

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО НАГРЕВУ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ Т-10 НА ПЕРВОЙ ГАРМОНИКЕ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА

*В.В.Аликаев, Л.И.Агапов, Ю.И.Арсеньев, А.Б.Берлизов,
С.Д.Богданов, А.А.Борщевский А.А., В.В.Бузанкин, Н.Л.Васин,
А.Н.Вертипорох, Н.Д.Виноградова, С.Н.Власов, Н.М.Гегечкори,
Е.П.Горбунов, А.С.Доченков, Ю.В.Есипчук, С.Л.Ефремов,
В.С.Заверяев, В.И.Ильин, А.Я.Кислов, А.А.Кондратьев,
В.И.Курбатов, С.Ю.Лукьянов, Ю.С.Максимов, Г.Е.Ноткин,
В.Б.Орлов, А.Б.Пименов, И.А.Попов, К.А.Разумова,
В.С.Стрелков, А.В.Тараканов, В.Г.Усов, В.А.Флягин,
И.Н.Хромков, Д.А.Щеглов*

В работе проведены исследования нагрева плазмы на частоте электронного циклотронного резонанса. Номинальная СВЧ мощность вводимая в токамак составляла величину около 500 кВт. КПД нагрева составлял величину $60 \div 90\%$ в зависимости от режима. Увеличение электронной температуры достигало величины $\Delta T_e = 0,6 \div 0,9$ кэВ.

На установке Т-10 проводились эксперименты по нагреву плазмы на частоте электронно-циклотронного резонанса (ЭЦ нагрев). Источником СВЧ мощности служил гиротронный комплекс¹, в котором каждый из четырех гиротронов ($\lambda = 3,6$ мм) имел выходную мощность до 200 кВт при длительности импульса Δt до 0,15 сек. СВЧ мощность вводилась в камеру токамака со стороны меньшего продольного магнитного поля; около 70% мощности переносилось обыкновенной волной, остальная -- необыкновенной. Для уменьшения рефракции излучение фокусировалось на центр сечения плазменного шнура.

Эксперименты по ЭЦ нагреву проводились при силе тока в дейтериевой плазме на уровне $J_p = 220 - 240$ кА и радиусе плазменного шнура, определяемом подвижной углеродной диафрагмой, $a_L = 34$ см. Средняя по диаметру концентрация электронов лежала в пределах $\bar{n}_e = (2,5 - 4,0) \cdot 10^{13}$ см⁻³, магнитное поле на оси шнура составляло $B_T = 30$ кГс, что соответствовало первой гармонике ЭЦР.

В процессе экспериментов было обнаружено, что эффективность нагрева и термоизоляция плазмы при ЭЦ нагреве зависят от режима разряда, в котором производится нагрев. Поэтому все результаты экспериментов представлены для режимов двух типов. Режим первого типа получался после очистки камеры тлеющим разрядом и характеризовался низким уровнем легких примесей и, как правило, более низкими значениями \bar{n}_e , чем в режиме II, который имел место после очистки камеры индукционным разрядом.

Как показали эксперименты, изменение напряжения на обходе тора U и парамагнитного потока Φ во время СВЧ импульса, а также величины τ — постоянной времени спада Φ для режима II превышали значения соответствующих величин в режиме I в 1,5 – 2 раза. Отсюда можно сделать вывод, что эффективность ЭЦ нагрева выше и поглощенная СВЧ мощность лучше удерживается в режиме II. Изменение энергосодержания плазмы ΔW для этих режимов под действием ЭЦ нагрева приведено на рис. 1.

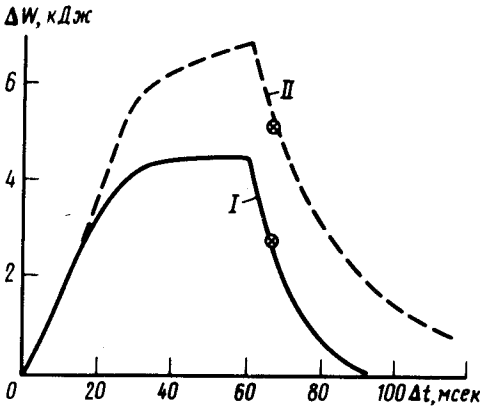


Рис.1. Временной ход увеличения $\Delta W = \Delta nT$ в процессе нагрева для двух режимов

