

ВОЗБУЖДЕНИЕ ИОННЫХ ЦИКЛОТРОННЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ В ТОРОИДАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

С.С. Овчинников, С.С. Калиниченко, О.М. Шевц, В.Т. Толок

Эффективность ионно-циклотронного нагрева плазмы экспериментально показана в работах [1–4]. Однако возбуждение волн в этих экспериментах производилось в магнитных ловушках пробочной конфигурации в установках с прямой геометрией [1,2], либо на прямолинейном участке замкнутых магнитных ловушек [3,4]. В работе [4] было отмечено, что из-за наличия "магнитного берега" в течение импульса нагрева происходит потеря плотности плазмы под возбуждающим контуром, в результате чего нарушаются условия резонанса связи контура с плазмой и эффективность нагрева резко падает. При попытке обеспечить постепенную термализацию энергии волны вдоль всей оси стелларатора, было обнаружено, что возбуждаемая пространственно-периодическим контуром волна не распространяется по криволинейным участкам. Кроме того, наличие прямолинейного участка искажает геометрию магнитного поля ловушки, а керамическая секция удаляет контур от плазмы, уменьшая их взаимосвязь.

В настоящей работе излагаются результаты исследования возбуждения волн в плазме, находящейся в тороидальном магнитном поле (без прямолинейного участка) при помощи возбуждающих устройств (ВУ) введенных внутрь камеры и расположенных вблизи границы плазмы. Решение этой задачи позволяет приступить к изучению высокочастотных методов нагрева плотной плазмы в системе с тороидальным полем, в частности стохастическим, внешними нерегулярными полями.

Эксперименты производились на установке Омега (рис.1,а). Тороидальная медная вакуумная камера ($D = 800$ мм, $d = 200$ мм) помещена в стационарное магнитное поле, напряженность которого плавно регулируется от 0 до 10 кэ. Для ограничения диаметра разряда и уменьшения бомбардировки стенок камеры частицами плазмы, установлены медные диафрагмы с внутренним диаметром 90 мм. Плазма плотностью

$10^{12} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$ создавалась электронным пучком. Параметры плазмы при изменении магнитного поля в пределах $2 \div 10 \text{ кэ}$ практически не изменялись. Напряженность магнитного поля волны в плазме измерялась маловитковыми зондами диаметром 3 мм , которые вводились в камеру в кварцевых трубках. В нижней части рис.1 показаны некоторые из исследованных ВУ, обеспечивающих возбуждение в плазме аксиально-симметричных (рис.1,б,в) и аксиально-несимметричных (рис.1,г,д) компонент высокочастотного поля.

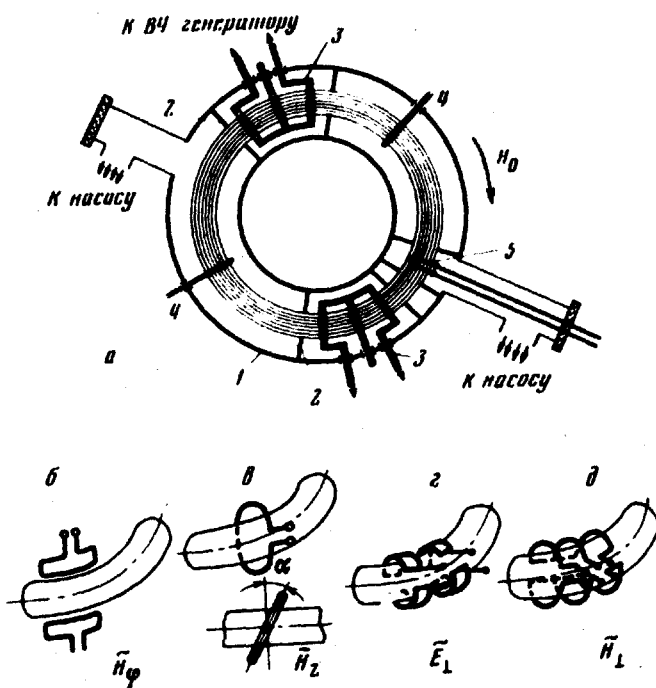


Рис. 1. а - схема установки: 1 - вакуумная камера, 2 - диафрагма, 3 - возбуждающий элемент, 4 - высокочастотный магнитный зонд, 5 - катод электронной пушки, б, в, г, д - возбуждающие элементы

При воздействии на плазму полями симметричных по азимуту ВУ полей волны в плазме обнаружить не удалось. Однако при наклоне плоскости витка ВУ (рис.1, в) по отношению к оси плазмы на угол α наблюдалось возбуждение ионно-циклотронных и быстрых магнитозвуковых волн. На рис.2, а показаны зависимости амплитуды \tilde{H} в плазме от напряженности внешнего магнитного поля H_0 для разных углов α , на рис.2, б для различных плотностей плазмы. Видно, что с увеличением угла и плотности напряженность поля волны растет.

