

ВЫВЕДЕНИЕ ИОНОВ ПРИМЕСИ ИЗ ПЛАЗМЫ ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ АЛЬФВЕНОВСКОЙ ВОЛНЫ

Р.А. Демирханов, А.Г. Киров, Л.Ф. Ручко, А.В. Сукачев

В экспериментах на стеллараторе Р-0 обнаружено, что при альфвеновском нагреве можно эффективно воздействовать на радиальный перенос примесей. Концентрация ионов примесей уменьшается при совпадении частоты ВЧ поля с их циклотронной частотой.

Эксперименты, проведенные на стеллараторе Р-0 ранее, показали, что с помощью ВЧ полей мегагерцового диапазона частот можно осуществить эффективный нагрев плазмы ¹ и одновременно возбуждать стационарные токи увеличения и управлять радиальным переносом плазмы ². В этих экспериментах в окрестности резонансной поверхности $\omega = k_{||}(r)v_A(r)$ возбуждалась альфвеновская волна ³, которая, затухая на электронах, отдавала им свою энергию и импульс. Однако, возможен также циклотронный механизм затухания альфвеновской волны на частично ионизованных ионах примеси при $\omega = \omega_{BI} \ll \omega_{Bi}$ (ω_{BI}, ω_{Bi} – циклотронные частоты ионов примеси и основного газа соответственно). При этом альфвеновская волна отдает энергию и импульс ионам примеси, что позволяет влиять на их радиальный перенос. Теоретически перенос примесей при введении сторонних источников частиц, импульса и энергии рассмотрен в работах ^{4,5} и в настоящее время уже проведены первые эксперименты по исследованию поведения примесей при ионно-циклотронном нагреве ⁶ и при инжекции газа ⁷.

В данной работе приведены результаты исследования поведения примесей при альфвеновском нагреве плазмы в стеллараторе Р-0 (частично они были изложены в ⁸), имеющем следующие основные параметры: $R = 50$ см, $a = 5$ см – большой и малый радиусы кварцевой разрядной камеры, $B_0 \leq 8$ кГс, $\epsilon \leq 0,8$. ВЧ контур, состоящий из восьми винтовых проводников, охватывающих всю поверхность тора, возбуждал ВЧ поле $m = 2, n = 2$ (m и n – полоидальное и тороидальное волновые числа) с частотой $f = 1,45$ МГц и длительностью импульса $\tau = 5$ мс. Изменяя фазировку ВЧ генератора, можно было возбуждать волну, распространяющуюся в направлении тороидального магнитного поля и одновременно навстречу полоидальному магнитному полю, „(+)-волна”, в обратном направлении, „(-)-волна”, или стоячую волну, „(±)-волна”.

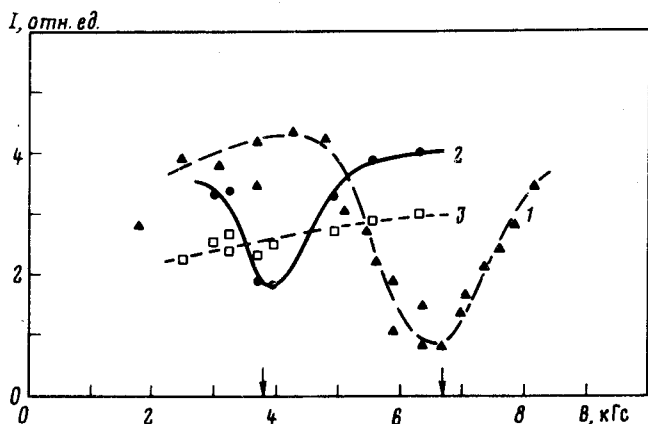


Рис.1. Интенсивность свечения линий ионов примесей из центра плазменного шнура в зависимости от магнитного поля: 1 – N II 4514 Å, $n_N/n_D \approx 4,5\%$, $D_2 + N_2$, $p = 7,7 \cdot 10^{-4}$ тор, $x = 0,2$, бегущая ВЧ волна (-); 2 – He II 4686 Å, 3 – He II 4392 Å, $n_{He}/n_D \approx 1,5\%$, $n_{Ne}/n_D \approx 1\%$, $D_2 + He + Ne$, $p = 8,1 \cdot 10^{-4}$ тор, $\epsilon = 0,2$, стоячая ВЧ волна (+). Стрелками указаны резонансные значения магнитного поля для ионов He^{+1} и N^{+2}

