

- [3] S u g a i S. // Phys. rev. 1987. V. 146. N 13.
[4] P r o v e n c h e r R. et all. // Phys. stat. sol. (a). 1987. V. 103. N 107.
[5] E a t c o u g h M.O. et all. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 5.
[6] K a z u t a M., T a n a k a K., N a k a d a I. // Preprint 106. Inst. Sol. State. Phys. 1987. Japan.

Поступило в Редакцию
22 декабря 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 7 12 апреля 1989 г.
04:09

О РОЛИ ТЯЖЕЛЫХ ПРИМЕСЕЙ ПРИ ИОННОМ ЦИКЛОТРОННОМ НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ

М.А. И р з а к, И.П. П а в л о в,
О.Н. Щ е р б и н и н

Эксперименты по ионному циклотронному нагреву плазмы ведутся в настоящее время во многих токамаках и считаются весьма важными в общей схеме получения управляемой термоядерной реакции. Как правило, сценарий этих экспериментов основан на использовании малой добавки легкой примеси (чаще водорода) в дейтериевой плазме. При этом различаются два варианта постановки экспериментов: первый, когда количество легкой примеси не превосходит нескольких процентов, приводит к нагреву основных компонент плазмы через энергичные примесные ионы, и второй — с количеством легких примесных ионов 10–30%, когда осуществляется режим трансформации БМЗ волны в бернштейновскую, которая затем затухает на электро-нах плазмы.

Лонгинов и Степанов [1, 2] предложили усложнить эту схему нагрева. Они показали, что присутствие в плазме небольшого количества более тяжелых ионов с $m/Z \geq 2$ должно приводить к сильному затуханию бернштейновской волны на этих ионах и как следствие к эффективному нагреву основной ионной компоненты плазмы. Для этого зона второй циклотронной гармоник третьего сорта ионов должна находиться при таких магнитных полях, когда трансформация исходной БМЗ волны в бернштейновскую уже произошла.

На установках ТЕР [3] и Т-10 [4] были проведены специальные эксперименты по ИЦР нагреву в плазме, куда дозированно добавлялась примесь ионов либо ванадия [3], либо неона [4]. Была обнаружена повышенная скорость роста ионной температуры, хотя предельные температуры остались на прежнем уровне.

В токамаке „Туман-3” ведутся эксперименты по ИЦР нагреву плазмы с умеренными температурами электронов (масштаба 400–

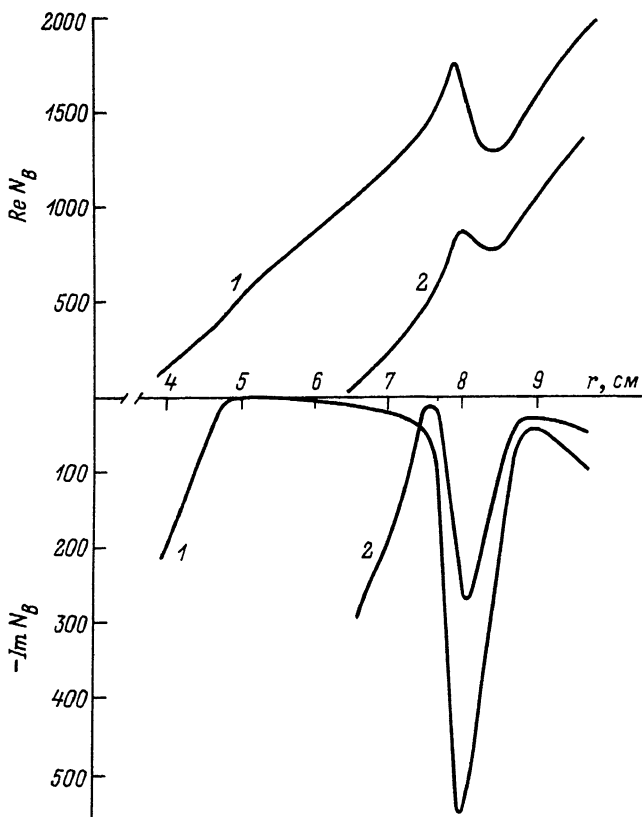


Рис. 1. Дисперсионные кривые для бернштейнских волн в условиях эксперимента на токамаке „Туман-3“. Состав плазмы: 1 - 10% H^{+} + 1% N^{+6} + 84% D^{+} , 2 - 20% H^{+} + 1% N^{+6} + 74% D^{+} ; $N_{II} = 50$.

