

СОЗДАНИЕ И НАГРЕВ БЕСТОКОВОЙ ПЛАЗМЫ НЕОБЫКНОВЕННОЙ ВОЛНОЙ НА СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2 В РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА

*Э.Д. Андрюхина, Л.Н. Агапов, Г.М. Батанов,
М.С. Бережецкий, М.А. Блох, С.Д. Богданов, Г.С. Воронов, Е.Ф. Гиппиус,
Н.П. Донская, К.С. Дябилин, Н.Ф. Ларионова, А.Г. Литвак, С.В. Кладов,
Б.И. Илюхир, В.И. Курбатов, Л.М. Коврижных, В.Н. Колесников, Л.В. Колик,
А.В. Новикова, А.В. Парамонов, С.Н. Попов, А.В. Сапожников, К.А. Сарксян,
И.С. Сбитникова, О.Б. Смолякова, А.Д. Смирнова, Е.В. Суворов, В.Н. Суходольский,
А.Е. Мещеряков, А.Е. Петров, О.И. Федянин, А.А. Фрайман, Ю.В. Хольнов, И.С. Шпигель*

Сообщаются первые результаты экспериментов по созданию и нагреву бестоковой плазмы необыкновенной волной на стеллараторе Л-2 в режиме электронного циклотронного резонанса.

В настоящее время электронный циклотронный нагрев (ЭЦН) плазмы широко используется в качестве дополнительного метода нагрева в токамаках ¹, а также для создания и нагрева бестоковой плазмы в стеллараторах ^{2,3}.

В экспериментах на стеллараторе Л-2, параметры которого приведены в ⁴, бестоковая плазма создавалась в режиме ЭЦН на основной гармонике электронной гирочастоты ω_{He} ($\omega_{\text{He}} = \omega_0$, ω_0 – частота СВЧ волны). В отличие от аналогичных экспериментов ^{2,3}, в которых работа велась с волноводными модами в присутствии волн с обеими поляризациями ($\vec{E}_0 \perp \vec{B}$ и $\vec{E}_0 \parallel \vec{B}$) в настоящих экспериментах использовалась волна с необыкновенной поляризацией ($\vec{E}_0 \perp \vec{B}$).

В экспериментах применялся гиротрон с длиной волны $\lambda_0 \cong 1$ см. После преобразования волноводной моды гиротрона в плоскополяризованную СВЧ волну, мощность с помощью зеркального квазиоптического тракта вводилась в камеру в виде гауссова пучка с необыкновенной поляризацией. На входе в камеру в пучке с расходимостью $\pm 6^\circ$ и диаметром в фокальной плоскости 50 мм мощность составляла $P_0 = 80 \div 100$ кВт. Длительность СВЧ импульса $\cong 10$ мс. СВЧ мощность вводится в вакуумную камеру через верхний патрубок, что при структуре модуля магнитного поля в стеллараторе Л-2 соответствовало вводу необыкновенной волны со стороны сильного поля. Приведенные ниже результаты получены при величине напряженности магнитного поля, соответствующей выполнению резонансных условий $\omega_0 = \omega_{\text{He}}$ в центральной области плазменного шнура.

