

ЦИКЛОТРОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ БЫСТРЫХ МАГНИТОЗВУКОВЫХ ВОЛН В ТОКАМАКЕ ТМ-1-ВЧ ПРИ НАЛИЧИИ МАЛОЙ ГРУППЫ РЕЗОНАНСНЫХ ИОНОВ

В.Л.Вдовин, В.Д.Русанов, Н.В.Шапожковский

В токамаке ТМ-1-ВЧ на второй гармонике ионноциклотронной частоты $\omega = 2\omega_{iB}$ в дейтерии обнаружено сильное поглощение быстрых магнитозвуковых волн. Поглощение связано с малой добавкой водорода ($\sim 1\%$), для которого $\omega = \omega_{Bi}$. Протоны эффективно набирают энергию от левополяризованной компоненты электрического поля БМЗ волны и у функции распределения образуется энергичный "хвост" протонов, что может найти существенное применение в двухкомпонентном токамаке.

В последнее время теоретически широко обсуждаются возможности поглощения БМЗ волн на циклотронном резонансе $\omega = \omega'_{Bi}$ ионами малой концентрации ($\sim 1\%$), специально введенными в плазму [1 - 4]. Поглощение даже в неоднородном магнитном поле токамака весьма велико и характеризуется добротностью [4] минимальной при $\sim 1\%$ -й

$$Q_{min} = 3 \frac{\omega_{Bi}^H}{k_{||}} \left(\frac{\pi m_H}{2k T_H} \right)^{1/2} \frac{a}{R} \quad (1)$$

добавке протонов (индекс H) [2] в дейтериевую плазму. Другим существенным предсказанием квази-линейной теории [4] является образование мощного хвоста резонансных протонов, что может явиться серьезной альтернативой нейтральной инжекции в двухкомпонентном реакторе-токамаке [4].

В настоящей работе в дейтериевой плазме токамака ТМ-1-ВЧ экспериментально изучены дисперсия и затухание БМЗ волн, обусловленное циклотронным поглощением этой волны малой группой протонов добавки, и изменение функции распределения протонов при нагреве. Изучено также поглощение при введении значительной доли примеси.

Эксперимент. Для возбуждения волн использовалась замедляющая структура, состоящая из двух вытянутых вдоль плазменного шнура петель, заключенных в кварцевую изоляцию [5]. С помощью 12 ВЧ магнитных зондов мы имели возможность идентифицировать возбуждаемые моды и измерять их затухание вдоль плазменного шнура. При увеличении плотности плазменный волновод открывается (рис. 1, а, б) для моды с $|m| = 1$, затем возбуждаются волны с $m = 0$, в соответствии с теорией [7]. Изучение осевого затухания МЗ волн показало, что они много раз обегают вокруг тора, так что образуются стоячие волны. Эти собственные тороидальные моды наблюдаются и при измерении сопротивления нагрузки, соответствуя большим пикам на нагрузочной кривой (рис. 1, а, б). При движении резонансной поверхности $\omega = 2\omega_{Bi}(R)$ к центру ка-

меры в водороде наблюдается некоторое уменьшение добротности мод (рис. 1, *a*). Существенно ярче это проявляется в дейтерии: амплитуда раскачки переменного магнитного поля уменьшается, ширина пиков увеличивается (рис. 1, *б*), а вносимое сопротивление R уменьшается (рис. 1, *в*).

