

ПОВЕДЕНИЕ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОМ НАГРЕВЕ НА УСТАНОВКЕ ТОКАМАК-10

А.А.Багдасаров, Е.Л.Березовский, С.Л.Ефремов, В.С.Заверьяев, А.А.Медведев

На установке Т-10 изучалось поведение ионной компоненты в процессе СВЧ-нагрева электронов при введении в плазму мощности ~ 1 МВт. Полученные данные подтверждают кулоновский характер передачи энергии от электронов к ионам.

Основной частью программы по дополнительному нагреву плазмы на установке Т-10 является электронно-циклотронный нагрев на первой гармонике резонансной частоты. Источником СВЧ мощности служит комплекс из 6 гиротронов, мощностью по 200 кВт каждый с длительностью импульса $\lesssim 100$ мс⁻¹.

Целью данной работы является подбор оптимального, с точки зрения нагрева ионов, режима при фиксированной СВЧ мощности, вводимой в плазму. При этом, естественно нагрев ионов является результатом взаимодействия ионов с нагретыми электронами.

Поведение электронной и ионной компонент плазмы изучалось в режиме с током $I_p \cong \cong 300$ кА, продольным магнитным полем $B_z \cong 30,0$ кГс, средней концентрацией электронов $n_e = (0,5 \div 4) \cdot 10^{13}$ см⁻³ путем регистрации второй гармоники электронно-циклотронного излучения, энергетических спектров атомов перезарядки и термоядерного нейтронного излучения. Измерения проводились при различных положениях резонансной зоны поглощения СВЧ мощности.

На рис. 1 представлены результаты измерения электронной и ионной температур в центре плазмы в процессе СВЧ нагрева в одном из режимов, исследованных в данной работе.

На рис. 2 приведена совокупность результатов измерений центральной ионной температуры в конце СВЧ нагрева в различных условиях, определявшихся, прежде всего, варьированием плотности плазмы, что приводило к различным изменениям электронной температуры при СВЧ нагреве с фиксированной мощностью.

Как видно, наблюдается переход функции $\Delta T_i/T_i^0$ через нуль, а две ветви ее соответствуют увеличению и уменьшению ионной температуры в результате СВЧ нагрева электронов.

Такой характер поведения величины $\Delta T_i/T_i^0$ соответствует кулоновскому закону передачи энергии от электронов к ионам ², а отрицательная и положительная ветви $\Delta T_i/T_i^0$ на рис. 2 объясняется немонотонным характером зависимости кулоновской мощности от температуры электронов. В соответствии с этим законом при $T_e > 3T_i$ передача энергии от электронов к ионам начинает уменьшаться с ростом T_e , что и приводит к появлению области отрицательных величин $\Delta T_i/T_i^0$. Простой расчет, проведенный в предположении кулоновского характера передачи энергии от электронов к ионам и неизменности коэффициентов тепловых потерь ионами в процессе СВЧ нагрева электронов (что во всяком случае верно в области, близкой к нулевым значениям $\Delta T_i/T_i^0$) дает хорошее соответствие между экспериментальными данными и результатами расчета — см. рис. 2. Однако, это согласие свидетельствует лишь о совпадении функциональных зависимостей экспериментальных величин и кулоновского закона передачи энергии, так как по абсолютной величине Q_{ei} может, в принципе, отличаться от кулоновской Q_{ei}^k (при этом для согласования баланса энергии ионов как в омическом режиме, так и при дополнительном нагреве необходимо, чтобы коэффициенты переноса энергии ионов оказались во столько же раз отличающимися от значений, соответствующих кулоновской передаче). Указанную неопределенность можно исключить проанализировав скорость нарастания ионной температуры в процессе СВЧ нагрева. Эта скорость зависит от абсолютной величины энергии, передаваемой от электронов к ионам.

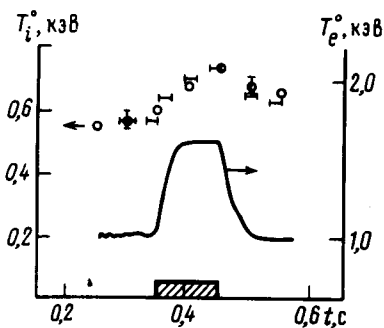


Рис. 1

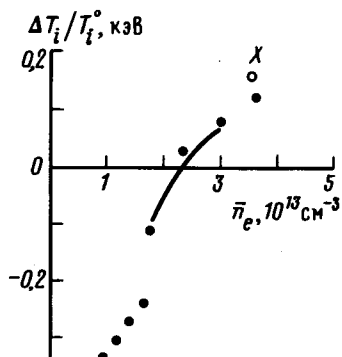


Рис. 2

Рис. 1. Временной ход электронной и ионной температуры в центре плазмы при СВЧ нагреве в режиме с параметрами: $I_p = 280$ кА, $B_t = 32,8$ кГс, $\bar{n}_e = 3,6 \cdot 10^{13}$ см⁻³, $P_{\text{свч}} = 0,9$ МВт. — — данные по перезарядке, ○ — нейтронные измерения, — — измерения электронной температуры по второй гармонике ЭЦ излучения. Длительность СВЧ нагрева отмечена заштрихованной областью

Рис. 2. Зависимость относительного увеличения центральной ионной температуры к концу СВЧ нагрева от средней плотности плазмы при фиксированной СВЧ мощности ($P_{\text{свч}} \approx 0,9$ МВт): ● — резонансная зона в центре плазмы, ○, × — резонансная зона смещена внутрь и наружу от центра плазмы соответственно на $\Delta r = -9$ см и $\Delta r = 12$ см. Сплошная кривая — расчет

Из рис. 1 видно, что электронная температура при СВЧ нагреве увеличивается существенно быстрее, чем ионная. В этом случае, используя уравнение энергобаланса ионов в виде:

$$\frac{3}{2} \frac{\Delta}{\Delta t} (n T_i) = k (Q_{ei}^* - Q_{ei}^0) = k \Delta Q_{ei},$$

где Q_{ei}^0 , Q_{ei}^* — кулоновская передача энергии ионам. в омическом и дополнительном нагревах, k — коэффициент пропорциональности. После несложных оценок можно сделать вывод о том, что отличие абсолютной величины реальной передачи энергии от электронов ионам от кулоновской составляет величину $1 \div 3$ (этот диапазон определяется неточностью измерений скорости нарастания ионной температуры).

Отметим, что при смещении зоны поглощения СВЧ мощности от центра плазмы наблюдается более слабое увеличение центральной электронной температуры и уплощение ее профиля при той же мощности СВЧ нагрева ¹. В результате реализуется меньший, чем при цен-

тральном нагреве, отрыв электронной температуры от ионной и, как и следует из кулоновского закона передачи энергии, наблюдается более эффективный нагрев ионов, слабо зависящий от того, куда смещена зона поглощения СВЧ мощности — см. рис. 2.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о классическом кулоновском характере передачи энергии от электронов к ионам в процессе СВЧ нагрева электронной компоненты.

В заключение авторы благодарят большой коллектив сотрудников, участвовавших в реализации программы СВЧ нагрева на Т-10 за помощь в работе.

Литература

1. *Alikaev V. V., et al.* Electron cyclotron heating & plasma conf. in the T-10 tokamak. X Международная конференция по исследованиям в области физики плазмы и УТС, IAEA-CN-44/F-1-I, Лондон, 12 – 19 сентября 1984 г.
2. *Stott P.E.* Plasma Physics, 18, 251.

Поступила в редакцию
4 февраля 1985 г.
