

УДК 669-5:51-74

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВАННЕ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ РАЗНОЙ ФОРМЕ ТОКОПОДВОДЯЩЕЙ ШИНЫ К ПОДОВОМУ ЭЛЕКТРОДУ

*И.М. Ячиков, д.т.н, доцент, профессор кафедры «Вычислительная техника и прикладная математика»  
Р.Ю. Заляутдинов, аспирант*

Магнитогорский государственный технический университет (Магнитогорск, Россия)

**Аннотация.** В дуговой печи постоянного тока конструкция токоподводящей шины к подовому электроду может оказывать влияние на токонесящий расплав в ванне, а также на форму и поведение электрических дуг. Разработаны математические модели для нахождения напряженности магнитного поля вблизи токоподвода к подовому электроду дуговой печи постоянного тока в виде пространственной винтовой линии и пространственной спирали Архимеда. Показан пример моделирования поведения осевой и радиальной составляющих напряженности магнитного поля по глубине и радиусу ванны расплава дуговой печи постоянного тока. Проанализировано влияние количества витков токоподвода на прирост напряженности магнитного поля и на осевую симметричность радиальной составляющей магнитного поля.

**Ключевые слова:** подовый электрод, дуговая печь постоянного тока, математическое моделирование, напряженность магнитного поля, спираль Архимеда, винтовая линия.

*E-MAIL:* jachikov@mail.ru

Перемешивание расплава в дуговых печах постоянного тока (ДППТ) способствует выравниванию температуры металла и шлака, более равномерному распределению и более быстрому усвоению легирующих добавок, а так же облегчает скачивание шлака. Перемешивание жидкого металла в ванне ДППТ является эффективным методом повышения его качества.

Одним из существующих бесконтактных способов электромагнитного перемешивания расплава является кондукционное перемешивание, основанное на возникновении объемной электромагнитной силы между токами, протекающими через расплав, и внешним магнитным полем  $\vec{f} = \mu_0 \vec{J} \vec{H}$ , где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\vec{J}$  – плотность тока в рассматриваемой точке токонесящего расплава;  $\vec{H}$  – вектор напряженности магнитного поля [1].

Влиять на распределение плотности тока в ванне практически невозможно, так как оно определяется токоподводом к расплаву со стороны дуги (или дуг) и подового электрода (или подовых электродов), а также технологией плавки и конструкцией печи. Один из возможных способов управления процессом перемешивания связан с изменением напряженности магнитного поля в разных областях токонесящего расплава ванны от внешних проводников с током. В работах [2, 3] внешнее магнитное поле предлагается создавать шиной токоподвода к подовому электроду, выполненной в виде пространственной винтовой линии, имеющей один или несколько витков одного или разного диаметра или плоской спирали. Внутри винтовой линии может находиться сердечник из ферромагнитного материала, причем для изменения величины напряженности магнитного поля в разных областях токонесящего расплава

ванны сердечник может перемещаться в вертикальном и горизонтальном направлениях.

В работе [4] проведена сравнительная оценка электровихревого и кондукционного силового воздействия на расплав в ванне ДППТ, имеющей один подовый электрод, смещенный относительно оси ванны. Оценка величин напряженности собственного магнитного поля, возникающего в ванне расплава за счет растекания токов, и магнитного поля, создаваемого круглым витком токоподвода, расположенным под подиной печи, показала, что величины полей имеют один порядок и оказывают примерно одинаковое силовое воздействие на расплав. Это говорит о том, что кондукционное перемешивание можно использовать независимо от электровихревого или совместно с ним.

Исследование поведения магнитных полей в ванне ДППТ при разной форме токоподвода к подовому электроду далеко до завершения. Однако для теории и промышленной практики интересно влияние конфигурации токоподводящей шины на токонесящий расплав в ванне, а также на форму и поведение электрических дуг.

Целью данной работы является исследование поведения магнитного поля в ванне ДППТ при использовании шины токоподвода к подовому электроду в форме винтовой линии или в форме пространственной спирали Архимеда.