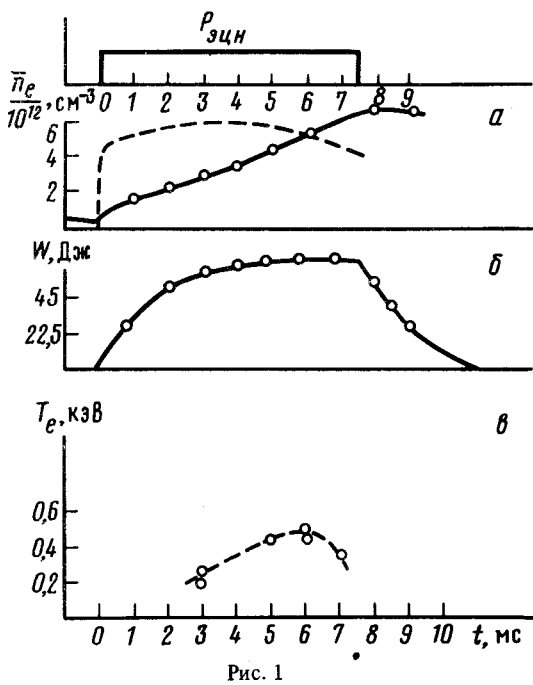


Рис. 1

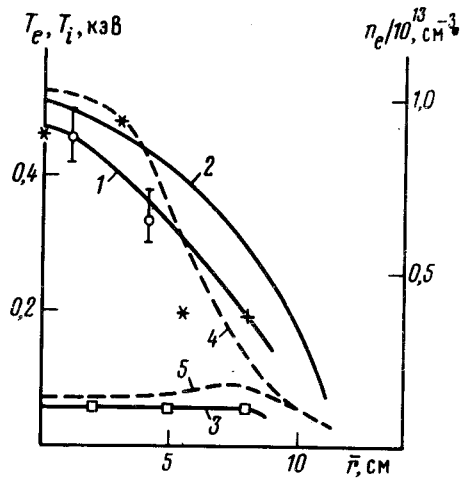


Рис. 2

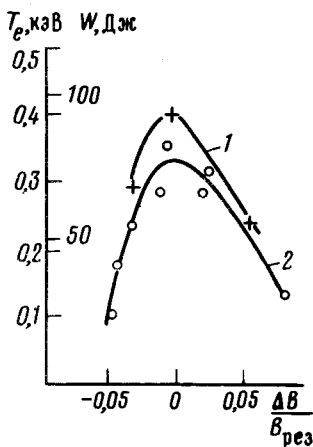


Рис. 3

Рис. 1. Зависимость параметров плазмы от времени

Рис. 2. Радиальные распределения параметров плазмы: экспериментальные — 1 — $T_e(r)$, 2 — $n_e(r)$ и 3 — $T_i(r)$ и расчетные — 4 — $T_e(r)$, 5 — $T_i(r)$; * — измеренная методом фольг по мягкому рентгеновскому излучению, \circ — по лазерному рассеянию, + — по спектроскопическим измерениям

Рис. 3. Зависимости электронной температуры в центре плазменного шнура — 1 и энергосодержания — 2 от расстройки $\Delta V / V_{рез}$

На рис. 1 приведены временные зависимости средней по лучу плотности электронов \bar{n}_e , энергосодержания плазмы $W = (3/2)\bar{n}_e(T_e + T_i)V$, (V — объем плазменного шнура), измеренного по диамагнетизму, и температуры электронов T_e в центре, измеренной методом лазерного рассеяния. Режим с высокой эффективностью поглощения СВЧ мощности и нагрева плазмы (рис. 1, б и в) реализуется при предварительной ионизации газа ($\bar{n}_{e0} \cong 0,5 \div 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$) и медленном нарастании плотности плазмы в течение всей длительности СВЧ импульса (рис. 1 а, сплошная кривая). В этом режиме электронная температура достигает максимума во второй половине СВЧ импульса, а затем несколько уменьшается.

Режим с низкой эффективностью поглощения характеризуется быстрым (за 200 — 300 мкс) нарастанием плотности (рис. 1, а — пунктирная кривая) и имеет место при недостаточно высокой концентрации электронов предварительной ионизации ($\bar{n}_{e0} < 0,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$) или же в ее отсутствии. В этом случае в течение всей длительности СВЧ импульса электронная температура не превышает 100 эВ.