Эксперименты проводились без омического нагрева. Плотность плазмы измерялась микроволновым интерферометром с $\lambda = 2$ мм, энергосодержание плазмы – диамагнитным датчиком. Для измерения электронной температуры $\langle T_{e\sigma} \rangle$ в плазме возбуждался небольшой

тороидальный ток, не изменяющий параметров разряда ($P_{\text{ом}} \ll P_{\text{вч}}$, $z_{\text{эф}} \approx 2$). Примесь имитировалась напуском одновременно с рабочим газом (H_2 или D_2) добавки N_2 , He или Ne ($n_I/n_i \leq 5\%$). При $T_e = 10 \div 30$ эВ, $n_e = (2 \div 10) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ интенсивность свечения линий He II ($\lambda = 4686 \text{ \AA}$), N III ($\lambda = 4514 \text{ \AA}$) в стеллараторе Р-0 в основном определяется временем жизни ионов. Поэтому эта область параметров выбрана для исследования влияния ВЧ поля на перенос ионов примеси.

Эксперименты показали, что при изменении магнитного поля интенсивность свечения линий ионов добавки He II и N III и, следовательно, их концентрация значительно падает, когда для них выполняется условие циклотронного резонанса $\omega = \omega_{BI}$ (рис.1). При этом свечение линий ионов He II (рис.1), а также O II , Si II , Si III , не находящихся в резонансе с ВЧ полем, не имело особенностей. При изменении направления распространения ВЧ волны эффект уменьшения концентрации примеси в плазме сохранялся.

Увеличение радиального переноса примеси не оказывало существенного влияния на удержание основной компоненты плазмы. Это видно из приведенных на рис.2 зависимости плотности плазмы (кривая 3) и температуры (кривая 4) от магнитного поля. На этом же рисунке показано, как ведет себя относительная концентрация ионов He^{+1} , рассчитанная на основании измеренных $\langle T_e \rangle$ и $\langle n_e \rangle$.

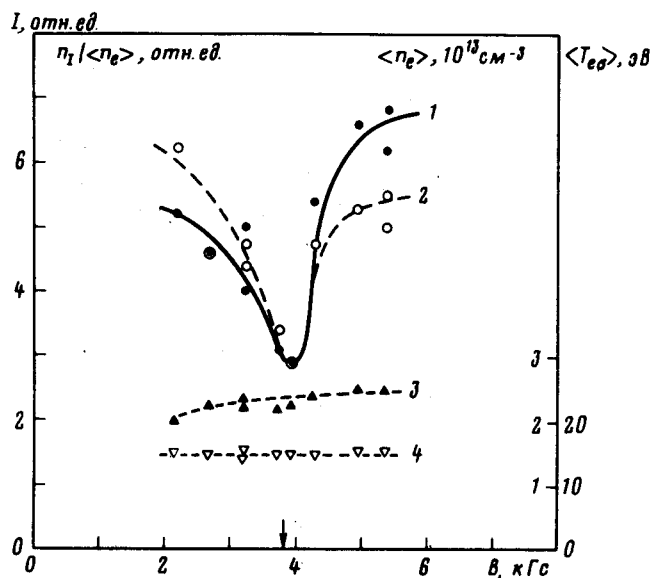


Рис.2. 1 – Интенсивность свечения линии He II 4686 \AA из центра плазменного шнура, 2 – относительная концентрация He^{+1} , 3 – плотность плазмы, 4 – электронная температура. $n_{\text{He}}/n_{\text{H}} \approx 4\%$, $\text{H}_2 + \text{He}$, $p = 6,8 \cdot 10^{-4}$ тор, $\pm = 0,2$, бегущая ВЧ волна (-). Стрелкой указано резонансное значение магнитного поля для ионов He^{+1}

