

## Удержание плазмы магнитным полем в технических приложениях

Гура П.С., Сысун В.И.

Петрозаводский госуниверситет

Удержание плазмы магнитным полем (МП) является ключевым вопросом проблемы управляемых термоядерных реакций, неистощимого источника энергии. Однако и в других технических приложениях (лазеры, источники света, плазменные источники для покрытия и обработки поверхностей) удержание и отрыв плазмы от стенок позволяет существенно повысить параметры плазмы и технические характеристики устройств. При этом отсутствие необходимости полной изоляции плазмы от стенок в этих приложениях и существенно более низкие параметры плазмы снимают проблему появления большей части плазменных неустойчивостей и снижают требования к параметрам удержания. Часто достаточно лишь достичь значительного уменьшения концентрации вблизи стенки. В настоящей работе рассматривается возможность удержания плазмы модулированным продольным МП при наличии осевого разрядного тока в плазме [1].

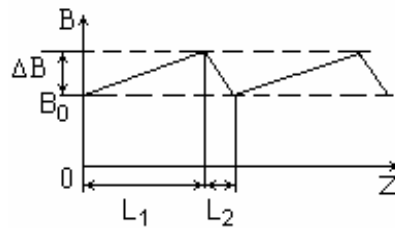


Рис.1. Распределение индукции магнитного поля, модулированного отрезками прямых, вдоль оси продольного разряда

Пусть продольное МП модулировано отрезками прямых (рис.1). Разрядный электронный ток направлен вдоль оси  $Z$  с электронной скоростью  $V_z$ . Рассмотрим равновесие плазмы в поперечном направлении  $r$ , считая изменение радиуса плазмы малым на периоде модуляции. Для удержания плазмы в среднем за период модуляции должно выполняться соотношение:

$$e B_z v_j - \frac{m v_j^2}{2} = - \frac{\partial(nkT)}{n \partial r}, \quad (1)$$

где  $v_\phi$  - азимутальная холловская скорость электронов, уравнением для которой будет:

$$v_z \frac{\partial v_j}{\partial z} = - \frac{e}{m} v_z B_r - v_j n_e, \quad (2)$$

где  $\nu_e$  – частота электронных столкновений,  $B_r = - \frac{r}{2} \frac{\partial B_z}{\partial z}$  - радиальная составляющая МП.

При постоянном  $B_r$  уравнение (2) есть линейное уравнение для  $v_\phi$  и оно имеет решение:

$$v_j = v_{j0} \exp\left(-\frac{n_e z}{v_z}\right) - \frac{e v_z}{2 m n_e} B_r \left[1 - \exp\left(-\frac{n_e z}{v_z}\right)\right]. \quad (3)$$

Отсюда видно, что  $v_\phi$  пропорционально  $\frac{e \Delta B}{m n_e}$ , тогда можно положить:

$$- \frac{\partial(nkT)}{n \partial r} = e B_z v_j - \frac{m v_j^2}{2} = A \frac{e^2 r \Delta B^2}{m}, \quad (4)$$

где коэффициент  $A$  зависит от отношения  $\frac{n_e}{v_z}$  и параметров модуляции МП. Решением уравнения (4), при слабом изменении температуры электронов, будет:

$$\frac{n}{n_0} = \exp\left(-\frac{A e^2 \Delta B^2 r^2}{2 m k T}\right), \quad (5)$$

где  $n_0$  – концентрация на оси.

Формула (5) даёт резкий спад концентрации по радиусу и, предполагая её значение на границе  $n_{\text{гп}} = n_0 e^{-2} = 0,135 n_0$ , можно определить необходимое для удержания значение  $A \Delta B^2$ :

$$A \Delta B^2 = \frac{4 m k T}{e^2 r_{\text{гп}}^2}. \quad (6)$$

Рассмотрим конкретное значение коэффициента  $A$ .

**При отсутствии столкновений**, согласно (2),  $v_\phi$  определяется локальным значением магнитного поля (известная теорема Буша):

$$v_j = \frac{e r}{2 m} \left( B_z - B_0 - \frac{\Delta B}{2} \right).$$

Тогда  $\overline{e B_z v_j} - \frac{m v_j^2}{2} = \frac{e^2 r \Delta B^2}{24 m} - \frac{e^2 r \Delta B^2}{48 m}$  и  $A = \frac{1}{48}$ . Согласно (6) будем иметь:

$$\Delta B = \frac{8 \sqrt{3 m k T}}{e r_{\text{гп}}}; \quad v_{j \text{ max}} = \frac{e r \Delta B}{4 m} = 2 \sqrt{\frac{3 k T}{m}}.$$

Таким образом, необходимая скорость превышает тепловую скорость, что приводит к бунемановской неустойчивости и турбулентности плазмы. При этом скорость  $v_\phi$  ограничивается тепловой и удержание плазмы не достигается. Отметим, что постоянная составляющая магнитного поля  $B_0$  не влияет на эффект удержания.

**При большой частоте столкновений**  $\left( \frac{n_e L}{v_z} \gg 1 \right)$ ;  $v_j = \pm \frac{e v_z r \Delta B}{2 m n_e L}$ .

