

**Список литературы**

1. Арцимович Л.А. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях / Л.А. Арцимович, С.Ю. Лукьянов. – М.: Наука, 1972. – 224 с.
2. Москалев В.А., Огородников А.С., Сергеев Г.И. Формирование магнитного поля безжелезного бетатрона с использованием методов математического моделирования // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 11/2.

УДК 004

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПЛАЗМЫ  
НА ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ПЛАЗМЕННОМ ГЕНЕРАТОРЕ**

Романова Т.А.

Научный руководитель: Огородников А. С.

Национальный Исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: tar6@tpu.ru

*The model of a plasma cord with two identical solenoidal coils created in the program COMSOL Multiphysics 5.1 environment is presented in this article. The model has been constructed for research of diamagnetism of plasma. The illustrations showing modification of density of a magnetic flux and direction of power lines at change of external density of current are as a result given, a component  $(J_e)_\varphi$  and  $(J_e)_z$ .*

**Ключевые слова:** диамагнетизм (diamagnetism), COMSOL Multiphysics 5.1, магнитное поле (magnetic field).

Диамагнетизм плазмы (ДП) – это свойство, характеризующее её магнитную восприимчивость, способность плазмы при помещении её в магнитное поле намагничиваться навстречу направлению внешнего поля. Этот эффект обусловлен движением электронов и ионов плазмы по винтовым (ларморовским) траекториям, что эквивалентно круговому току, создающему поле, противоположное внешнему, но меньшее по величине, так что поле внутри плазмы уменьшается. Следствием ДП является тенденция к выталкиванию сгустков плазмы из области сильного магнитного поля в области с более слабым магнитным полем. Расчётная область построена в среде моделирования COMSOL Multiphysics 5.1 в модуле AC/DC. Он предназначен для моделирования задач электромагнитных явлений как переменного, так и постоянного тока. В качестве расчётной области выбиралась аксиально – симметричная область в цилиндрической системе координат  $(r, \varphi, z)$ , между анодом и катодом – плазменный шнур (рис. 1) [1].

Вокруг плазменного шнура расположены две соленоидальные катушки. Они нужны для создания внешнего магнитного поля. Внешнее магнитное поле в такой системе создаётся двумя одинаковыми катушками с плотностью тока в катушке

$$(J^e)_\varphi = \frac{In}{h\Delta R}, \quad (1)$$

где  $I$  – ток в катушке,  $n$  – число витков,  $h$  и  $\Delta R$  – размеры катушки вдоль оси  $z$  и по радиусу соответственно. Плотность диамагнитного тока, возникающего в неоднородной плазме, зависит от давления в плазме, величины внешнего магнитного поля и его градиента и описывается в общем случае выражением:

$$\mathbf{J}_M = -\nabla \times (p_{\perp} \mathbf{B} / B^2),$$

где  $p_{\perp} = n_0 T_e f(r) = p_0 f(r)$  – давление плазмы поперёк силовых линий внешнего магнитного поля;  $n_0$  – концентрация частиц плазмы на оси канала транспортировки;  $T_e$  – электронная температура в эВ;  $f(r)$  – функция, описывающая неоднородность давления плазмы по радиусу. В аксиально-симметричной системе имеется только азимутальная составляющая тока намагниченности плазмы

$$(\mathbf{J}_M)_{\varphi} = \frac{p_{\perp}}{B^2} \left[ p_{\perp}^{-1} \frac{dp_{\perp}}{dr} B_z + \left( \frac{\partial B_z}{\partial r} - \frac{\partial B_r}{\partial z} \right) - \frac{2}{B} \left( \frac{\partial B}{\partial r} B_z - \frac{\partial B}{\partial z} B_r \right) \right]. \quad (2)$$

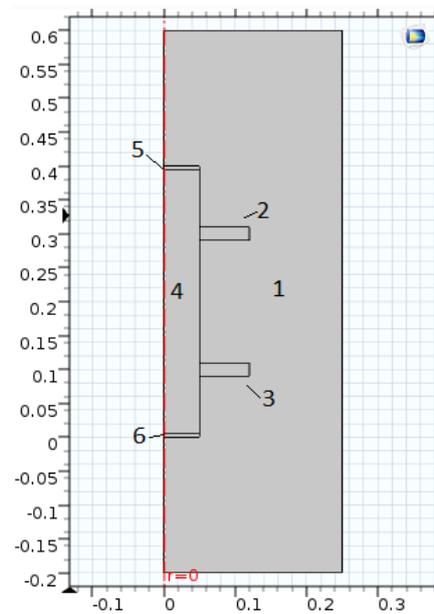


Рис. 1. Расчётная область:

