

## ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫЙ НАГРЕВ НА УСТАНОВКЕ ТОКАМАК ТМ-3

*В.В. Аликаев, Г.А. Бобровский, М.М. Офицеров,  
В.И. Позняк, К.А. Разумова*

На установке Токамак ТМ-3 [1] проводились исследования возможности дополнительного нагрева плазмы в высокочастотном поле в диапазоне частот электронно-циклотронного резонанса и его гармоник. В экспериментах, в основном, использовался генератор с длиной волны  $\lambda \sim 1 \text{ см}$  и мощностью  $\sim 40 \text{ кВт}$ . Длительность импульса генератора составляла 500 мксек при длительности импульса тока разряда на установке ТМ-3 около 10 мсек. ВЧ мощность вводилась через горизонтальный патрубок вдоль большого радиуса установки. Гофрированный лайнер из нержавеющей стали представлял собой многомодовый резонатор с добротностью без плазмы  $Q \sim 10^4$ . Уровень энергии ВЧ поля в камере контролировался с помощью рупорной антенны, достаточно удаленной от места ввода энергии генератора. Отношение сигналов такой антенны, полученных с плазмой и без плазмы,

$$(1 - \frac{P_{\text{пл}}}{P_{\text{ввод}}})$$
, где  $P_{\text{пл}}$  –

мощность, поглощенная в плазме,  $P_{\text{ввод}}$  – мощность, вводимая в лайнер от генератора. Изучалась зависимость степени поглощения  $P_{\text{пл}} / P_{\text{ввод}}$  и изменения параметров плазмы (в результате воздействия на нее ВЧ излучения) от величины продольного магнитного поля  $H_z$  и концентрации плазмы  $n_e$ . Влияние ВЧ излучения обнаружено по изменению: диамагнетизма плазменного шнура, напряжения на обходе камеры  $U$ , смещения положения равновесия шнура и производной тока. На рис. 1, а приведены зависимости  $P_{\text{пл}} / P_{\text{ввод}}$  от  $\omega_{ce} / \omega$  ( $\omega_{ce}$  – электронно-циклотронная частота, соответствующая полю на оси лайнера  $H_{z0}$ ,  $\omega$  – частота генератора), полученные в стадии формирования разряда, когда электронная температура мала. Кривые 1 и 2 сняты при большой плотности плазмы:  $\bar{n}_e / n_{kp} = 1,4$  и  $1,14$  соответственно ( $\bar{n}_e$  – средняя по сечению шнура концентрация электронов, полученная из интерферометрических измерений,  $n_{kp}$  – критическая концентрация, соответствующая частоте генератора). Зависимость 1 снималась при вводе в камеру ВЧ энергии от генератора малой мощности ( $P \sim 3 \text{ кВт}$ ), а зависимость 2 – при мощности генератора  $P \sim 10^4 \text{ кВт}$ . Можно видеть, что почти полное поглощение наблюдается во всем диапазоне полей  $1/2 \leq \omega_{ce} / \omega \leq 1$  и поглощение уменьшается при  $\omega_{ce} / \omega > 1$ . Поглощение в холодной плазме можно объяснить линейной трансформацией волн [2] и затуханием