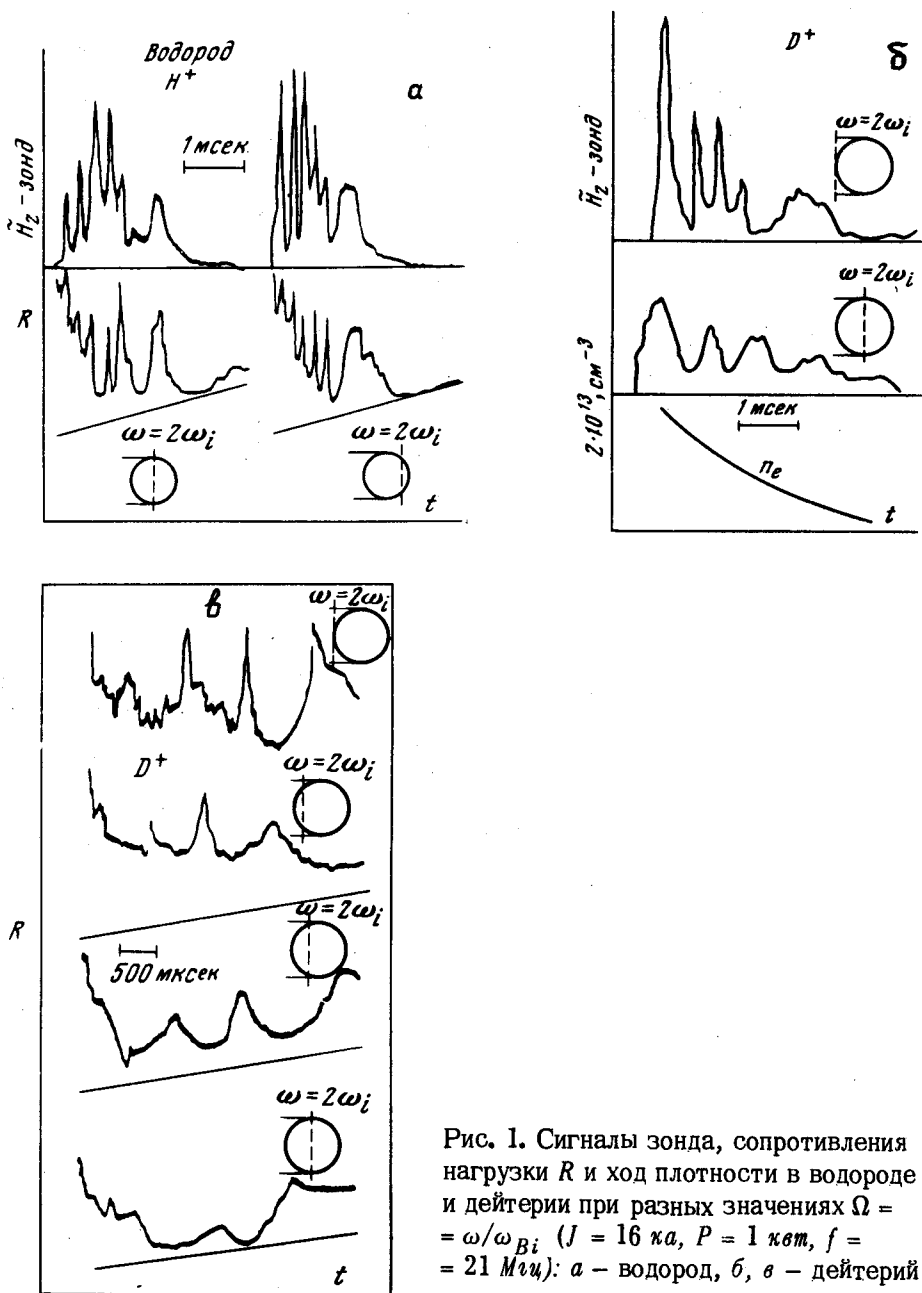


Рис. 1. Сигналы зонда, сопротивления нагрузки R и ход плотности в водороде и дейтерии при разных значениях $\Omega = \omega/\omega_{Bi}$ ($J = 16$ кА, $P = 1$ кВт, $f = 21$ МГц): *a* – водород, *б*, *в* – дейтерий

Это обстоятельство связано с примерно 1%-й добавкой водорода всегда присутствующего в камере токамака (измерения интенсивности линий H_{β} и D_{β} и данные детектора нейтралов перезарядки). Из рис. 1, *б* (дейтерий) видно, что амплитуда раскачки у более коротковолновых по

оси тора мод уменьшилась сильнее (левые пики), в соответствии с формулой (1).

Регулируемое увеличение количества водорода существенно влияет на затухание волн (рис. 2). При 50%-ом содержании водорода резонанса раскочки, как видим, нет: поглощение происходит на ионно-циклотронной волне, которая при таких плотностях уже может распространяться. На первый взгляд странное большое поглощение МЗ волн при 10%-й добавке водорода (при такой плотности протонов должна уменьшиться левополяризованная компонента электрического поля волны) может быть объяснено появлением в сечении плазменного шнура поверхности ионно-гибридного резонанса [2, 6].