Исследования структуры поля двумя зондами, перемещаемыми по радиусу камеры во взаимно-перпендикулярных направлениях, показали что в возбуждаемой волне \tilde{H}_z компонент мал по сравнению с \tilde{H}_1 . Наличие максимума поля \tilde{H}_1 в центре камеры соответствует, согласно теории, аксиально-несимметричной волне с одной вариацией по

азимуту. Было обнаружено, что направление поля \tilde{H}_1 образует с осью тора угол около 45° . Изучение картины поля волны позволило выбрать конструкцию ВУ (рис.1,д), создающего поперечное (\tilde{H}_1) высокочастотное поле в плазме под углом 45° к оси тора. Это обеспечило хорошую связь с плазмой и дало возможность увеличить эффективность возбуждения волн. Внешним переключением ВУ (рис.1,д) можно было обеспечивать структуру вакуумного поля с $\lambda = 20$ см (две половолны) и $\lambda = 40$ см (одна половолна), и изменением плотности плазмы обеспечивать длину волны в плазме равной длине волны ВУ, т.е. обеспечивать резонанс связи, что наглядно иллюстрируется рис.2,в и 2,г. Рис.2,б показывает, что такое ВУ эффективно возбуждает не только моно-циклотронные волны (в полях $H_0 > H_{ic}$), но и быстрые магнитозвуковые ($H_0 < H_{ic}$).

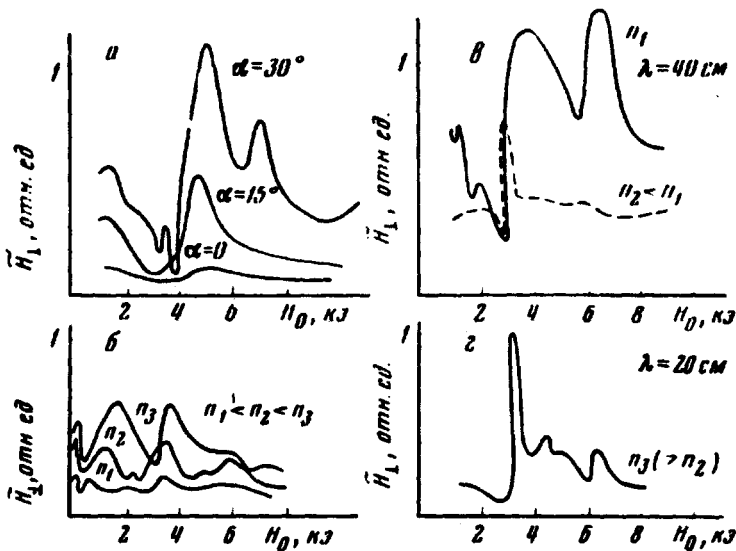


Рис. 2. Зависимость амплитуды поля (H_1) волны в плазме от напряженности внешнего магнитного поля (H_0): а – запитка витком (рис. 1, б), частота 4,8 мГц; б, в, г – запитка ВУ рис. 1, г, $f = 4,2$ мГц

Описанные эксперименты проводились при малых уровнях вводимой в плазму мощности (в 4 ток в ВУ – около 300 а). Дальнейшие исследования будут направлены на увеличение уровня вводимой мощности в волну с последующей хаотизацией энергии частиц в волне.

Таким образом, эксперименты показали, возможность эффективно-го возбуждения аксиально-несимметричных ионно-циклотронных и быстрых магнитозвуковых волн в плазме тороидальной геометрии, необходимого для осуществления высокочастотного нагрева плотной плазмы в замкнутых магнитных ловушках.

Авторы благодарны Б.И.Курилко за полезные дискуссии.

Поступила в редакцию
24 июля 1970 г.

Литература

- [1] О.М.Швец, В.Ф.Тарасенко, С.С.Овчинников, Л.В.Бржечко, О.С.Павличенко, В.Т.Толок. ЖТФ, 36, 443, 1966.
 - [2] Н.И.Назаров, А.И.Ермаков, В.Т.Толок. ЖТФ, 36, 612, 1966.
 - [3] T.H.Stix, P.W.Palladino. Phys. Fluids, 1, 446, 1958.
 - [4] M.A. Rothman, P.M.Sinclair, I.G.Brown, I.C.Hosea. Phys. Fluids, 12, 2211, 1969.
-