$\int_0^L e B_z v_j dt$  на участках нарастания и спада магнитного поля равен  $\frac{e^2 v_z r}{2 m n_e} \Delta B \left( B_0 + \frac{\Delta B}{2} \right)$

и противоположен по знаку, так что его среднее значение на периоде равно нулю и  $A \rightarrow 0$ . Однако, при  $L_2 \ll L_1$  возможен вариант, когда ограничение  $v_\phi$  тепловой скоростью будет только на участке расширения  $L_2$  и тогда эффект сжатия на участке  $L_1$  будет превышать эффект расширения на участке  $L_2$  с суммарным сжимающим эффектом. Постоянная составляющая магнитного поля  $B_0$  в этом случае может увеличить этот эффект сжатия. Действительно:

$$\overline{e B_z v_j} + \frac{m v_j^2}{2} = \frac{e^2 v_z r \Delta B}{2 m n_e (L_1 + L_2)} \left( B_0 + \frac{\Delta B}{2} \right); \quad A = \frac{v_z}{2 n_e (L_1 + L_2)} \left( \frac{B_0}{\Delta B} + \frac{1}{2} \right)$$

$$B_0 \Delta B + \frac{\Delta B^2}{2} \approx B_0 \Delta B = \frac{4 m k T}{e^2 r_{\text{гп}}^2} \frac{r n_e (L_1 + L_2)}{v_z}; \quad v_{j \text{ max}} = \frac{4 k T}{e B_0 r_{\text{гп}}}. \quad (7)$$

И условие  $v_{\phi \text{ max}} < v_T$  на первом участке равносильно условию:

$$4 r_{\text{ел}} < r_{\text{гп}}, \quad (8)$$

где  $v_T$  – тепловая скорость электронов;  $r_{\text{ел}} \approx \sqrt{\frac{k T}{m}} \approx 3,4 \sqrt{\frac{T \text{ эВ}}{B \text{ Гс}}}$  (см) – ларморовский радиус

электрона в постоянной составляющей магнитного поля.

Таким образом, для удержания плазмы необходимо выполнение условий:

$L_1 \gg L_2 ; \frac{n_e L_1}{v_z} \gg 1$ ; а также выполнение условий (7) и (8).

**Экспериментальные исследования** сжатия канала продольного разряда проводились нами для двух случаев распределения напряжённости магнитного поля вдоль оси трубки – модулированного магнитного поля с постоянной составляющей (рис.1) и знакопеременного магнитного поля (рис.2). Требуемая конфигурация и величина магнитного поля достигалась при протекании импульсного тока в плоских электромагнитных катушках, составляющих магнитную систему. Для обеспечения большей протяжённости участка нарастания магнитного поля по сравнению с участком уменьшения использовались ферромагнитные диски. Разряд зажигался в стеклянной трубке с внутренним диаметром 12мм в аргоне при давлении 0,05÷0.2 Торр.

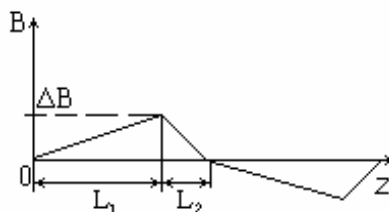


Рис.2. Распределение знакопеременного магнитного поля вдоль оси продольного разряда

Ток разряда имел прямоугольную форму, а магнитное поле практически постоянно во время горения разряда. Величина тока разряда варьировалась от 0,5А до 130А, а длительность импульсов от 0,2мс до 1мс. Максимальное значение индукции магнитного поля составляло 700Гс. Для регистрации эффекта сжатия канала разряда производилось фотографирование свечения канала разряда в промежутках между катушками магнитной системы.

Полученные экспериментальные результаты можно свести к следующему:

- Особенно эффективно сжатие канала разряда в случае знакопеременного магнитного поля.
- Эффективность сжатия повышалась при уменьшении давления газа и с увеличением крутизны нарастания магнитного поля, которая определялась величиной тока в катушках и расстоянием между катушками.
- В плоскости прохождения  $B_z$  через нуль (реверс магнитного поля) наблюдалась яркая область свечения плазмы, достигающая стенок трубки. Воздействие плазмы в местах реверса магнитного поля на стенки усиливалось по направлению от катода к аноду.
- В режимах с эффективным сжатием в знакопеременном поле наблюдался существенный рост падения напряжения на разрядном канале, находящемся в магнитном поле.
- Сжатие канала разряда при тех же значениях тока в магнитных катушках проявлялось намного слабее в случае модулированного магнитного поля по сравнению с знакопеременным полем, однако, из-за локального выброса плазмы на стенку и наличия постоянной составляющей  $B_z$ , именно случай модулированного магнитного поля с постоянной составляющей представляется более перспективным.

Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках проекта PZ-013-02, поддерживаемого совместно Американским фондом гражданских исследований и развития (АФГИР), Министерством образования РФ и правительством Республики Карелия.

Литература:

1. Сысун В.И., Хромой Ю.Д., Яковлев Д.В. и др. Авторское свидетельство СССР, №280772, 01.03.88. Дополнительное авторское свидетельство №324404, 10.03.91.