Рассмотрим расчет магнитного поля, возникающего вблизи проводника в форме винтовой линии, по которому протекает ток  $I$  (рис. 1, а). Будем использовать цилиндрическую систему координат  $(r, \varphi, z)$ , которая связана с декартовой  $(x, y, z)$  через соотношения:  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $\varphi = \arctg(y/x)$ . Зададим функцию линии проводника в

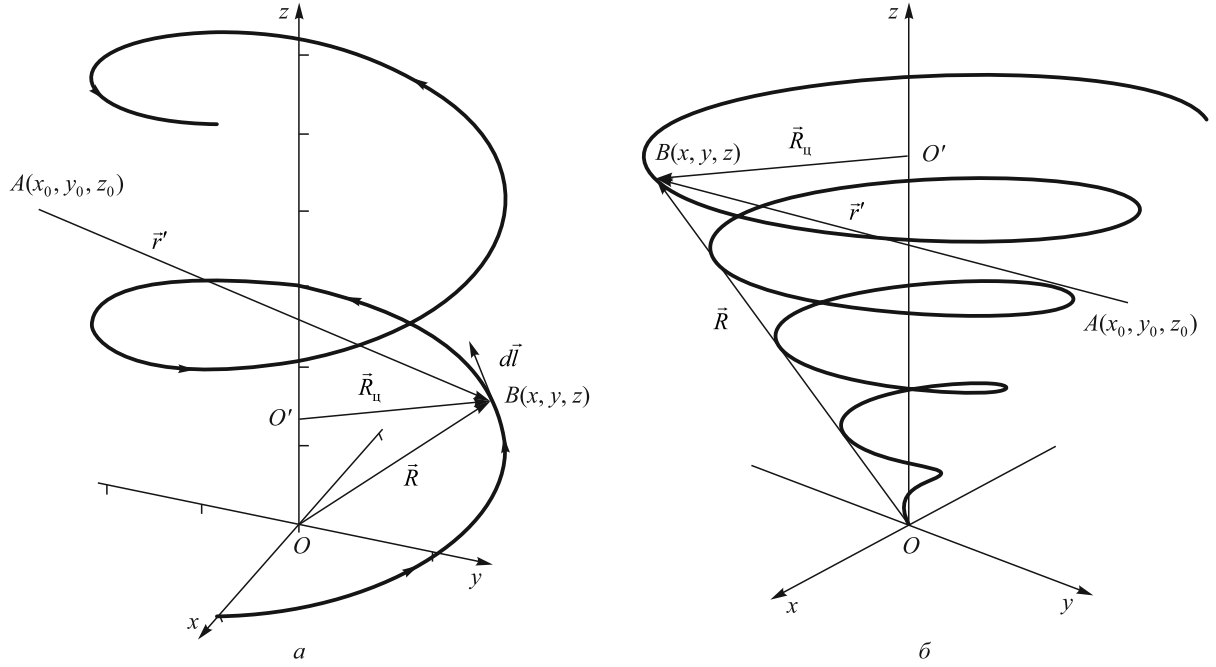


Рис. 1. Токоподводы, имеющие форму:  
 а – пространственной винтовой линии; б – пространственной спирали Архимеда

параметрической форме  $y(\varphi) = R_u \cos(\varphi)$ ,  $x(\varphi) = R_u \sin(\varphi)$ ,  $z(\varphi) = b\varphi/(2\pi)$ , где  $b$  – шаг винтовой линии, определяющий изменение координаты  $z$  при увеличении  $\varphi$  на  $2\pi$ ,  $R_u$  – радиус витка. Если винтовая линия имеет  $n$  витков, то ее длина  $L_b = n\sqrt{4\pi^2 R_u^2 + b^2}$ .

Величина и направление напряженности магнитного поля в точке  $A$  от тока  $I$ , протекающего через элемент  $d\vec{l}$  (точка  $B$ ), определяется по закону Био-Савара-Лапласа в дифференциальной форме

$$d\vec{H} = \frac{I}{4\pi r^3} d\vec{l} \times \vec{r}'. \quad (1)$$

Распишем координаты векторов  $\vec{R}$ ,  $\vec{R}_u$ ,  $\vec{r}'$  (см. рис. 1, а):

$$O\vec{B} = \vec{R} = (R_u \cos \varphi, R_u \sin \varphi, z), \quad \vec{R}_u = (R_u \cos \varphi, R_u \sin \varphi, 0),$$

$$A\vec{B} = \vec{r}' = (R_u \cos \varphi - x_0, R_u \sin \varphi - y_0, z - z_0).$$

