

## **ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ НАГРЕВ ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ**

*П. Я. Бурченко, Е. Д. Волков, Е. Д. Крамской,  
А. В. Лонгинов, Г. А. Мирошниченко, Г. Я. Нижник*

Разработка методов ввода энергии в плазму для ее нагрева в замкнутых магнитных ловушках составляет в настоящее время одну из серьезных задач в проблеме управляемой термоядерной реакции (УТР). Одним из возможных способов решения этой задачи является применение высокочастотного нагрева. Попытки его использования в замкнутых магнитных системах встречают ряд трудностей, связанных с техникой ввода больших мощностей и возбуждения волн в плотной плазме, находящейся в металлической камере в сильном магнитном поле [1–3].

В настоящем сообщении изложены предварительные результаты экспериментов по высокочастотному нагреву плазмы в замкнутой магнитной ловушке – стеллараторе "Сириус" [4]. Основная цель работы состояла в выяснении возможности ввода высокочастотной энергии в плазму при помощи возбуждающей системы, создающей на периферии плазменного шнура пространственно периодическое продольное электрическое поле. В качестве такой возбуждающей системы использова-

лась металлическая вакуумная камера стелларатора, к диэлектрическому разъему которой подключался через систему фидеров высокочастотный генератор (рис. 1).

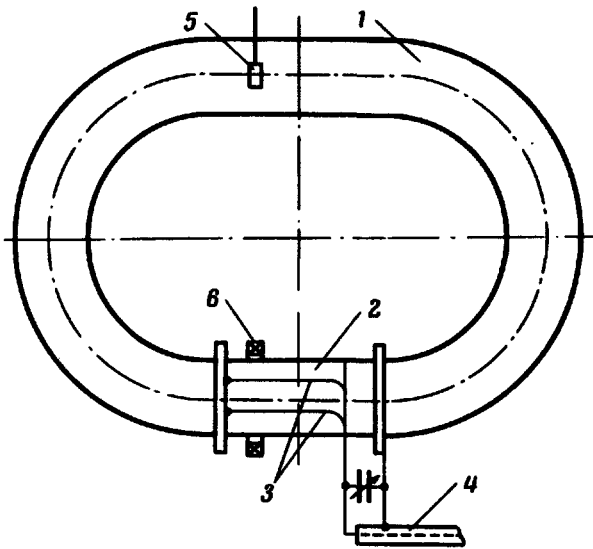


Рис. 1. Схема возбуждающей системы: 1 – вакуумная металлическая камера, 2 – керамический участок, 3 – проводящие шины высокочастотного напряжения, 4 – питающий высокочастотный фидер, 5 – высокочастотный магнитный зонд, 6 – диамагнитный зонд

Как показывает теоретический анализ, подобные системы создают на периферии плазменного шнура продольное электрическое поле  $E_z$  с широким спектром по волновым числам

$$E_z = \sum_{n=0}^{\infty} E_{zn} \cos k_{\parallel n} z, \quad (1)$$

где  $k_{\parallel n} = 2\pi n/L$ , а  $L$  – длина вакуумной камеры, и могут возбуждать в плазме "медленные" электромагнитные волны, у которых продольный компонент поля  $E_z$  значительно превышает азимутальный  $E_{\phi}$  [5]. Для слабо неоднородного ограниченного плазменного шнура условие эффективного возбуждения медленной волны с продольным волновым числом  $k_{\parallel n}$  может быть записано в следующем виде

$$\epsilon_1 k_{\perp n} d \ll 1, \quad \frac{c^2}{\omega^2} k_{\parallel n}^2 \geq \epsilon_1, \quad (2)$$

где  $\epsilon_1 = 1 + \sum_{\alpha} [\omega_{p\alpha}^2 / (\omega_{H\alpha}^2 - \omega^2)]$ ,  $k_{\perp n}$  – поперечное волновое число для медленной волны,  $d$  – расстояние между плазменным шнуром и стенкой вакуумной камеры. Условие (2) особенно легко может быть удовлетворено при возбуждении медленных волн в области частот, лежащих вблизи электрон-ионного либо ион-ионного гибридных резонансов, где  $\epsilon_1 \sim 1$  и  $k_{\perp n} \sim (\omega_{pe} / \omega) k_{\parallel n}$ . Поэтому эксперимент осуществлялся на плазме, состоящей из смеси ионов двух сортов (50% гелия и 50% водорода).

Плазма создавалась при помощи омического разряда. На распадающуюся плазму подавался импульс от высокочастотного генератора с частотой 11,6 МГц в тот момент, когда ее плотность снижалась до значения  $n = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

В процессе экспериментов измерялись высокочастотное напряжение и ток, поле волны на периферии плазменного шнура, плотность плазмы и изменение магнитного потока, обусловленного диамагнетизмом плазмы.

