

ЭЦ НАГРЕВ НИЗКОЙ МОЩНОСТИ НА УСТАНОВКЕ Т-10

А.А.Багдасаров, В.Г.Мережкин

Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова
123182, Москва

Поступила в редакцию 22 апреля 1991 г.

В режиме $P_{\text{ЕСН}} \approx 330$ кВт, $q(a) \approx 3,7$; $n_e \approx 1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ на установке Т-10 практически не наблюдалось снижения времени удержания энергии в электронах при удвоении электронной температуры и полной мощности нагрева $P_{\text{ОН}} + P_{\text{ЕСН}}$.

Оценки потерь, связанных с электронами, запертыми в гофрах тороидального поля Т-10, показывали, что эти потери могут стать существенными после повышения электронной температуры в этой установке до 5-6 кэВ¹. Чтобы выяснить влияние этих потерь на наблюдаемые потери в Т-10, в частности, обнаруженную в² зависимость $\tau_E \sim P_{\text{tot}}^{-0,6}$ при $P_{\text{tot}}/P_{\text{ОН}}^0 = 3 - \infty$ ($P_{\text{tot}}/P_{\text{ЕСН}} + P_{\text{ОН}}$, $P_{\text{ОН}}^0$ - мощность омического нагрева до включения ЭЦН), необходимо было провести достаточно точное сопоставление с расчетом измеренных профилей T_{er} и энергетических времен τ_E при различных уровнях ВЧ мощности. В первую очередь интересно было проверить сохранение величины τ_E при пониженной ВЧ мощности до $\sim P_{\text{ОН}}^0$. Такая возможность была показана в¹, а также в экспериментах с ЭЦН на установке Т-7³, где было обнаружено сохранение величины τ_{Ee}/n_e в режимах с омическим и дополнительным нагревом.

ЭЦ нагрев низкой мощности в Т-10 исследовался в типичном рабочем режиме при токе в плазме $I_p \approx \infty$ кА, радиусе лимитера $a_L / \text{см}$, магнитном поле $B_0 \approx \infty$, кГс и $n_e \sim \infty$, $\cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В омическом режиме Z_{eff} имели значения $< \infty$ и излучательные потери не превышали 50 кВт ($\sim \infty$, $P_{\text{ОН}}^0$). Автоматическая подстройка газонапуска поддерживала среднюю плотность плазмы при включении ЭЦН. Длительность разрядного импульса составляла $\sim \infty$, с.

Эксперимент с ЭЦН проводился с одним гиротроном, который обеспечивал центральный нагрев на первой гармонике ЭЦР мощностью до 380 кВт (λ / ∞ , мм), длительность ВЧ импульса $\sim \infty$, с, длительность фронта 0,3 мс). По данным диамагнитных измерений запас энергии в плазме при ЭЦН повышался до $\sim \infty$ кДж. (β_p / ∞ , $\pm \infty$, в импульсе 49965). Ионная температура T_i , измеренная по атомам перезарядки, практически не менялась во время ЭЦ нагрева и имела величину $\sim \infty$ эВ.

Диагностика профилей T_{er}

Изменения электронной температуры в омическом режиме и в импульсе ЭЦН находились по сигналам излучения на второй гармонике ЭЦР в шести точках по радиусу плазменного шнура r . Поведение этих сигналов в омическом режиме было достаточно плавным во время подъема тока и относительно резким в начале спада тока I_p . Эти изменения в сигналах ЭЦН на спаде тока оказались связанными со смещением плазменного шнура к внешней стороне тора, а также с уменьшением поля B_0 , которое снижалось вместе с током и управляющим полем в конце разрядного импульса на Т-10. Анализ данных по смещению шнура, который находились из смещения профиля плотности

n_e и учет спада поля B_0 показал, что на отрезке времени $\Delta T < 30 - 40$ мс после начала спада тока изменения в сигналах ЭЦИ связаны с перемещением координаты x принимаемого излучения при слабых возмущениях профиля $T_e(r)$. Сдвиг координат x достигал 6 см из-за смещения и ~ 7 см из-за спада поля.