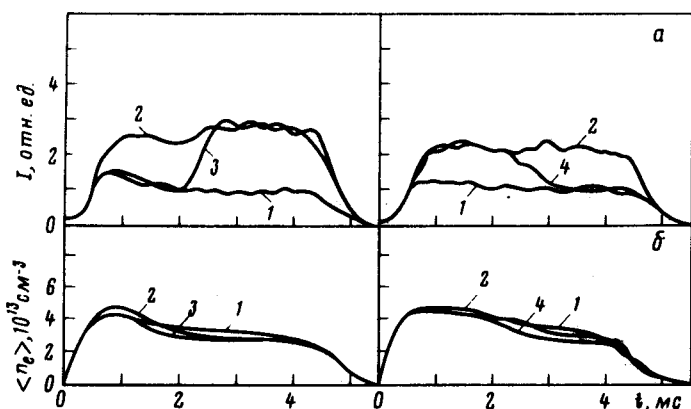


Рис.3. Интенсивность свечения линии He II 4686 \AA из центра плазменного шнура (а) и плотность плазмы (б) при постоянных (1, 2) и изменяющихся во времени (3, 4) магнитных полях: 1 – $B = 4 \text{ кГс} \approx B_{\text{рез}}$; 2 – $B = 5 \text{ кГс}$; 3 – магнитное поле увеличивается в течение разряда от $B = 3,5 \text{ кГс}$ до $B = 5 \text{ кГс}$; 4 – магнитное поле уменьшается от $B = 5 \text{ кГс}$ до $B = 3,2 \text{ кГс}$. $n_{\text{He}}/n_{\text{H}} \approx 3,8\%$, $\text{H}_2 + \text{He}$, $p = 7,2 \cdot 10^{-4}$ тор, $\pm = 0,4$, стоячая ВЧ волна (\pm)

На рис.3 показана динамика поведения интенсивности свечения линии He II при изменении магнитного поля во времени. Осциллограммы 1 и 2 получены, когда магнитное поле не изменяется на протяжении всего импульса ВЧ поля. Осциллограмма 1 соответствует циклотронному резонансу $\omega = \omega_{Bi}$ ($B \approx 4$ кГс), при этом свечение линии He II значительно слабее, чем при $B = 5$ кГс (осциллограмма 2). Когда ВЧ импульс сдвинут на передний фронт импульса магнитного поля, имеющего форму полупериода синусоиды, то в начале разряда, когда поле близко к резонансному значению, интенсивность свечения мала и возрастает при увеличении магнитного поля (осциллограмма 3). При уменьшении магнитного поля в течение разряда (ВЧ импульс на заднем фронте импульса магнитного поля) интенсивность свечения вначале велика, а затем падает, когда поле приближается к резонансному значению (осциллограмма 4).

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что с помощью ВЧ полей, возбуждающих в плазме альфвеновские волны, можно одновременно осуществлять эффективный нагрев плазмы и в то же время уменьшать равновесную концентрацию примеси, для которой выполнено условие циклотронного резонанса $\omega = \omega_{Bi}$.

В заключение выражаем благодарность Л.Я.Малых за помощь в проведении экспериментов.

Литература

1. Kirov A.G., Ruchko L.F., Sukachov A.V. et al. 9-th Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys., Oxford, 1980, 1, 18.
2. Демирханов Р.А., Киров А.Г., Ручко Л.Ф., Сукачев А.В. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 31.
3. Kirov A.G., Ruchko L.F., Sukachov A.V. 2-nd Int. Symp. on Heating in Toroidal Plasmas. Como, 1980, 2, 689.
4. Wong S.K. Phys. Fluids, 1978, 21, 299.
5. Parks P.B., Burrell K.H., Wong S.K. Nucl. Fusion, 1980, 20, 27.
6. TFR Group. Preprint EUR-CEA-FC-1131, 1981.
7. Burrell K.H., Wong S.K., Amano T. Nucl. Fusion, 1980, 20, 1021.
8. Demirkhanov R.A. et al. 9-th Int. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion Res., IAEA-CN-41/J-I-2, Baltimore, 1982.

Поступила в редакцию

2 марта 1983 г.