С помощью векторных преобразований получена длина вектора  $|d\vec{l}| = \sqrt{(dz)^2 + (R_u d\varphi)^2}$ , его направление в виде единичного вектора  $\vec{l}_e = \frac{(R_u \sin \varphi, -R_u \cos \varphi, \frac{b}{2\pi})}{\sqrt{R_u^2 + \frac{b^2}{4\pi^2}}}$

и, наконец, сам вектор  $d\vec{l}$  как произведение двух последних

$$d\vec{l} = |d\vec{l}| \vec{l}_e = \frac{\sqrt{(dz)^2 + (R_u d\varphi)^2}}{\sqrt{R_u^2 + \frac{b^2}{4\pi^2}}} \left( R_u \sin \varphi, -R_u \cos \varphi, \frac{b}{2\pi} \right)$$

или

$$d\vec{l} = d\varphi \left( R_u \sin \varphi, -R_u \cos \varphi, \frac{b}{2\pi} \right).$$

Зная его, можно найти векторное произведение

$$\begin{aligned} [d\vec{l} \times \vec{r}'] &= \begin{vmatrix} i & j & k \\ d\varphi R_u \sin \varphi & -d\varphi R_u \cos \varphi & d\varphi \frac{b}{2\pi} \\ R_u \cos \varphi - x_0 & R_u \sin \varphi - y_0 & z - z_0 \end{vmatrix} = \\ &= i \left( d\varphi \left( R_u \cos \varphi (z_0 - z) - (R_u \sin \varphi - y_0) \frac{b}{2\pi} \right) \right) + \\ &+ j \left( d\varphi \left( (R_u \cos \varphi - x_0) \frac{b}{2\pi} - R_u \sin \varphi (z - z_0) \right) \right) + \\ &+ k \left( d\varphi (R_u \sin \varphi (R_u \sin \varphi - y_0) + R_u \cos \varphi (R_u \cos \varphi - x_0)) \right). \end{aligned}$$

В произвольной точке, заданной цилиндрическими координатами  $A(r_0, \varphi_0, z_0)$ , вблизи проводника с током в виде пространственной винтовой линии, содержащего  $n$  витков, декартовы проекции напряженности магнитного поля имеют вид:

$$\begin{aligned} H_x(r_0, \varphi_0, z_0) &= \frac{I}{4\pi} \times \\ &\times \int_0^{2\pi n} \frac{-(R_u \sin \varphi - r_0 \sin \varphi_0) \frac{b}{2\pi} - R_u \cos \varphi \left( \frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)}{\left( R_u^2 + r_0^2 - 2R_u r_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \left( \frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)^2 \right)^{3/2}} d\varphi; \quad (2) \end{aligned}$$

$$H_y(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{(R_u \cos \varphi - r_0 \cos \varphi_0) \frac{b}{2\pi} - R_u \sin \varphi \left( \frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)}{\left( R_u^2 + r_0^2 - 2R_u r_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \left( \frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)^2 \right)^{3/2}} d\varphi; \quad (3)$$

$$H_z(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{IR_u}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{R_u - r_0 \cos(\varphi - \varphi_0)}{\left( R_u^2 + r_0^2 - 2R_u r_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \left( \frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)^2 \right)^{3/2}} d\varphi. \quad (4)$$

В частном случае, при  $b = 0$ ,  $n = 1$  имеем математическую модель осесимметричного магнитного поля от кругового витка:

$$H_z(r_0, z_0) = \frac{IR_u}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R_u - r_0 \cos \varphi}{\left( R_u^2 + r_0^2 - 2R_u r_0 \cos \varphi + z_0^2 \right)^{3/2}} d\varphi; \quad (5)$$

$$H_r(r_0, z_0) = \frac{IR_u z_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\left( R_u^2 + r_0^2 - 2R_u r_0 \cos \varphi + z_0^2 \right)^{3/2}} d\varphi. \quad (6)$$

Расчеты с использованием модели (5) – (6) с большой точностью совпадают с расчетами, выполненными по модели, полученной в работе [5] на основе магнитного потенциала.

