

10  
©1993

## ИССЛЕДОВАНИЕ КВАДРУПОЛЬНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ В ТОРСАТРОНАХ С МАЛЫМ ЧИСЛОМ ПЕРИОДОВ ПОЛЯ

Д.Л.Греков, А.В.Золотухин

Как показано ранее [1], в торсатронах с большим числом периодов винтового поля  $m$  возможно создание квадрупольной магнитной конфигурации. В этом случае магнитные поверхности после усреднения по тороидальному углу являются не круглыми, а вытянутыми в вертикальном (VE) или горизонтальном (HE) направлении. Изменение квадрупольности магнитного поля не только влияет на равновесные свойства магнитной конфигурации, но и приводит к изменению величины и даже знака бутстрэп-тока [2,3].

В то же время вопрос о возможности создания квадрупольной магнитной конфигурации в торсатронах с малым  $m$  и влиянием квадрупольности на равновесные свойства плазмы оставался открытым. В работе применен аналитический подход, который позволяет, задавая величины вертикального и квадрупольного полей, находить значения токов в обмотках вертикального поля, необходимые для реализации желаемой магнитной конфигурации.

Вертикальное  $B_{\perp}$  и квадрупольное  $B_q$  магнитные поля определяются как сумма полей от винтовых обмоток  $B_j^h$  и обмоток вертикального поля  $B_i^v$ :

$$B_{\alpha} = \sum_j B_{\alpha,j}^h + \sum_i B_{\alpha,i}^v, \quad (1)$$

где  $\alpha = \perp, q$ ,  $j = 1, 2$  — рассматриваются двухзаходные торсатроны,  $i$  — номер катушки вертикального поля. При этом в квазицилиндрической системе координат  $r, \vartheta, \varphi$  ( $r$  — малый радиус  $\vartheta, \varphi$  — полоидальный и тороидальный углы соответственно,  $a_h$  — малый радиус навивки винтовых проводников) имеем:  $B_{\perp} = B_{\perp} \cdot \sin \vartheta$ ,  $B_{\perp, \vartheta} = B_{\perp} \cdot \cos \vartheta$ ,  $B_{q,j} = B_q \cdot r/a_h \cdot \sin 2\vartheta$ ,  $B_{q, \vartheta} = B_q \cdot r/a_h \cos 2\vartheta$ ,  $B_{\perp, \varphi} = B_{q, \varphi} = 0$ .

Вертикальное  $B_{\perp}^h$  и квадрупольное  $B_q^h$  поля винтовых проводников находятся из точных аналитических выражений для магнитного поля тонкого винтового проводника с последующим разложением по малому параметру  $a_h/R$

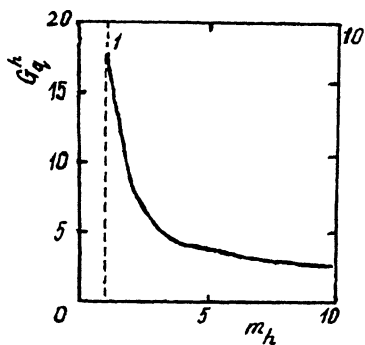


Рис. 1.

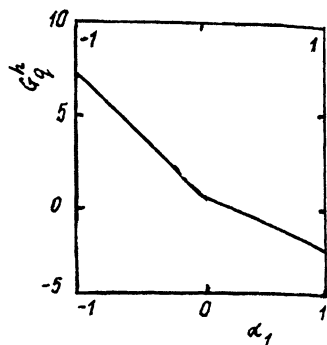


Рис. 2.

( $R$  — большой радиус тора, на который навит проводник) и имеют следующий вид:

$$B_{\perp}^h = 0.4 \frac{I_h}{R} \cdot G_{\perp}^h, \quad B_q^h = 0.4 \frac{I_h}{R} \cdot \frac{a_h}{R} \cdot G_q^h. \quad (2)$$

Здесь  $I_h$  — величина тока в винтовом проводнике,  $G_{\alpha}^h$  — геометрические факторы, зависящие от числа периодов навивки проводника на длине установки  $m_h$ ,  $a_h/R$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  ( $m\varphi_c = \vartheta_c - \vartheta_{0c} - \alpha_1(a_h/R) \sin \vartheta_c - \frac{1}{2}\alpha_2(a_h/R)^2 \sin 2\vartheta_c$  — закон навивки винтовых проводников). На рис. 1 показана зависимость геометрического фактора  $G_q^h$  от числа  $m_h$ . Эта зависимость близка к виду  $1/m_h$ . Например, существенное различие в величине  $G_q^h$  для торсатронов Ураган-2М (7.6) и LHD (1.92) обусловлено не только различием в величине  $m_h$  (2 для Урагана-2М и 5 для LHD), но и различием в коэффициенте модуляции  $\alpha_1$  (соответственно 1 и 0.4) (рис. 2). Отметим, что установки с отрицательным  $\alpha_1$  обладают присущим свойством вертикальной вытянутости магнитных поверхностей при нулевом квадрупольном поле от полоидальных колец.

Таким образом, торсатроны с малым  $m_h$  имеют значительно бóльшую квадрупольную составляющую магнитного поля винтовых проводников, чем торсатроны с большим  $m_h$ .