Т а б л и ц а 1

	O^{+7}	N^{+6}	O^{+6}	N^{+5}	O^{+5}	N^{+4}
m	16	14	16	14	16	14
Z	7	6	6	5	5	4
$\nu_{рез}$ (кГц)	5.94	6.08	6.92	7.29	8.3	9.11
$r_{рез}$ (см)	6.7	8.0	13.6	15.7	20.5	23.5

500 эВ). В этих условиях остаточные примеси газов атмосферного воздуха - азота, кислорода, углерода - являются не полностью ионизованными. Правда, применяемая на установке процедура очистки камеры позволяет эффективно избавиться от углерода, но содержа-

Т а б л и ц а 2

	10% Н	20% Н	30% Н	40% Н
$\nu_{гр}$ (кГц)	5.6	5.9	6.3	6.8
$r_{гр}$ (см)	4.5	7.0	9.5	13.0

ние ионов азота и кислорода составляет около 1%. В таблице 1 приводятся расчетные положения областей, где выполняются условия второй циклотронной гармоникой для ионов азота и кислорода разной степени ионизации. При этом значение магнитного поля на оси камеры было выбрано равным 5.2 кГц, чтобы выполнить там условия циклотронного резонанса для водорода на рабочей частоте генератора 8 МГц.

Все указанные резонансные области расположены во внутренней части камеры со стороны сильного магнитного поля.

Положение зоны трансформации возбуждаемых БМЗ волн зависит от относительной концентрации водорода в дейтериевой плазме. Оно сдвигается в сторону более сильных полей с ростом доли водорода. В таблице 2 приведены примеры для поля на оси 5.2 кГц.

Видно, что по мере роста концентрации водорода зона трансформации приближается к области второй циклотронной гармоникой примесного иона и затем проходит за нее в область более сильного магнитного поля. При этом данный примесный ион перестает играть какую-либо роль в процессе поглощения волн.

Для оценки эффективности поглощения бернштейновских волн нами были проведены расчеты их дисперсионных кривых для условий эксперимента. При этом использовался полный тензор диэлектрической постоянной горячей плазмы (см., например, [5], стр. 99). Решение дисперсионного уравнения для многокомпонентной плазмы производилось численно в геометрии установки „Туман-3” при $\nu_0 = 5.2$ кГц, $n_0 = 3 \cdot 10^{13}$ см⁻³, $T_{e0} = 450$ эВ, $T_{i0} = 150$ эВ. Как известно, при вычислении компонент тензора производится двойное суммирование по сортам частиц плазмы и по гармоникам циклотронных частиц, причем каждое слагаемое содержит множители типа $e^{-2\alpha} I_n(Z_\alpha)$, где I_n — модифицированная функция Бесселя, $Z_\alpha = \frac{1}{2}(k_1 \rho_{b\alpha})^2$. При решении дисперсионного уравнения предел суммирования по n определялся из соотношения $I_n(Z_\alpha)/I_0(Z_\alpha) \leq 10^{-8}$, что позволило тщательно проследить ход дисперсионных кривых вблизи гармоник и при больших значениях параметра Z_α . Отыскание корней трансцендентного уравнения на комплексной плоскости осуществлялось с помощью итерационного метода Мюллера.

На рис. 1 приведены дисперсионные кривые для двух композиций состава плазмы: 1 — 10% Н⁺ + 1% N⁺⁶ + 84% D, 2 — 20% Н⁺ + 1% N⁺⁶ + 74% D⁺ при $N_H = 50$. Относительные концентрации