Далее определялось магнитное поле вблизи проводника с током в виде пространственной спирали Архимеда (рис. 1, б). Также использована цилиндрическая система координат  $(r, \varphi, z)$ , которая связана с декартовой  $(x, y, z)$  такими же соотношениями, как для случая с винтовой линией. Положение пространственной спирали Архимеда в параметрическом виде задается как  $y(\varphi) = a\varphi \cos(\varphi)$ ,  $x(\varphi) = a\varphi \sin(\varphi)$ ,  $z(\varphi) = b\varphi/(2\pi)$ , где  $a = R_u/(2\pi n)$  – параметр, определяющий количество витков  $n$ , которые сделает линия до достижения внешнего радиуса  $r = R_u$ . Длина пространственной спирали Архимеда  $L_a = \int_0^{2\pi n} \sqrt{a^2(\varphi^2 + 1) + \frac{b^2}{4\pi^2}} d\varphi$ .

Распишем координаты векторов  $\vec{R}$ ,  $\vec{r}'$  (см. рис. 1, б):

$$\vec{R} = (a\varphi \cos \varphi, a\varphi \sin \varphi, z);$$

$$\vec{r}' = |\vec{AB}| = (a\varphi \cos \varphi - x_0, a\varphi \sin \varphi - y_0, z - z_0).$$

Аналогично, как и с винтовой линией, получаем длину вектора  $|\vec{dl}|$ , направление единичного вектора  $\vec{l}_e$  и вектор  $d\vec{l}$ :

$$|\vec{dl}| = \sqrt{dR_u^2 + dh^2 + dz^2};$$

$$\vec{l}_e = \frac{1}{\sqrt{\varphi^2 + \left( \frac{b}{2\pi} \right)^2}} \left( \varphi \sin \varphi, -\varphi \cos \varphi, \frac{b}{2\pi} \right);$$

$$d\vec{l} = \sqrt{\frac{4b^2\pi^2 + 4b^2\pi^2\varphi^2 + a^2}{4\pi^2b^2\varphi^2 + a^2}} \left( \varphi \sin \varphi, -\varphi \cos \varphi, \frac{a}{2\pi} \right) d\varphi. \quad (5)$$

Зная его, можно найти векторное произведение

$$\begin{aligned} [\vec{dl} \times \vec{r}'] &= \begin{vmatrix} i & j & k \\ \lambda\varphi \sin \varphi d\varphi & -\lambda\varphi \cos \varphi d\varphi & \lambda \frac{b}{2\pi} d\varphi \\ a\varphi \cos \varphi - x_0 & a\varphi \sin \varphi - y_0 & z - z_0 \end{vmatrix} = \\ &= i \left( -\lambda\varphi \cos \varphi (z - z_0) d\varphi - (b\varphi \sin \varphi - y_0) \lambda \frac{a}{2\pi} d\varphi \right) + \\ &+ j \left( \lambda \frac{b}{2\pi} (a\varphi \cos \varphi - x_0) d\varphi - \lambda\varphi \sin \varphi (z - z_0) d\varphi \right) + \\ &+ k \left( \lambda\varphi \sin \varphi (a\varphi \sin \varphi - y_0) d\varphi + \right. \\ &\left. + \lambda\varphi \cos \varphi (a\varphi \cos \varphi - x_0) d\varphi \right), \end{aligned}$$

$$\text{где } \lambda = \sqrt{\frac{4a^2\pi^2 + 4a^2\pi^2\varphi^2 + b^2}{4\pi^2\varphi^2 + b^2}}.$$

В точке, заданной цилиндрическими координатами  $A(r_0, \varphi_0, z_0)$ , вблизи проводника в виде пространственной спирали Архимеда, содержащего  $n$  витков, проекции напряженности магнитного поля имеют вид:

$$H_x(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{\lambda \left( (a\varphi \sin \varphi - r_0 \sin \varphi_0) \frac{b}{2\pi} - \varphi \cos \varphi \left( \frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right) \right)}{\left( a^2\varphi^2 + r_0^2 - 2a\varphi r_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \left( \frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)^2 \right)^{3/2}} d\varphi; \quad (7)$$

$$H_y(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{\lambda \left( (a\varphi \cos \varphi - r_0 \cos \varphi_0) \frac{b}{2\pi} - \varphi \sin \varphi \left( \frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right) \right)}{\left( a^2\varphi^2 + r_0^2 - 2a\varphi r_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \left( \frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)^2 \right)^{3/2}} d\varphi; \quad (8)$$

$$H_z(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{\lambda (a\varphi^2 - r_0\varphi \cos(\varphi - \varphi_0))}{\left( a^2\varphi^2 + r_0^2 - 2a\varphi r_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \left( \frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)^2 \right)^{3/2}} d\varphi. \quad (9)$$