При малом уровне вводимой мощности (менее 10 *вт*) были исследованы радиотехнические характеристики системы возбуждения. Показано, что после создания плазмы входной импеданс системы в месте подключения фидера носит индуктивный характер и определяется, в основном, индуктивностью рассеяния подводющих шин. Для компенсации индуктивной составляющей входного импеданса включался переменный конденсатор, емкость которого подбиралась из условий резонанса возбуждающей системы при наличии плазмы. Добротность ее составляла при этом величину  $Q \approx 10$ , расстройка по частоте в течение импульса была незначительной.

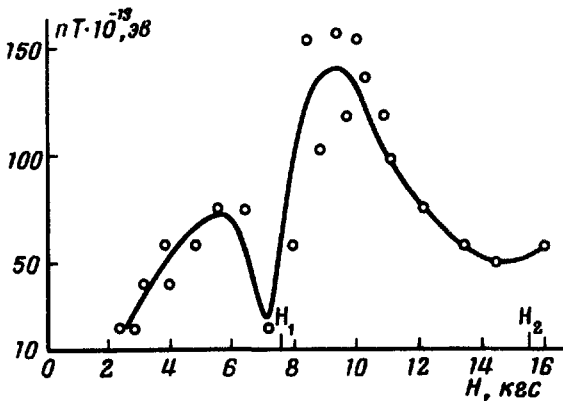


Рис. 2. Зависимость газокINETИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПЛАЗМЫ ОТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

При помощи диамагнитных измерений была изучена зависимость газокINETИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПЛАЗМЫ ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  $H$  при большом уровне общей подводимой мощности ( $P \approx 60$  *квт*). Максимальная величина входного высокочастотного тока, измеренного в подводющих шинах, достигала 150 *а*). Результаты диамагнитных измерений представлены на рис. 2. Зависимость  $nT$  от  $H$  имеет резонансный характер. Максимум  $nT$  достигается в промежутке между значениями магнитного поля  $H_1$  и  $H_2$ , которые соответствуют циклотронным частотам для ионов водорода и двукратно ионизованного гелия. Положение максимума диамагнитного сигнала хорошо согласуется с областью ион-ионного гибридного резонанса, где возможно существование медленных волн с относительно малыми продольными волновыми числами  $k_{||} \gg 2\pi/L$ . Для исследуемых параметров плазмы эта область соответствует значению магнитного поля  $H \approx 9,6$  *кэ*. Характерно, что в области существования ионной циклотронной волны ( $H_1 < H < 8,8$  *кэ* и  $H > H_2$ ), где согласно (2) возбуждение медленных волн неэффективно, отмечается существенное снижение уровня диамагнитного сигнала. В области ион-ионного гибридного резонанса температура плазмы достигает величины  $T = 100 - 150$  *эв*.

При вводе высокочастотной мощности в области магнитных полей  $H_1 < H < H_2$  наблюдался  $H_\phi$  компонент высокочастотного поля в плазме (при помощи магнитного зонда).

Таким образом, в результате проведенных экспериментов показана возможность использования предлагаемой системы возбуждения для нагрева плазмы в замкнутой магнитной ловушке. Система обладает существенными конструктивными преимуществами по сравнению с использованными в работах [1 - 3]. Измерения  $nT$  показывают, что имеется резонанс поглощения высокочастотной мощности в области, близкой к ион-ионной гибридной частоте.

В заключение авторы считают приятным долгом поблагодарить проф. К.Н.Степанова и проф. В.Т.Толока за интерес к работе и полезные дискуссии.

Физико-технический институт  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
21 января 1972 г.

### Литература

- [ 1 ] M.A.Rothman, R.M.Sinclair, J.G.Brown, J.C.Hosea. Phys. Fluids, 12, 2111, 1969.
- [ 2 ] С.С.Овчинников, С.С.Калипиченко, О.М.Швец, В.Т.Толок. Исследование ВЧ нагрева плотной плазмы в тороидальном магнитном поле. Препринт ХФТИ 71-6, Харьков, 1971.
- [ 3 ] В.Д.Вдовин, О.А.Зиновьев, А.А.Иванов, Л.Л.Козоровицкий, В.В.Параил, Я.Р.Рахимбабаев, В.Д.Русанов. Письма в ЖЭТФ, 14, 228, 1971.
- [ 4 ] О.В.Бирюков, П.Я.Бурченко, Б.Т.Василенко, Е.Д.Волков, А.В.Гергиевский, А.С.Логинов, Р.М.Николаев, Ю.В.Сашенко, В.А.Супруненко, В.Т.Толок. АЭ, 23, 99, 1967.
- [ 5 ] Л.И.Григорьева, А.В.Лонгинов, А.И.Пятак, В.Л.Сизоненко, Б.И.Смердов, К.Н.Степанов, В.В.Чечкин. IV Междунар. конф. по исследованиям в области физики плазмы и УТР, Мэдисон, 17-23 июня 1971 г., Доклад CN28/L-7.