Анализ сигналов ЭЦИ в момент спада B_0 и I_p , проведенный для двух подробно исследованных импульсов 49963 и 49965 позволил провести достаточно точную ($\sim 5\%$) взаимную калибровку шести каналов измерений и найти относительные профили $T_e(r)$ для всех моментов времени в этих импульсах без привлечения других данных о распределениях $T_e(r)$. Абсолютные значения $T_e(r)$ находились из согласования рассчитанного разрядного напряжения с измеренным в предположении $1,5 < Z_{eff} < 2$. Численные расчеты показали постоянство Z_{eff} при переходе к режиму ЭЦН и дали значения $\sim 1,6$ для импульса 49963 и $\sim 1,9$ для импульса 49965. Значения $T_e(0)$ для установившейся стадии омического режима в импульсе 49963 и перед ЭЦН в импульсе 49965 были близки к 1,4 кэВ.

Результаты измерений

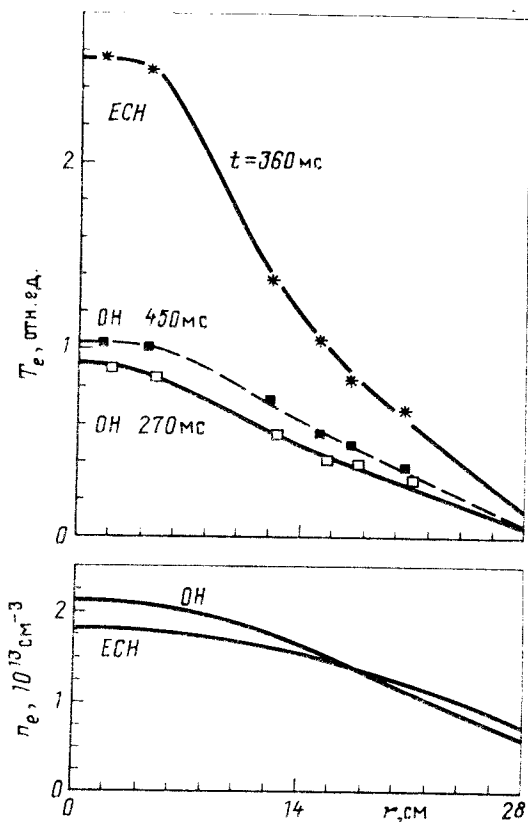


Рис. 1. Радиальные профили плотности и электронной температуры в режимах с омическим и ЭЦ нагревом

На рис.1 показаны распределения $T_e(r)$, $n_e(r)$, полученные в импульсе 49963 перед, после и во время ЭЦ нагрева. Дополнительный нагрев в этом импульсе был включен на неустановившейся еще стадии омического нагрева ($t = 270$ мс),

в которой отсутствовали пилообразные колебания. В импульсе 49963 был получен наибольший прирост электронной температуры $T_e(0)$ до 2,7 раз в начале импульса ЭЦ нагрева по отношению к установившемуся омическому уровню; к концу ЭЦН подъем температуры снижался до 2,5. В импульсах 49964 и 49965, где дополнительный нагрев включался позже на 100 мс, повышение $T_e(0)$ было таким же $\sim 2,5$, как и в конце импульса 49963. В трех импульсах температура электронов увеличивалась примерно вдвое на средних радиусах плазменного шнура ($r/a = 0,4 - 0,7$).

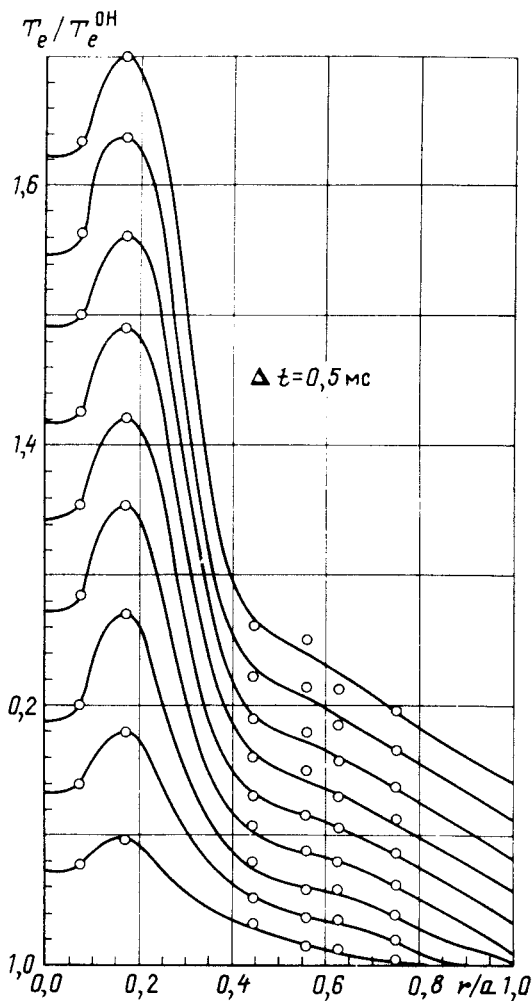


Рис. 2. Эволюция профиля $T_e(r)$ на первых мсек дополнительного нагрева в импульсе 49963