1 – внешняя область; 2, 3 – соленоидальные катушки; 4 – плазменная трубка; 5 – анод; 6 – катод

Магнитное поле, связанное с суммарным током (1) и (2) описывается азимутальной составляющей векторного потенциала  $A_{\varphi}(r, z)$ . Однако, чтобы избежать особенностей на оси  $r=0$  удобно ввести новую переменную  $u = A_{\varphi}(r, z)/r$ . В новой переменной  $u = u(r, z)$  выражение для тока намагниченности плазмы запишется в виде:

$$(\mathbf{J}_M)_{\varphi} = - \frac{p_{\perp} \left( 2ru_z (2u + ru_r) (3u_z + 2ru_{rz}) + \left( (2u + ru_r)^2 - (ru_z)^2 \right) (3u_r + r(u_{rr} - u_{zz})) \right)}{\left( (ru_z)^2 + (2u + ru_r) \right)^2} + \frac{\frac{dp_{\perp}}{dr} (2u + ru_r) \left( (ru_z)^2 + (2u + ru_r)^2 \right)}{\left( (ru_z)^2 + (2u + ru_r) \right)^2}. \quad (3)$$

Здесь  $u_{rz}$ ,  $u_{rr}$ ,  $u_{zz}$  – частные производные по соответствующим координатам. Используя (1) и (3), получим нелинейное уравнение для определения скалярной функции  $u = u(r, z)$ :

$$3u_r + r(u_{rr} + u_{zz}) = -\mu_0 \left( (\mathbf{J}^e)_\varphi + (\mathbf{J}^M)_\varphi(u, r, z) \right).$$

Магнитная индукция рассчитывается по формулам:  $B_z = 2u + ru_r$ ,  $B_r = -ru_z$ . Граничные условия на оси  $r = 0$  задавались как условия аксиальной симметрии, на внешних границах задавались условия магнитной изоляции  $A_\varphi = 0$  [2]. После создания геометрии, вся расчётная область покрывалась неравномерной сеткой из треугольников. Для реализации метода конечных элементов применялся нелинейный решатель. Внешняя плотность тока рассматривается для четырёх элементов: анод (5), катушки (2,3) и катод (6) (Рис. 1). Рассматривается два варианта событий:

Внешняя плотность тока имеет положительную  $(J_e)_\varphi = 10e^5$  А/м<sup>2</sup> и отрицательную  $(J_e)_z = -10e^6$  А/м<sup>2</sup> компоненты тока.

Внешняя плотность тока имеет отрицательную  $(J_e)_\varphi = -10e^5$  А/м<sup>2</sup> и положительную  $(J_e)_z = 10e^6$  А/м<sup>2</sup> компоненты тока.

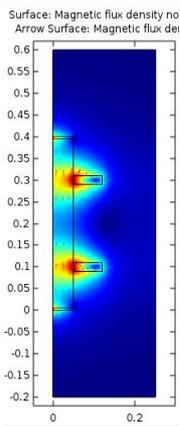


Рис. 2. Плотность магнитного потока и направление силовых линий при  $(J_e)_\varphi = 10e^5$  А/м<sup>2</sup> и  $(J_e)_z = -10e^6$  А/м<sup>2</sup>

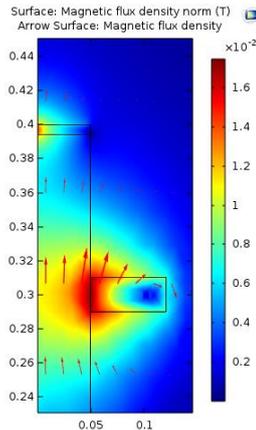


Рис. 3. Плотность магнитного потока и направление силовых линий при  $(J_e)_\varphi = -10e^5$  А/м<sup>2</sup> и  $(J_e)_z = 10e^6$  А/м<sup>2</sup>

Из представленных рисунков видно, что при изменении тока, меняется направление силовых линий (стрелочки). Модификация плотности магнитного потока на графиках показано изменением цветовой палитры.

### Список литературы

1. Григорьев В.П., Коваль Т.В. и др. Исследование транспортировки и фокусировки низкоэнергетического электронного пучка в ионизированном аргоне низкого давления // Журнал технической физики. – 2008. – Вып. 1. – Т. 81. – С. 104–108.
2. Григорьев В.П., Огородников А.С. Исследование искажения внешнего магнитного поля в каналах транспортировки электронных пучков, заполненных неоднородной плазмой // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 2. – С. 89–92.