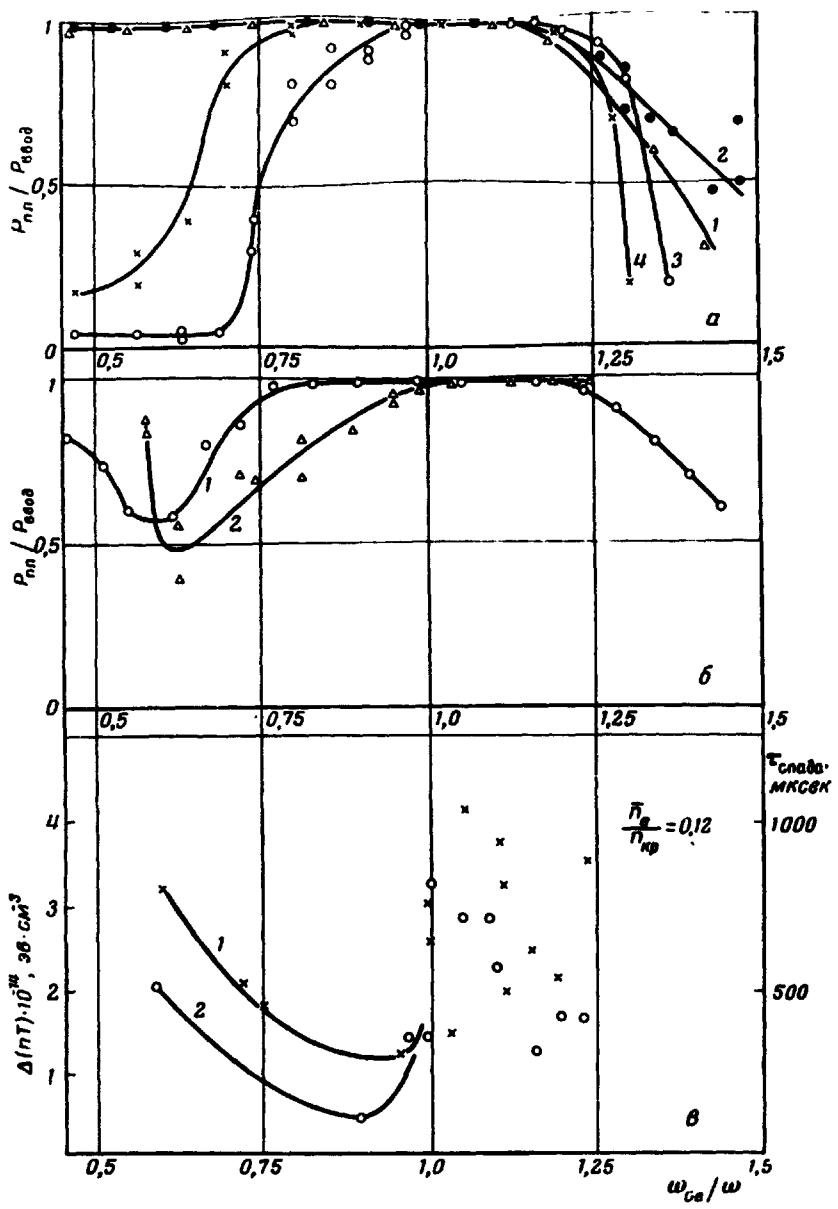


Рис. 1

плазменных колебаний на столкновениях как при наличии резонансной зоны в сечении лайнера ( $\omega_{ce}/\omega = 1$ ), так и в ее отсутствие. Следует учитывать, что изменение магнитного поля в сечении камеры из-за тороидальности составляет  $\pm 25\%$  от  $H_{zo}$ . Зависимости 3 и 4 получены при  $\bar{n}_e / n_{kp} = 0,07$  и  $0,36$ , соответственно. Можно видеть, что при уменьшении  $n_e$  в области малых значений магнитных полей поглощение исчезает при некотором значении  $\omega_{ce}/\omega$  и это значение тем меньше, чем больше концентрация. Такое явление можно объяснить отсутствием условий для трансформации при этом значении

$\omega_{ce}/\omega$  вследствие того, что нигде в объеме плазмы не выполняется соотношение  $\omega^2 = \omega_{ce}^2 + \omega_{pe}^2$ . Следует отметить, что в этих режимах не наблюдается особенностей в поглощении при  $\omega_{ce}/\omega = 1/2$ . На рис. 1,б показаны те же зависимости, полученные в режиме с высокой электронной температурой ( $T_e \geq 200$  эв) в середине импульса тока разряда. Зависимость 1 получена с помощью 3 кВ генератора ( $\bar{n}_e/n_{kp} = 0,44$ ), а зависимость 2 – при мощности генератора 40 кВт ( $\bar{n}_e/n_{kp} = 0,12$ ). В этом случае, в отличие от режима с холодной плазмой, наблюдается поглощение и вблизи второй гармоники ( $\omega_{ce}/\omega = 1/2$ ). Следует отметить, что при  $\omega_{ce}/\omega = 1/2$  и  $\bar{n}_e/n_{kp} = 0,12$  нигде в плазме нет условий для линейной трансформации. Усиление поглощения ВЧ мощности при  $\omega_{ce}/\omega \sim 1/2$  сопровождается и увеличением нагрева плазмы. На рис. 1,в представлена зависимость приращения  $nT$  плазмы от относительной величины продольного магнитного поля (кривая 1). На том же рисунке представлена зависимость времени спада  $\Delta(nT)$  после выключения ВЧ генератора от  $\omega_{ce}/\omega$  (кривая 2). Обращает на себя внимание корреляция между  $\tau_{спада}$  и  $\Delta(nT)$ . Еще более ярко проявляется она на рис. 2, где те же величины представлены в зависимости от  $n_e$ . Пропорциональность  $\Delta(nT)$  величине  $\tau_{спада}$  означает, что поглощенная в плазме ВЧ энергия в исследованных режимах слабо зависит от концентрации, и, по-видимому, от  $H_z$ . Стрелкой на рис. 2