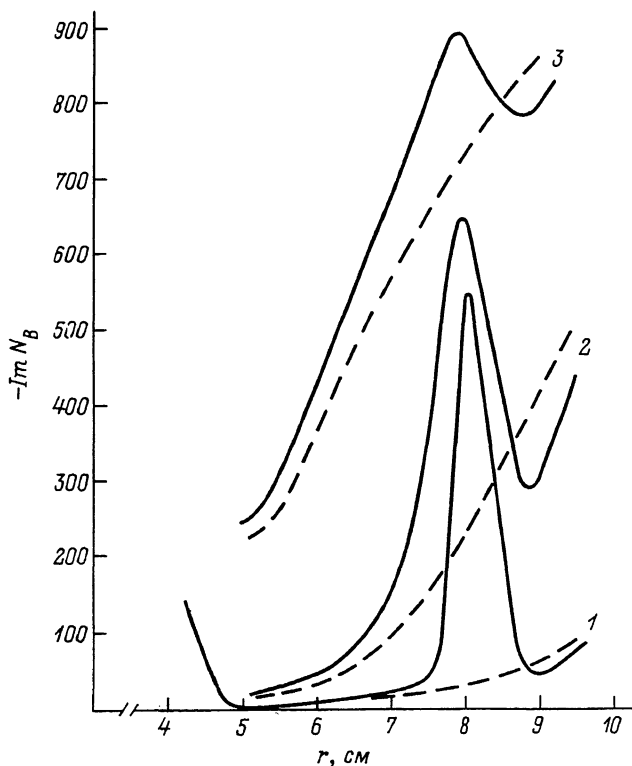


Рис. 2. Ход мнимой части коэффициента преломления бернштейн-овских волн для плазмы состава $10\%N^+ + 1\%N^{+6} + 84\%D^+$ (сплошная линия) и $10\%N^+ + 90\%D^+$ (пунктир). 1 - $N_{II} = 50$, 2 - 70, 3 - 100.

ионов вычислялись по отношению к электронной концентрации. Обе кривые демонстрируют резкое усиление поглощения при $r \approx 8$ см, связанное с наличием ионов N^{+6} . Причем для случая 2 (20% водорода) зона поглощения лежит непосредственно за зоной трансформации БМЗ волны в бернштейнскую, а для случая 1 (10% водорода) трансформация происходит значительно раньше, и бернштейнская волна, прежде чем она достигнет зоны поглощения на ионах азота, может отдать заметную долю своей энергии электронам плазмы. Эффективность этого процесса определяется температурой электронов и продольным замедлением волны. На рис. 2 приводятся мнимые части коэффициента преломления бернштейнских волн для 1 варианта композиции плазмы при $N_{II} = 50, 70$ и 100 (кривые 1, 2 и 3 соответственно). Пунктиром показан ход мнимой части N_B при отсутствии примеси азота. Видно, что при сильных замедлениях поглощение на электронах становится определяющим.

Проведенные расчеты позволяют лучше понять результаты экспериментов по ИЦР нагреву на установке „Туман-3” [6, 7]. В этих экспериментах наблюдался устойчивый нагрев ионной компоненты вплоть до весьма больших концентраций добавки водорода (50–60%), что трудно объяснить с точки зрения затухания волн в чистой водородно-дейтериевой плазме. Что касается нагрева электронов, то он наблюдался далеко не регулярно. По-видимому, для деталей процесса нагрева плазмы важна конкуренция между ионами и электронами в поглощении волн, которая в свою очередь определяется тонким соотношением концентраций различных компонент плазмы и спектром возбуждаемых волн.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Longinov A.V., Stepanov K.N. // Proc. of the 4th Int. Symp., Roma. 1984. V. 1. P. 489.
- [2] Longinov A.V., Pavlov S.S., Stepanov K.N. // Proc. of the 12th Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics. Budapest. 1985. V. 9F. Part II. P. 156.
- [3] TFR Group. Nud. Fusion. 1986. v. 26. N 7. P. 873.
- [4] Alikaeiev V.V., Beresovskij E.L. et al. Proc. of the 12th Europ. conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics. Budapest. 1985. V. 9F. Part II. P. 156.
- [5] Гинзбург В.Л., Рухадзе А.А. Волны в магнитоактивной плазме. М.: Наука. 1970.
- [6] Аскинази Л.Г., Голант В.Е. и др. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 5. С. 315.
- [7] Askinasi L.G., Golant V.E. et al. Proc. of the 12th Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics. Budapest. 1985. V. 9F. Part II. P. 363.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
21 января 1989 г.