Определим основные величины, характеризующие ЭЦ нагрев:

$$\delta \eta = \frac{P_{\text{СВЧ}}}{P_{\text{нв}} + P_{\text{ов}}} , \quad (1)$$

$$\tau'_E = \frac{W}{P_{\text{он}} - dw/dt} . \quad (2)$$

Здесь η — КПД нагрева, $P_{\text{СВЧ}}$ — мощность, поглощенная в плазме, $P_{\text{нв}}$ и $P_{\text{ов}}$ — мощности, вводимые в плазму соответственно в виде необыкновенной и обыкновенной волны. Величина W — внутренняя энергия плазмы, $P_{\text{он}}$ — омическая мощность и τ'_E — полное энергетическое время удержания энергии, определенное после СВЧ импульса. Поглощенная в плазме СВЧ мощность определялась из уравнения энергодоланса:

$$P_{\text{СВЧ}} = \Delta W / \tau'_E + dW/dt + \Delta P_{\text{он}} , \quad (3)$$

де $\Delta P_{\text{он}} = J_p \Delta U$ — изменение омической мощности при нагреве. Основные параметры разрядов в режимах I и II совместно с величинами, характеризующими ЭЦ нагрев, представлены в таблице, где звездочкой "*" отмечены величины, полученные из рентгеновских измерений, индекс "о" относится к параметрам, определенным до СВЧ импульса. Для режима I, в котором распределения $T_e(r)$ определены как методом томсоновского рассеяния, так и по рентгеновским спектрам (см. рис.2), в таблице приведены два значения $\Delta T_e(0)$, которые хорошо согласуются между собой. На основании измеренных профилей $T_e(r)$ и $j_e(r)$ в режиме I был рассчитан прирост внутренней энергии плазмы ΔW , который, как видно из таблицы, хорошо согласуется с диамагнитными измерениями. Для режима II прирост внутренней энергии плазмы при ЭЦ нагреве определялся только с помощью диамагнитных измерений.

Как видно из таблицы, эффективность нагрева достаточно высока. Наибольшее значение ПД достигается в режиме II, где величина η составляет 90%. Мощность, вводимая обыкновенной волной, полностью поглощается во внутренних областях плазменного шнура; часть

мощности необыкновенной волны также поглощается, что, по-видимому, обусловлено деполаризацией СВЧ излучения при отражении от стенок камеры.

Следует отметить, что величина КПД, указанная в таблице для режима II, может оказаться завышенной из-за уменьшения внутренней индуктивности плазменного шнура l_i при ЭЦ нагреве. Как показал анализ возможных профилей плотности тока, основанный на данных диамагнитных и рентгеновских измерений, индуктивная составляющая напряжения $1/2 I_p \Delta l_i / \Delta t$ может достигать 0,1 – 0,2 В. Учет этой составляющей уменьшит $P_{\text{он}}$ на 20 – 40 кВт и КПД составит 80 – 85%. Для режима I аналогичная поправка пренебрежимо мала.

Исследование электронной и ионной компонент показало, что: 1) нагрев электронной компоненты происходит в основном в центральных областях шнура (см. рис. 2) и ΔT_e в центре составляет 0,6 – 0,9 кэВ; 2) нагрев ионной компоненты заметен только в режиме II. Прирост ионной температуры, определенный по спектру атомов перезарядки и по интенсивности потока термоядерных нейтронов, составил около 100 эВ, как и следовало ожидать в этих условиях (рис.3).

Тип режима	$\bar{n}_e \cdot 10^{13}$ см ⁻³	$T_{e0}(0)$ кэВ	τ_{E0} мсек	$P_{\text{нв}}$ кВт	$P_{\text{ов}}$ кВт	$P_{\text{свч}}$ кВт	Δt мсек	$\Delta T_e(0)$ кэВ	ΔW кДж	$\Delta P_{\text{он}}$ кВт	η %	τ_E мсек
I	2,8	1,5	40	150	350	320	60	0,9* – 1,0	3,7 – 3,8*	120	64	25
II	3,8	1,2	45	150	350	450	60	0,5* – 0,6*	6,8	230	90	36

