

## ВЧ-НАГРЕВ ПЛАЗМЫ В УСЛОВИЯХ ИОН-ИОННОГО ГИБРИДНОГО РЕЗОНАНСА

В. Ф. Тарасенко, С. С. Овчинников, С. С. Калинин,  
И. И. Курилко, О. М. Швеиц, В. Т. Толок

Одной из основных задач в проблеме управляемого термоядерного синтеза является разработка методов нагрева плазмы в замкнутых магнитных ловушках. Важную роль в ее решении могут сыграть высокочастотные методы нагрева. В работе [1] была показана высокая эффективность нагрева ионов плотной плазмы в тороидальной ловушке аксиально-несимметричными ионно-циклотронными волнами при их затухании в области ослабленного магнитного поля (на "магнитном пляже").

В настоящем сообщении изложены экспериментальные результаты нагрева плазмы, состоящей из смеси ионов водорода и дейтерия, на установке "Омега" с однородным вдоль оси тороидальным магнитным полем в условиях ион-ионного гибридного резонанса.

Как известно, между границей неоднородной по радиусу плазмы и областью резонанса обычно существует область непрозрачности, в которой амплитуда волны экспоненциально уменьшается [2]. Для проникновения волн в область резонанса необходимо, чтобы размеры области непрозрачности были меньше длины возбуждаемой волны. Как показал теоретический анализ, в общем случае значения плотности плазмы, соответствующие нулям (0) и полюсам ( $\infty$ ) функции  $k_{\perp}^2(r)$ , т. е. точкам отражения и поглощения, оказываются величинами одного порядка. Следовательно, проникновение волны в центральную область плазмы, где желательно обеспечивать резонансные условия, может оказаться затрудненным из-за наличия точек отражения в области меньших, чем на оси значений плотности плазмы ( $n_0(r) < n_{\infty}$ ,  $n_0 \sim n_{\infty}$ ). Однако, при выполнении условия  $B \ll 1$  ( $B > 0$ )<sup>1)</sup> значения  $n_0$  и  $n_{\infty}$  оказываются существенно различными:

$$X_{\infty} = -\frac{2C}{B}, \quad X_0^+ = \frac{C}{\sqrt{-A}}, \quad \text{где } X(r) = \frac{\omega_{pi}^2(r)}{\omega_{ci}^2},$$

$$C \equiv 1 - \frac{k_{\parallel}^2}{k^2}, \quad B \equiv -\frac{2\Omega^2}{NZ} [N(1 - \Omega_2^2) - 2(1 - \Omega_1^2)],$$

$$A \equiv -\frac{1}{N^2 Z} [ \Omega_1(1 - \Omega_2^2) N^2 - 2\Omega_1^2(\Omega_1\Omega_2 - 1)N + \Omega_1^2(1 - \Omega_1^2) ],$$

$$Z \equiv (1 - \Omega_1^2)(1 - \Omega_2^2), \quad \Omega_{1,2} = \frac{\omega_{ci1,2}}{\omega}, \quad N = \frac{n_1}{n_2}$$

<sup>1)</sup> Условие  $B > 0$  обеспечивает прозрачность плазмы в области  $n(r) < n_{\infty}$ .

$n$  – концентрация ионов (индекс 1 относится к дейтонам, индекс 2 – к протонам). Как следует из (1) точка отражения сдвигается в область малых плотностей плазмы, где  $\chi_{\perp} \equiv \frac{1}{k_{\perp}(r)} > L_{\perp}$  ( $L_{\perp}$  – размер области непрозрачности). В этом случае возможно прохождение энергии волны от возбуждающего устройства в область распространения, где  $k_{\perp}^2 > 0$ .

Ввод ВЧ-мощности в плазму осуществлялся с помощью возбуждающих устройств, обеспечивающих в плазме длину волны  $\lambda_{\parallel} \sim 130$  см, аналогичных описанным в [1]. Возбуждающие устройства, создающие в плазме поперечное высокочастотное магнитное поле, помещались внутри вакуумной камеры. Плазма создавалась при ионизации рабочих газов осциллирующим электронным пучком. Распределение плотности плазмы по радиусу имело приблизительно колоколообразную форму. Рабочая частота генератора  $f = 4,1$  МГц.