Аналогично из выражений для магнитного поля кольцевых проводников находятся вертикальное и квадрупольное поля обмоток вертикального поля

$$B_{\perp,i}^{\nu} = 0.4 \frac{I_i}{R} \cdot G_{\perp,i}^{\nu}, \quad B_{q,i}^{\nu} = 0.4 \frac{I_i}{r} \cdot \frac{a_h}{R} \cdot G_{q,i}^{\nu}. \quad (3)$$

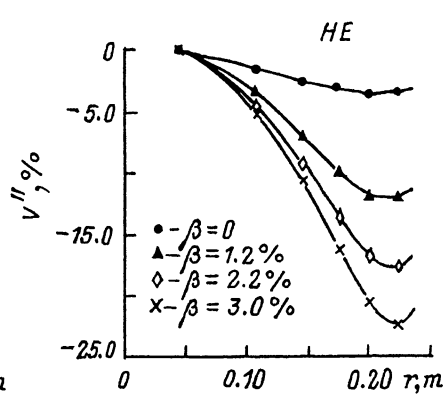
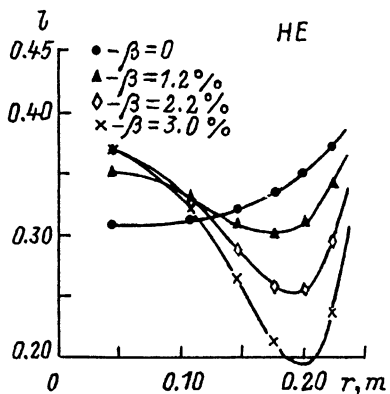
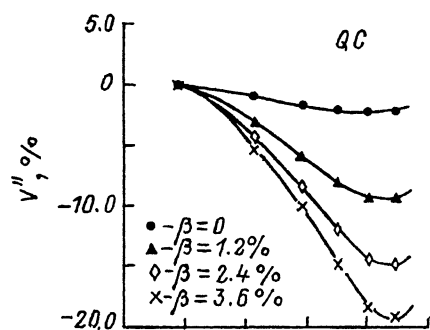
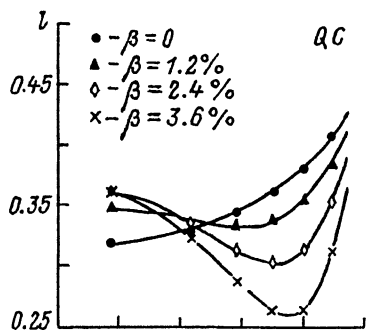
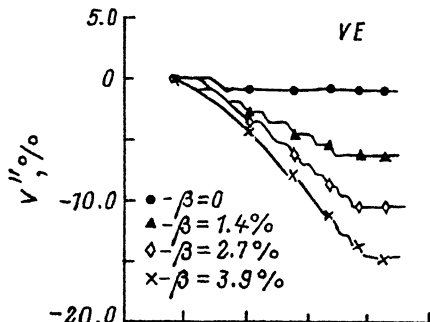
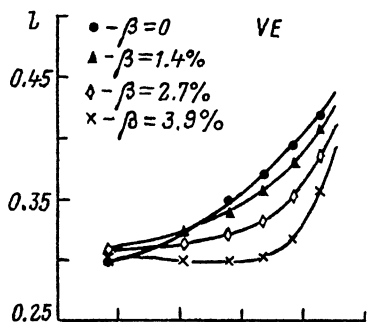


Рис. 3. Зависимости угла вращательного преобразования и магнитной ямы от малого радиуса.

Здесь  $I_i$  — величина тока в  $i$ -й катушке вертикального поля,  $G_{\alpha,i}^\nu$  — геометрические факторы, которые зависят от расположения катушек.

На примере торсатрона Ураган-2М ( $m = 4$ ) с использованием аналитически найденных токов рассчитаны конфигурации с различной квадрупольностью (HE, VE и Quasi Circular). Для изучения равновесных свойств полученных конфигураций был использован код VMES (рис. 3).

Вычисления показывают: для торсатронов с малым  $m$  квадрупольное поле оказывает сильное влияние на равновесие плазмы. Радиус крайней неразрушенной магнитной поверхности и вакуумный профиль угла вращательного преобразования ( $i$ ) меняется слабо. Однако с увеличением давления плазмы  $\beta$  профиль  $i$  в HE и VE конфигурациях изменяется совершенно по-разному, что должно приводить к существенному отличию в равновесии и устойчивости плазмы в HE и VE конфигурациях. Для конфигурации с вертикально вытянутыми поверхностями профиль угла вращательного преобразования не имеет участков с отрицательным широм при изменении давления в широких пределах ( $\beta \leq 4\%$ ). Конфигурация HE обладает вакуумной “магнитной ямой”. Для вакуумной VE конфигурации “яма” практически отсутствует.

Эти эффекты могут быть использованы для экспериментального исследования устойчивости плазмы в торсатронах. Отметим, что смещение магнитной оси под действием  $\beta$  слабо зависит от квадрупольности магнитной конфигурации.

Таким образом, для торсатронов с малым  $m$  варьирование квадрупольной составляющей магнитного поля, производимое изменением тока в катушках вертикального поля, является эффективным средством влияния на равновесие и устойчивость плазмы.

Авторы благодарны доктору С.П.Хиршману (ОРНЛ, США) за предоставленную им возможность использовать код VMES, а также А.А.Шишкину за полезные обсуждения в ходе выполнения работы.

## Список литературы

- [1] *Lyon J.F.* et al. // *Fusion Technology*. 1986. V. 10. Sept. P. 179-226.
- [2] *Murakami M.* et al. // 13-th Intern. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Research. Washington, 1990. IAEA-CN-53/C-1-3.
- [3] *Watanabe K, Nakajima N., Okamoto M., Nakamura Y., Wakatani M.* // *Nuclear Fusion*. 1992. V. 32. N 9. P. 1499-1513.

Украинский научный центр  
Харьковский физико-технический  
институт

Поступило в Редакцию  
28 июня 1993 г.

---