Как представляется, различие в эффективности нагрева, возникающее при разных скоростях нарастания плотности (рис. 1, а — сплошная и пунктирная кривые), обусловлено зависимостью оптической толщины плазмы для необыкновенной волны от плотности и темпера-

туры. Оптическая толщина $\Gamma \sim \frac{n_{кр} T_e}{\omega_0^2 m_e / 4\pi e^2}$, где $n_{кр}$ – критическая плотность плазмы $n_{кр} = \omega_0^2 m_e / 4\pi e^2$. При $n_{кр}/n \ll 1$, оптическая толщина даже при $T_e \cong 10 \div 20$ эВ обеспечивает достаточно высокое поглощение, которое при медленном росте плотности n_e и уменьшении $n_{кр}/n$ поддерживается растущей электронной температурой. При быстром же нарастании n_e (за $200 \div 300$ мкс) оптическая толщина быстро становится малой ($n_{кр}/n \cong 1$, а $T_e \cong 10 \div 20$ эВ). Поглощаемая в этих условиях СВЧ мощность мала и температура электронов остается замороженной на уровне < 100 эВ.

Пространственные распределения $T_e(r)$, $T_i(r)$ и $n_e(r)$ показаны на рис. 2. Распределение плотности близко к параболическому, а распределение $T_i(r)$, полученное из спектра энергий нейтралов перезарядки, оказалось плоским и при $r \leq 0,8a$ не превышает 60 эВ. Распределение электронной температуры свидетельствует о том, что СВЧ энергия поглощается, в основном, в центральной зоне ($r/a \leq 0,5$).

Был выполнен численный счет энергобаланса в рамках неоклассической теории ⁵ в предположении, что поглощенная СВЧ мощность составляет 45 кВт и равномерно распределена в пределах $0 \leq r/a \leq 0,5$. Полученные результаты приведены на рис. 2. Видно, что абсолютная величина электронной и ионной температур и характер их распределения по радиусу близки к экспериментально измеренным.

Проведенные измерения зависимости параметров плазмы от величины расстройки по отношению к резонансному значению поля показали (рис. 3), что энергосодержание плазмы и центральная температура электронов $T_e(0)$ существенно зависят от условий резонанса. При расстройке $\Delta B/B_{рез} = \pm 3 \div 5\%$, $T_e(0)$ и энергосодержание уменьшаются в несколько раз.

Оценки, сделанные по скорости роста энергосодержания плазмы при включении импульса СВЧ мощности и уменьшения энергосодержания при его выключении, показали, что величина поглощаемой СВЧ мощности $P_{погл} \cong 45 \div 30$ кВт, а энергетическое время $\tau_E \cong 2 \div 3$ мс. Эта величина τ_E так же хорошо согласуется с результатами численного счета.

Проведенные на стеллараторе Л-2 первые эксперименты по созданию и нагреву бестоковой плазмы необыкновенной волной на первой гармонике гирочастоты электронов показали высокую эффективность поглощения ($\cong 35 \div 45\%$) СВЧ мощности, что позволило получить плазму с $T_e(0) \cong 500$ эВ, $T_i(0) \cong 60$ эВ при $\bar{n}_e \cong 4 \div 6 \cdot 10^{12}$ см⁻³. Полное энергосодержание плазмы составляло $80 \div 90$ Дж, а энергетическое время $\tau_E \cong 2 \div 3$ мс.

Литература

1. Аликаев В.В., Литвак А.Г., Суворов Е.В., Фрайман А.А. Сб. "Высокочастотный нагрев плазмы", с. 6, 1983, Горький.
2. Wilhelm R., Janson G., Müller G. et al. Plasma Phys. and Contr. Fusion., 1984, 26, 1A, 259.
3. Uo K., Iiyoshi A., Obiki T. et al. X Eur. Conf. on Contr. Fusion and Pl. Phys., 1981, Moscow, 1, E-1.
4. Андрюхина Э.Д., Бережецкий М.С., Гребенчиков С.Е. и др. Препринт № 154, ФИАН, 1974, Москва.
5. Kovriznich L.M. Plasma Phys. and Contr. Fusion, 1984, 26, 1A, 195.