

СОГЛАСОВАННОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ В ТОКАМАКЕ T-10 ПРИ ЭЦР-НАГРЕВЕ

Ю.Н.Днестровский, Ю.В.Есипчук, С.Е.Лысенко, К.Н.Тарасян

Проведены численные расчеты профилей температуры электронов при ЭЦР-нагреве в токамаке T-10. Предложена модель потока тепла, использующая идею о канонических профилях тока и давления плазмы. Рассчитанные профили температуры согласуются с экспериментальными при различных величинах и профилях мощности ЭЦР-нагрева.

Недавние эксперименты на токамаке T-10¹⁻² с центральным и нецентральным ЭЦР-нагревом указывают на сильную зависимость эффективного локального коэффициента теплопроводности $\chi_{eff} = -\Gamma / (\partial T_e / \partial r)$ от профиля вкладываемой ЭЦР-мощности (Γ — поток тепла электронов). В работе описаны результаты численного моделирования проведенных экспериментов на основе модели, использующей идеи "канонических" профилей тока и давления плазмы³⁻⁴.

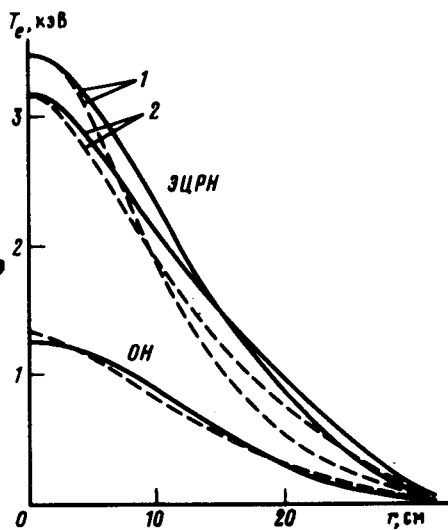


Рис. 1

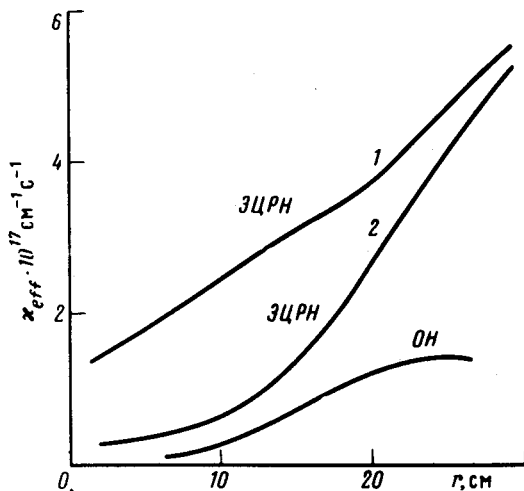


Рис. 2

Рис. 1. Сравнение результатов моделирования (пунктирные кривые) с экспериментальными профилями электронной температуры (сплошные кривые) в омическом режиме (ОН) и для двух различных профилей мощности ЭЦР-нагрева (ЭЦРН): 1 — центральный нагрев (импульс № 45439), 2 — нецентральный нагрев (импульс № 45443). Данные относятся к концу импульса нагрева длительностью 100 мс

Рис. 2. Эффективные коэффициенты электронной теплопроводности для режимов нагрева, приведенных на рис. 1

Сравним результаты экспериментов при центральном (импульс № 45439) и нецентральном (импульс № 45443) нагреве при одинаковом токе $I = 200$ кА и одинаковой средней плотности $\bar{n} = 3,0 \cdot 10^{13}$ см⁻³. На рис. 1 сплошными кривыми нанесены экспериментальные профили $T_e(r)$ в омическом режиме (ОН) и при ЭЦР-нагреве (ЭЦРН). В импульсе 45439 производился нагрев в центре тремя гиротронами с суммарной поглощаемой мощностью $P = 630$ кВт. В импульсе 45443 один гиротрон грел плазму в центре, а четыре — на радиусе ~ 17 см. Суммарная мощность составляла $P \sim 850$ кВт (~ 200 кВт в центре и ~ 650 кВт на радиусе 17 см). Из рисунка видно, что абсолютные значения и профили $T_e(r)$ различаются слабо. Несильно различаются и локальные значения градиента $\partial T_e / \partial r$. В то же время мощность, введенная

внутри плазменного цилиндра с радиусом $r = 10-12$ см различается в три раза. В соответствующее число раз должны различаться и значения χ_{eff} . Поскольку локальные значения параметров ($n(r)$, $T_e(r)$, $\partial T_e / \partial r$) близки, то указанные изменения χ_{eff} не могут определяться функциональной зависимостью χ_{eff} от локальных параметров. Налицо эффект, связанный с профилем $T_e(r)$ в целом.

Для описания эволюции температуры электронов использовалась следующая простейшая модель. Плотность $n = n(r, t)$ и температура ионов $T_i = T_i(r, t)$ полагалась известной из эксперимента. В этом случае система уравнений энергобаланса имеет вид ⁵:

$$-\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (n T_e) = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Gamma) + Q_{OH} + Q_{ei} + Q_{EC} + Q_{rad}.$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} = \frac{c^2}{4\pi} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\sigma r} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \mu) \right). \quad (1)$$

Здесь $\mu = 1/q$, q – запас устойчивости, Q_{OH} – джоулева мощность, Q_{ei} – обмен между электронами и ионами, Q_{EC} – мощность ЭПР-нагрева, Q_{rad} – потери на излучение и ионизацию. Распределения $Q_{EC}(r, t)$ и $Q_{rad}(r, t)$ брались из эксперимента.

Специфика модели заключается в выборе потока Γ . Мы выбрали его в виде суммы

$$\Gamma = \Gamma_A + \Gamma_B, \quad (2)$$

в которой Γ_A отражает глобальные характеристики удержания электронов, а Γ_B передает влияние профиля $T_e(r)$ или других параметров.

