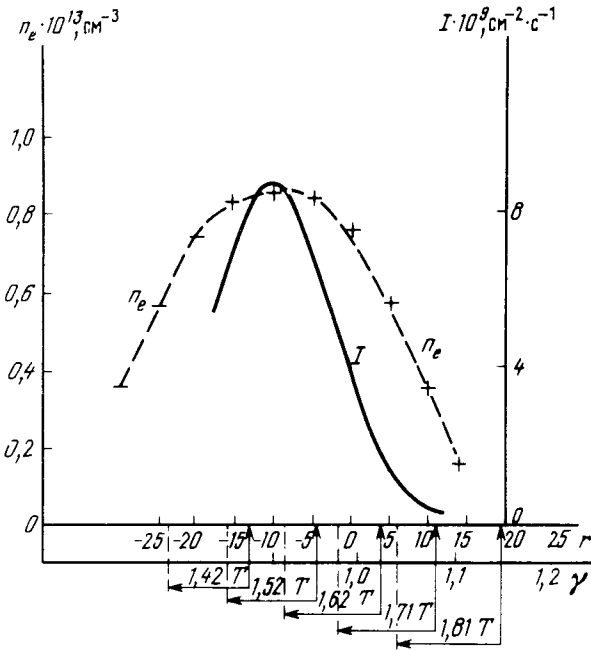


Рис. 3. Профиль интенсивности  $J_\gamma(r)$  рентгеновского излучения с энергией  $E_\gamma = 30$  кэВ при работе НГ системы, профиль плотности  $n_e(r)$ ,  $\uparrow$ —зоны второй гармоники ЭЦР при  $T_e = 0$ ,  $\leftarrow$ —области локализации поглощения ЭЦ волн по малому радиусу тора ( $r$ ) в экваториальной плоскости для энергии электронов  $E_e \leq 25$  кэВ (поперечная энергия  $E_{e\perp} = 5$  кэВ) для различных значений  $\gamma$

**Обсуждение результатов.** Механизм генерации тока в плазме с помощью ЭЦ волн заключается в нарушении симметрии функции распределения электронов по продольным скоростям, возникающим при поперечном нагреве группы резонансных электронов и их накоплении в плазме. Такое нарушение становится заметным только в том случае, если время удержания приобретенной энергии оказывается больше времени кулоновских соударений для электронов, поглощающих ЭЦ мощность. В противном случае нагретые электроны быстро теряют энергию, не накапливаются в плазме и соответствующий ЭЦ ток падает. С этой точки зрения обсудим результаты. В рассмотрение включим только те электроны, которые имеют составляющую продольной скорости по направлению навстречу ЭЦ волне, т.к. резонансная энергия для электронов, движущихся в противоположном направлении велика и достигает значений  $\sim 80 - 100$  кэВ даже для величины  $\gamma \approx 1$ .

Из осциллограмм диамагнетизма плазмы  $\dot{W}_1$  следует, что время удержания поперечной энергии, приобретаемой электронами при взаимодействии с ЭЦ волнами, составляет величину

$\approx 6$  мс и не зависит от значений расстройек  $\gamma$  исследовавшихся в экспериментах, т.е. от энергии резонансных электронов. Считая, что в создании ЭЦ тока, в основном, участвуют только те электроны, для которых время кулоновских столкновений меньше 6 мс, можно оценить предельное значение энергии  $E^*$  этих электронов. В наших условиях, при  $n_e = 7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  (рис. 3) и полученной из рентгеновских измерений величине эффективного заряда  $Z_{\text{эфф}} = 2$ , величина  $E^* = 25$  кэВ. Из резонансного условия:

$$\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} - 2\omega_{ce} \left( 1 - \frac{v^2}{2c^2} \right) = 0,$$

следует, что при данной величине  $\gamma$ , электроны НГ плато, участвующие в создании тока, взаимодействуя с пакетом ЭЦ волн, приобретают энергию  $E_e \leq E^*$  только в определенных областях плазменного шнура. Границы этих областей при различных  $\gamma$  указаны на рис. 3. Для верхней границы значение поперечной энергии электронов  $E_{\perp} = 5$  кэВ. Нижняя граница области взаимодействия, показанная на рис. 3, соответствует зоне второй гармоники ЭЦР для холодной плазмы. Из рис. 3 видно, что при больших величинах расстройки  $\gamma > 1,112$  с ЭЦ волнами взаимодействуют преимущественно электроны с энергией  $E_e > E^*$ . В этом случае, несмотря на поглощение ЭЦ мощности электронами пучка, генерация ЭЦ тока не наблюдается, т.е. отсутствует изменение разрядного напряжения  $U_p$  (рис. 1). При  $\gamma = 1,046$  ЭЦ волны взаимодействуют не только с электронами НГ пучка, но и с тепловыми электронами. Взаимодействие с тепловыми электронами приводит к значительному увеличению электронной температуры  $T_e(0)$  до  $3 \div 4$  кэВ и, следовательно, к значительному уменьшению  $U_p$ . В этих условиях определить эффект генерации ЭЦ тока по изменению величины  $U_p$  довольно трудно. Наиболее оптимальная величина расстройки  $\gamma$ , при которой мог бы наблюдаться эффект генерации ЭЦ тока, является величина  $\gamma = 1,112$ . В этом случае зона ЭЦ нагрева электронов НГ плато с  $E_e \leq E^*$  локализована в центральных областях плазмы, а область, занимаемая нагретыми частицами с  $E_e \leq E^*$  при учете вращательного преобразования, максимальна (рис. 3).

Как видно из рис. 2 именно при этом значении обнаружено максимальное уменьшение  $U_p$ . Величина дополнительного ЭЦ тока, определенная как  $I_{\text{ЭЦ}} = \frac{\Delta U_p}{U_p} I_p$ , где  $\Delta U_p$  — изменение напряжения разряда, составила при данном  $\gamma$  величину 50 кА. Изменение напряжения разряда при  $\gamma = 1,112$  может также определяться эффектом ЭЦ нагрева электронов вблизи нижней граница НГ плато на функции распределения, где  $v_{\parallel} = 2,2 \div 2,5 v_{Te}$ . При этом уменьшение коэффициента столкновительной диффузии должно уменьшать сопротивление для квазилинейной диффузии в этой области и может приводить к увеличению числа частиц во всем НГ плато, т.е. к росту НГ тока <sup>3</sup>.

#### Литература

1. Nucl. fusion. 1987, 27, 579.
2. Денисов В.Ф., Иванов Д.П. и др. ВАНТ, 1981, , в 1 (7).
3. Plasma Physics and controlled nuclear fusion research; Proc. IX Conference (Baltimore, 1 – 8 sept., 1982), 1982, vol. II, p. 153 – 161.

Поступила в редакцию  
22 ноября 1988 г.