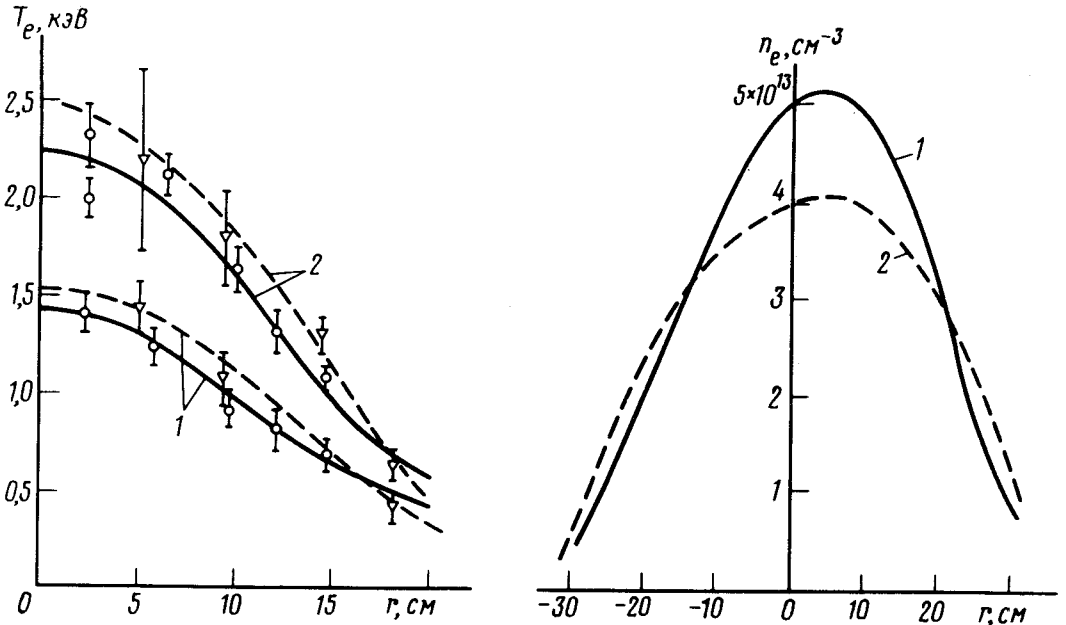


Рис.2. Радиальный профиль электронной температуры и концентрации (1) – до, (2) – в конце импульсного нагрева. Режим I

Наряду с этими явлениями следует отметить, что ЭЦ нагрев сопровождался падением электронной плотности в приосевых областях шнура. Этот эффект, незаметный в режиме II, отчетливо наблюдался в I режиме (см. рис.2), где уменьшение $n_e(0)$ составляло около 20%.

Из измерений мощности радиационных потерь P_R следует, что ЭЦ нагрев сопровождается увеличением P_{R0} не более чем на 40 кВт в режиме II и около 80 кВт в режиме I. Однако, это различие величин ΔP_R в указанных режимах не может объяснить разницу соответствующих значений τ'_E .

Отличие величин τ'_E , ΔW и η для режимов I и II связано, в основном, с отличием в поведении коэффициента электронной теплопроводности κ_e . Как оказалось, значение κ_e для внутренней области плазменного шнура в режиме I увеличивается в три – четыре раза во время ЭЦ нагрева и слабо изменяется в режиме II.

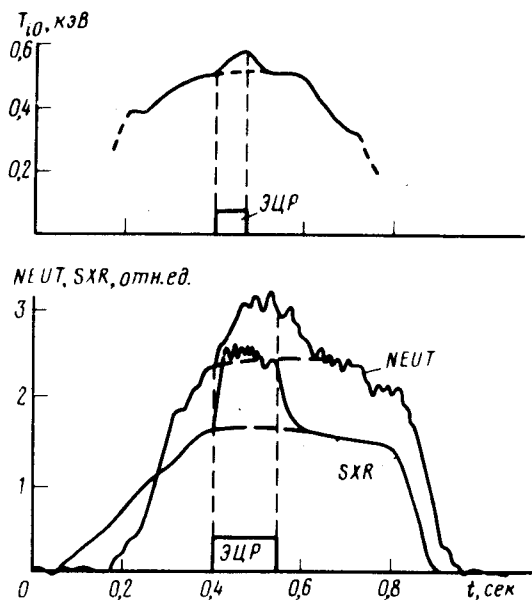


Рис.3. Временной ход нейтронного и рентгеновского излучений, а также ионной температуры в режиме II с ЭЦР нагревом

Основные исследования ЭЦ нагрева были выполнены при длительности СВЧ импульса 60 мсек. В последней серии разрядов гиротронный комплекс был испытан на длительности 150 мсек. Качественное представление о процессе нагрева при такой длительности можно получить из осциллограмм нейтронного и рентгеновского излучения, представленных на рис.3. Нейтронное излучение и, следовательно, ионная температура растет в течение всего импульса. Прирост интенсивности мягкого рентгеновского излучения выходит на стационарный уровень и остается далее постоянным, что может свидетельствовать о достижении стационарного состояния электронной температуры.

Таким образом, проведенные на Т-10 эксперименты показали, что ЭЦ нагрев может быть успешно применен для нагрева плазмы в крупных термоядерных установках.

Литература

Аликаев В.В. и др. Препринт ИАЭ-3502/7, М., 1981 г.