В частном случае, при  $b = 0$  можно получить математическую модель магнитного поля вблизи витка в виде

плоской спирали Архимеда, которая совпадает с моделью, полученной в работе [5]:

$$dH_x(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{Iaz_0}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{\sqrt{1+\varphi^2} \cos \varphi}{(a^2\varphi^2 + r_0^2 - 2a\varphi r_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + z_0^2)^{3/2}} d\varphi; \quad (10)$$

$$dH_y(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{Iaz_0}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{-\sqrt{1+\varphi^2} \sin \varphi}{(a^2\varphi^2 + r_0^2 - 2a\varphi r_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + z_0^2)^{3/2}} d\varphi; \quad (11)$$

$$dH_z(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{Ia}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{\sqrt{1+\varphi^2} (a\varphi - r_0 \cos(\varphi - \varphi_0))}{(a^2\varphi^2 + r_0^2 - 2a\varphi r_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + z_0^2)^{3/2}} d\varphi. \quad (12)$$

Проведено исследование поведения магнитного поля в ванне пятитонной сталеплавильной ДППТ стандартной конфигурации при следующих параметрах:  $I = 4$  кА; радиус ванны по жидкому металлу  $R_v = 1,245$  м; высота ванны по жидкому металлу и шлаку  $H_v = 0,34$  м. Моделирование проводилось для шины токоподвода к подовому электроду в форме винтовой линии или в форме пространственной спирали Архимеда при  $R_{\text{ц}} = 1,2$  м,  $b = 0,3$  м,  $n = 4$ ,  $L_b \approx 30,2$  м,  $L_a \approx 15,3$  м.

При моделировании принималось, что ванна с расплавом находится в положительном полупространстве ( $z > 0$ ) относительно  $xOy$ , а подина ванны, контактирующая с жидким металлом, на расстоянии  $z = 0,3$  м. Шина токоподвода располагалась в отрицательном полупространстве ( $z < 0$ ). Для проводника в форме винтовой линии параметр  $b < 0$ . Для пространственной спирали Архимеда были рассмотрены два варианта: «перевернутая» спираль, для которой  $b < 0$  и «обычная» спираль, показанная на рис. 1,  $b$  с положительным параметром  $b$ , но сдвинутая в отрицательное полупространство вдоль  $Oz$  на расстояние, равное своей высоте  $nb$ .

Для рассмотренных условий проведено моделирование поведения вертикальной (рис. 2) и радиальной (рис. 3) составляющих напряженности магнитного поля при разной форме токоподвода. Из рис. 2 видно, что для пространственной спирали Архимеда по сравнению с винтовой линией значение  $H_z$  по координате  $r$  изменяется более существенно, а для винтовой линии проекции напряженности магнитного поля  $H_r$  и  $H_z$  гораздо выше при приближении  $r$  к  $R_{\text{ц}}$ . Величина радиальной составляющей напряженности магнитного поля для пространственных спиралей Архимеда в среднем приблизительно в два раза меньше, чем вертикальной составляющей. Для плоской спирали Архимеда в работе [6] получены схожие результаты. Для «перевернутой» спирали имеется более высокое значение магнитного поля в центре, что объясняется более близким расположением центра спирали к подине ванны. Так же из графиков видно (см. рис. 3), что радиальная составляющая магнитного поля для пространственных спиралей Архимеда вдоль координаты  $r$  имеет экстремум.

Анализ зависимости напряженности магнитного поля от числа витков для трех рассмотренных случаев показал, что они имеют одинаковый характер. Увеличение  $n$  приводит к возрастанию  $H_z$ , причем эта зависимость нелинейная. На рис. 4 показан прирост вертикальной составляющей магнитного поля от числа витков  $n$ . Видно, что максимальный прирост напряженности наблюдается при  $n_{\text{н}} \approx 3 - 4$ , что говорит о целесообразности использования конструкции токоподвода с числом витков не более, чем  $n_{\text{н}}$ . Понятно, что полученное значение  $n_{\text{н}}$  зависит от  $R_{\text{ц}}$  и  $b$ .