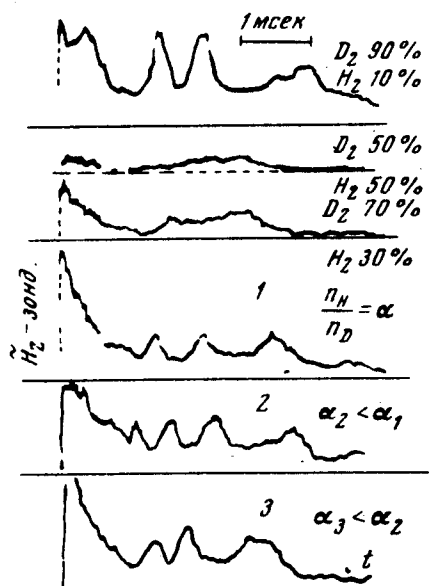


Рис. 2. Сигналы зонда в смеси дейтерия и водорода ($\omega = 2\omega_{Bi}^D$). Три нижние осциллограммы показывают роль уменьшения остаточного водорода в трех последовательных импульсах

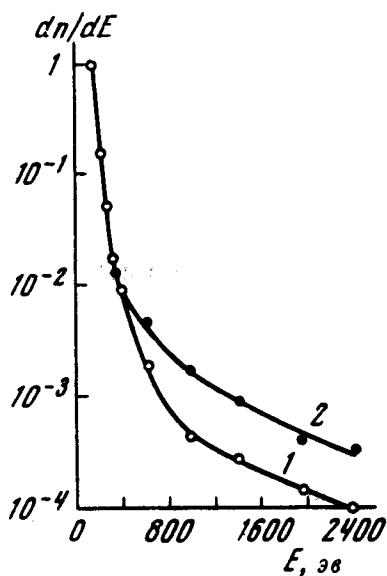


Рис. 3. Образование энергичного хвоста резонансных протонов ($\approx 1\%$) в дейтериевой плазме ($\omega = 2\omega_{Bi}^D$) при двух значениях параметра ξ , [4]

Особый интерес представляет спектр протонов малой добавки ($\sim 1\%$) в дейтериевом разряде ($\omega = 2\omega_{Bi}^D$). Начиная с вводимой мощности в несколько киловатт образуется энергичный хвост функции распределения протонов (рис. 3, $\xi_1 \approx 10$). Величина ξ в теории Стикса [4] дается формулой

$$\xi = \frac{M \langle P \rangle}{8\pi^{1/2} n_e n Z^2 e^4 \ln \Lambda} \left(\frac{2kT_e}{m_e} \right)^{1/2} \quad (2)$$

и прямо пропорциональна $\langle P \rangle$, мощности ВЧ нагрева в единице объема, передаваемой примесным ионам (M, n, Z). Распределение дейтронов при этом остается почти неизменным, в соответствии с теорией [4]. С увеличением вводимой мощности (рис. 3, $\xi_2 \approx 40$) увеличивается доля энергичных частиц хвоста. При вводимой мощности ~ 100 кВт энергичный хвост образуется и у дейтронов (но более слабый). Время жизни этих (запертых) энергичных протонов порядка периода колебания по банановой траектории, и значительная мощность может теряться за счет потерь на этих неустойчивых орбитах, определяя наблюдаемую эффективность нагрева [7]. В больших токамаках типа Т-10, PLT и др. разрядные токи более чем в 40 раз превысят токи в ТМ-1-ВЧ и удержание энергичных ионов существенно улучшится.

Авторы признательны К.Н.Степанову и А.В.Лонгинову за плодотворное обсуждение и благодарят А.В.Чеснокова и Н.Т.Собко за помощь в работе.

Поступила в редакцию
9 августа 1976 г.

Литература

- [1] А.В.Лонгинов. Авт. свид. №342560 (приоритет от 21.01.71) ОИПТЗ №5, 1975.
- [2] Р.Клима, А.В.Лонгинов, К.Н.Степанов. ЖТФ, 46, 704, 1976.
- [3] J.Adam, A.Samain. Fontenay-aux-Roses, Report EUR-CEA-FC-579, 1971, р. 29
- [4] Т.Н.Стикс. Nucl. Fusion, 15, 737, 1975.
- [5] В.Л.Вдовин, В.Д.Русанов, Н.В.Шапотковский. Конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, ИАЕА, Токио, 1974, стр. 217.
- [6] R.Klima, A.V.Longinov, K.N.Stepanov. Nucl. Fusion, 15, 1157, 1975.
- [7] В.Л.Вдовин, В.Д.Русанов, Н.В.Шапотковский. Доклад на советско-французском семинаре по высокочастотным методам нагрева, Гренобль, 1975.