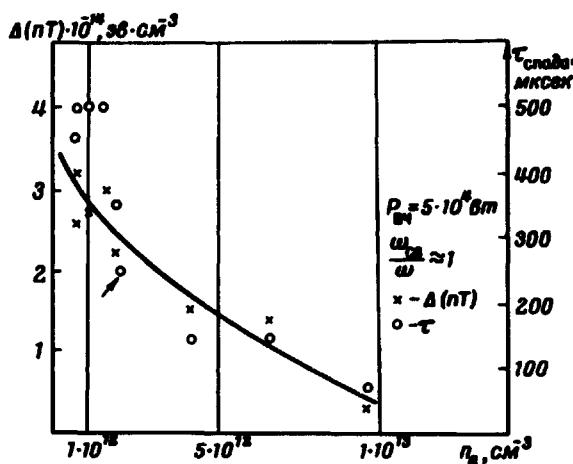


Рис. 2

отмечена величина энергетического времени жизни плазмы  $\tau_e$ , вычисленная обычным для Токамака способом:  $\tau_e = (3/2)nTV/IU$  ( $V$  – объем плазмы). Поскольку изменения концентрации электронов в течение импульса ВЧ генератора не наблюдается, увеличение  $nT$  должно происходить за счет роста  $T_e$ . Если считать, что греется вся масса электронов плазмы, то  $\Delta T_e \approx 200 \pm 240$  эв, тогда как "начальная" температура электронов в момент включения генера-

тора в исследуемом режиме  $T_e \approx 250$  эв. Сравнение  $r_{\text{спада}}$  с  $r_e$  показывает, что нагревается та доля плазменного шнуря, которая "живет" не меньше, чем  $r_e$ . Увеличение  $nT$  при постоянном токе разряда (изменение последнего во время импульса генератора – не более, чем на 1,5 %) должно приводить к дополнительному смещению равновесного положения плазменного шнуря от оси камеры наружу. В проведенных экспериментах наблюдено удовлетворительное согласие между величиной дополнительного смещения и  $\Delta(nT)$ . Дополнительный нагрев электронов плазмы должен был, естественно, привести также к уменьшению напряжения на обходе камеры. Такой эффект действительно имеет место при достаточно большой концентрации электронов. В разрядах с малой концентрацией, однако, напряжение в течение импульса генератора увеличивается. Этот факт, в принципе, можно объяснить увеличением количества запертых частиц за счет увеличения поперечной энергии электронов.

Таким образом, на установке ТМ-3 зарегистрирован электронно-циклotronный нагрев с  $\Delta(nT)$  до  $4 \cdot 10^{14}$  эв.ам $^{-3}$ . КПД нагрева для такого  $\Delta(nT)$  составляет  $20 \pm 30$  %. В горячей плазме нагрев имеет место и в районе  $\omega_{ce}/\omega = 1/2$ .

Мы благодарны нашим товарищам за помощь в проведении эксперимента и плодотворные обсуждения.

Поступила в редакцию  
29 ноября 1971 г.

#### Литература

- [1] Г.А. Бобровский, Э.И. Кузнецов, К.А. Разумова. ЖЭТФ, 59, 1103, 1970.
  - [2] В.Е. Голант, Н.Д. Пилия. УФН, 104, 413, 1971.
-