На рис.2 показаны отношения T_e/T_e^{OH} по радиусу плазмы полученные из сигналов ЭЦИ на первых 4,5 мсек ЭЦ нагрева в импульсе 49963. Отметим, что положение максимума в распределениях на рис.2 ($\Delta r \approx 5 \text{ см}$, $R \approx 149 \pm \pm 5 \text{ см}$) соответствует ожидаемому положению зоны поглощения ВЧ мощности ($R \approx 153 - 155 \text{ см}$). Отметим также, что профили T_e/T_e^{OH} в импульсе 49965, в котором наблюдались пилообразные колебания на старте ЭЦН, были менее обстречными чем в импульсе 49963.

Несмотря на заметную разницу в динамике изменения профилей $T_e(r)$ на старте ЭЦН в импульсах 49963 и 49965, рассчитанный по этим изменениям с учетом профилей $n_e(r)$ прирост энергии в электронах ΔW_e оказался линейным во времени в течении ~ 5 мс в этих двух импульсах. Отношения $\Delta W_e/\Delta t$ дали значения $P_{ECH} \simeq 340$ кВт для импульса 49963 и ~ 320 кВт для импульса 49965.

	\bar{n}_e 10^{13} см^{-3}	P_{tot} P_{ei} кВт	W_p W_e кДж	τ_E мс	τ_E/\bar{n}_e	τ_{Ee}/\bar{n}_e
49963 ОН	1,56	210 63	6,9 5,3	32	20,3	22,4
ОН + ECH	1,43	440 57	11,4 10	26	18,2	18,4
49965 ОН	1,69	210 71	6,9 5,1	32	19,1	21,2
ОН + ECH	1,49	405 61	11,3 9,7	28	18,6	18,9

В таблице приводятся значения запаса энергии в плазме W , W_e и кулоновской теплопередачи P_{ei} до и после дополнительного нагрева, рассчитанные по измеренным профилям $T_e(r)$, $\bar{n}_e(r)$ и модельному профилю $T_i(r) \sim [1 - (r/a)^2]^{1,5}$, который описывал режимы с низкими n_e в Т-10. Как видно из таблицы, мощность теплопередачи P_{ei} была заметно ниже мощности, поступающей к электронам, и возможные ошибки $\sim 20\%$ в данных по ионной температуре не могли заметно повлиять на расчет баланса энергии в электронах. Отметим также, что, так как основные величины в этих расчетах W_e и P_{ECH} были нормированы на одни и те же профили $T_e^{OH}(r)$, то отношения времён τ_{Ee} и τ_E в режимах с ЭЦ и омическим нагревом в наших расчетах определялось с ошибкой $\leq 10\%$.

Как видно из таблицы, снижение τ_E и τ_{Ee} после учета снижения \bar{n}_e оказывается очень небольшим $\sim 10\%$ при удвоении мощности нагрева плазмы в Т-10 за счет ЭЦН. Этот результат показывает преимущество дополнительного ЭЦ нагрева с пикированным профилем мощности, который может обеспечить небольшие изменения во времени удержания энергии в токамаке при повышении электронной температуры в 2-2,5 раза и относительно слабом повышении коэффициентов потерь $\chi_e \sim \sqrt{T_e}^{-1}$.

Авторы благодарны Аликаеву В.В. за подготовку эксперимента с одним гиротроном и обсуждение его результатов, Васина Н.Л. за предоставленные данные многоканальных измерений плотности плазмы.

Литература

1. Мережкин В.Г., Мухатов В.С. Препринт ИАЭ-4597/7, Москва, 1988.
2. Alikaev V.V., et al. Plasma Phys. Contr. Fusion, 1987, 30, 381.
3. Alikaev V.V., et al. In Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res. Proc. 11-th Int. Conf., Kyoto, 1986) Vol.1, IAEA, Vienna, 1987, 533.