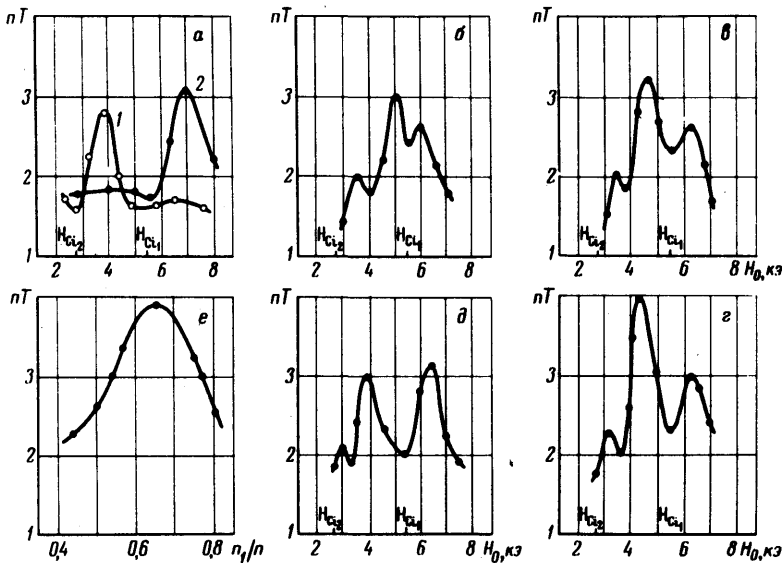


Рис. 1. Зависимости газокINETического давления плазмы  $nT$  (в относительных единицах) от напряженности внешнего магнитного поля  $H_0$ :  $a(1)$  – рабочий газ водород,  $a(2)$  – рабочий газ дейтерий,  $b-d$  – для смеси водорода и дейтерия ( $b - n_1/n = 0,53$ ;  $c - n_1/n = 0,57$ ;  $d - n_1/n = 0,65$ ;  $z - n_1/n = 0,76$ ),  $e$  – зависимость  $nT$  от относительной концентрации дейтонов. ( $H_{ci_1}, H_{ci_2}$  – циклотронные значения напряженности магнитного поля для дейтонов и протонов соответственно).

Для выяснения возможности возбуждения волн и эффекта нагрева плазмы в различных экспериментальных условиях были измерены зависимости диамагнитного сигнала ( $nT$ ) от напряженности стационарного магнитного поля  $H_0$ .

На рис. 1,  $a$  приведена зависимость  $nT = f(H_0)$  для случая, когда рабочим газом служил водород (кривая 1). Максимум диамагнитного сигнала имел место при  $H_{ci_2} < H_0 < H_{ci_1}$ . Однако, необходимо отме-

титель, что этот нагрев связан с поглощением ионно-циклотронной волны только протонами. Для сравнения на этом же рисунке приведена аналогичная зависимость для дейтонов (кривая 2).

Зависимость диамагнитного сигнала от магнитного поля  $H_0$  при работе на смеси ионов водорода и дейтерия приведена на рис. 1, б. На кривой наблюдается три максимума. Максимум в поле  $H_0 > H_{ci_2}$  соответствовал нагреву протонов, а в поле  $H_0 > H_{ci_1}$  — дейтонов ионно-циклотронными волнами. При  $H_{ci_2} < H_0 < H_{ci_1}$  нагреваются ионы дейтериево-водородной плазмы в условиях ион-ионного гибридного резонанса.

Расчеты показали, что при  $N \sim 1$  и длине волны  $\lambda_{\parallel} \sim 130$  см резонансная плотность плазмы  $n_{\infty} \approx 10^{14}$  см<sup>-3</sup> при значении плотности в точке отсечки  $n_0 \approx 5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. В экспериментах максимальное значение диамагнитного сигнала наблюдалось при плотности плазмы на оси плазменного шнура  $n \approx 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. При уменьшении плотности плазмы амплитуда диамагнитного сигнала уменьшалась.

Для определения оптимальных режимов нагрева смеси протонов и дейтонов измерялись зависимости диамагнитного сигнала от напряженности магнитного поля  $H_0$  при различных относительных концентрациях этих ионов (рис. 1, б, в, г, д). Суммарная плотность плазмы в этих экспериментах поддерживалась постоянной  $n = 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Было обнаружено перемещение максимума  $nT$ , соответствующего гибричному резонансу в область меньших напряженностей магнитного поля  $H_0$  при увеличении концентрации дейтонов.

Зависимость диамагнитного сигнала от относительной концентрации дейтонов изображена на рис. 1, е. Максимальное значение  $nT$  плазмы достигалось при относительной концентрации ионов дейтерия равной 65%.

Проведенные эксперименты позволяют сделать следующие выводы:

1. В плотной плазме, находящейся в тороидальном магнитном поле, возможно эффективное возбуждение волн в области ион-ионного гибридного резонанса.

2. Для широкого диапазона экспериментальных условий выбором длины волны, возбуждаемой в плазме, и относительных концентраций рабочих газов можно обеспечить условия проникновения волн в плотную плазму.

3. При выполнении резонансных условий вблизи оси плазменного шнура осуществлен нагрев ионов плотной трехкомпонентной плазмы по всей длине тора. Газокинетическое давление плазмы в условиях эксперимента достигало значения  $nT \approx 10^{16}$  эв · см<sup>-3</sup> при плотности плазмы  $n \approx 10^{14}$  см<sup>-3</sup>.

Авторы выражают глубокую благодарность В.И. Курилко за полезные обсуждения и ценные советы.

Поступила в редакцию  
3 июля 1972 г.

## Литература

- [ 1 ] С.С. Овчинников, С.С.Калиниченко, П.И.Курилко, О.М.Швец, В.Т.Толлок . IV Междунар. конф. по исследованиям в области физики плазмы и управляемых термоядерных реакций. Мэдисон, доклад CN-28/L8, 1972.
- [ 2 ] Г.Стикс. Теория плазменных волн, М., Атомиздат, 1965.
-