Для описания глобальных характеристик мы использовали скейлинг T-11, полагая

$$-\Gamma_A = \chi_A \frac{\partial T_e}{\partial r}, \quad \chi_A = \chi_e^{T-11} + \chi_e^{neo}, \quad (3)$$

где $\chi_e^{T-11} = 10^{20} \frac{T_e^{1/2}}{qR} (r/R)^{7.5} \text{см}^{-1} \text{с}^{-1}$ (T_e в эВ), χ_e^{neo} – неклассический коэффициент теплопроводности.

Структура Γ_B выбирается из следующих соображений. Согласно ³, простейший канонический профиль $T_e(r)$ при $Z_{eff}(r) = \text{const}$ имеет вид: $T_e^0(r) = T_e^0(0)(1 + r^2/a_T^2)^{-4/3}$, где a_T – токковый радиус, равный $a_T = a \sqrt{q_0 / (q_a + q_0)} \approx a / \sqrt{q_a - 1} \approx a / \sqrt{q_a}$. Функция $T_e^0(r)$ удовлетворяет однородному дифференциальному уравнению $dT_e^0/dr + k_T T_e^0 = 0$, где $k_T = 8r / 3a_T^2 (1 + r^2/a_T^2)^{-1}$. "Жесткость" канонического профиля, т.е. "привязанность" к нему локальных параметров плазмы, возрастает, согласно ³, с увеличением β_p (или близко-го к нему по поведению отношения \bar{n}/I). Учитывая эти замечания, положим

$$-\Gamma_B = \chi_B [\bar{n}/I] \left(\frac{\partial T_e}{\partial r} + k_T T_e \right). \quad (4)$$

Здесь под $[\bar{n}/I]$ мы понимаем безразмерное число, которое получится, если \bar{n} измерять в 10^{13}см^{-3} , а ток I в МА. Параметр χ_B имеет размерность коэффициента теплопроводности. Для сохранения глобальных зависимостей положим $\chi_B = \alpha \chi_e^{T-11} (a_T/2)$, где α – постоянный множитель порядка единицы. В выражении (4) член $k_T T_e$ играет роль теплового пинча. При $T_e(r) = T_e^0(r)$, $\Gamma_B = 0$, $\chi_{eff} = \chi_A$. Если круглая скобка в (4) в некоторой области положительна, т.е. тепловой пинч здесь превалирует, то $\chi_{eff} < \chi_A$ и удержание энергии электронов в этой области улучшается.

Результаты расчетов по модели (1) – (4) приведены на рис.1 пунктиром. Здесь $\alpha = 1, a_T = a / \sqrt{q_a}$. На рис. 2 изображены профили $\chi_{eff}(r)$ для двух рассматриваемых импульсов.

В центральной части шнура χ_{eff} различаются почти в 4 раза при относительно близких профилях $T_e(r)$. Такая "самонастройка" модели, отражающая реальную самоорганизацию плазмы, происходит из-за включения эффектов, связанных с каноническим профилем $T_e(r)$. Аналогичный результат получится и при привязке поведения $T_e(r)$ к каноническому профилю давления.

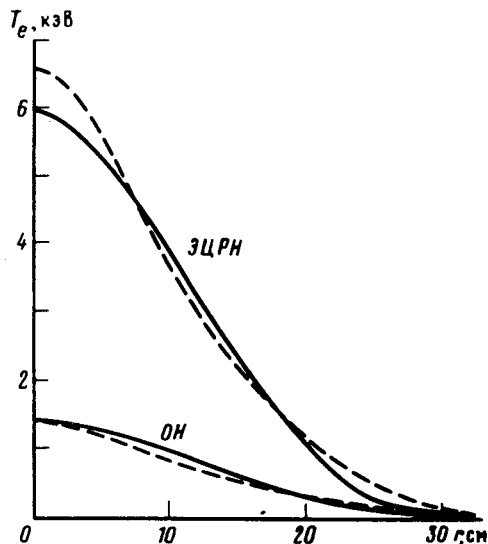


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования (пунктир) с экспериментальными профилями $T_e(r)$ в режиме с большой мощностью ЭЦР-нагрева (сплошные кривые), $P = 1,9$ МВт

Для проверки модели были проведены расчеты при большой мощности нагрева $P = 1,9$ МВт, результаты которых приведены на рис.3 (импульс №45750). В этом импульсе зоны ЭЦР для двух групп из 7 и 3-х гиротронов были расположены почти симметрично относительно центра шнура. Ток разряда был тем же, $I = 200$ кА, а средняя плотность в конце импульса нагрева $\bar{n} = 2,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Приведенные данные позволяют заключить, что в широком диапазоне как величины мощности нагрева, так и ее профиля, предложенная модель вполне удовлетворительно описывает результаты экспериментов с ЭЦРН на Т-10.

Авторы благодарны К.А. Разумовой за активное стимулирование настоящей работы и полезную дискуссию.

Литература

1. Аликаев В.В., Багдасаров А.А., Васин Н.Л. и др. Физика плазмы, 1987, 13, 3.
2. Аликаев В.В. et al. Proc. 11-th Intern. Conf. on Plasma Phys. and Control. Nuclear Fusion Res., Kyoto, IAEA-CN-47/A-II-4, 1986.
3. Есипчук Ю.В., Кадомцев Б.Б. Письма в ЖЭТФ, 1986, 43, 573.
4. Васин Н.Л., Есипчук Ю.В., Разумова К.А., Санников В.В. Физика плазмы, 1987, 13, 109.
5. Днестровский Ю.Н., Костомаров Д.П. Математическое моделирование плазмы. М.: Наука, 1982.