Из всех рассмотренных форм токоподвода магнитное поле имеет осевую симметрию только вблизи кругового витка (при  $b = 0$ ,  $n = 1$ ). Получена зависимость радиальной проекции магнитного поля  $H_r = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$  от азимутальной координаты  $\varphi$  для «обычной» спирали Архимеда при разном количестве витков (рис. 5). Ее анализ показал, что с увеличением  $n$  распределение становится все более близким к осесимметричному. Так, отклонение максимального значения  $H_r$  от минимального на дне ванны ( $r = R_{\text{ц}}$ ) при трех витках составляет 62 %, при четырех – 57 %, а при пяти – 19 %.

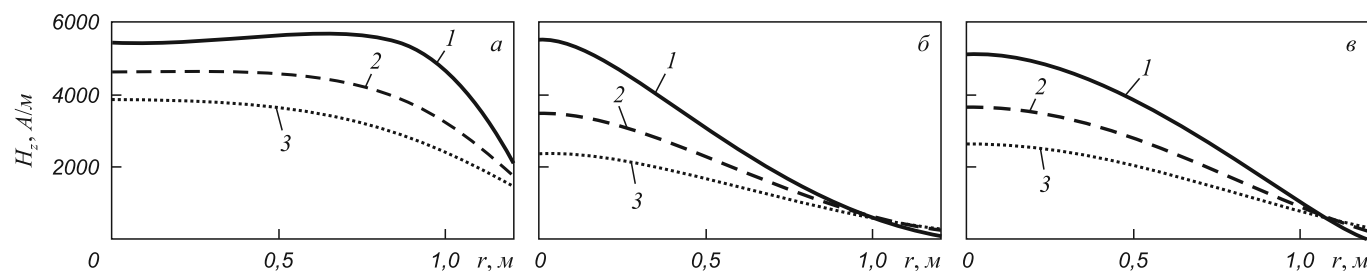


Рис. 2. Зависимости осевой проекции напряженности магнитного поля по радиусу ванны для  $\varphi = \pi/3$ , создаваемых: а – винтовой линией; б – «перевернутой» пространственной спиралью Архимеда; в – «обычной» пространственной спиралью Архимеда: 1 – на подине ванны ( $z = 0,3$  м); 2 – на середине ванны по ее высоте ( $z = 0,47$  м); 3 – на свободной поверхности ванны ( $z = 0,64$  м)

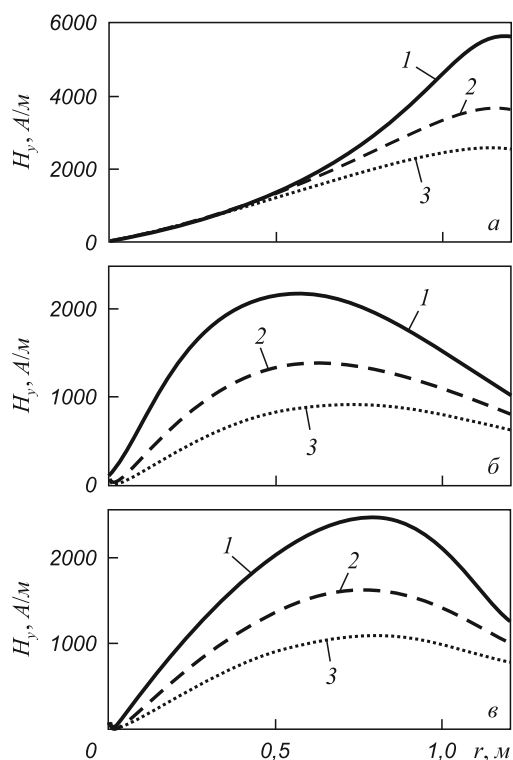


Рис. 3. Зависимости радиальной проекции напряженности магнитного поля по радиусу ванны для  $\varphi = \pi/3$ , создаваемых: а – винтовой линией; б – перевернутой пространственной спиралью Архимеда; в – «обычной» пространственной спиралью Архимеда:

1 – на подине ванны ( $z = 0,3$  м);  
2 – на середине ванны по ее высоте ( $z = 0,47$  м);  
3 – на свободной поверхности ванны ( $z = 0,64$  м)

Эти сведения могут быть полезны для учета специфики воздействия внешних магнитных полей на расплав или дугу при выбранной конструкции токоподвода к подовому электроду.

**Выводы.** Разработаны математические модели для нахождения напряженности магнитного поля вблизи токоподвода в виде пространственной винтовой линии

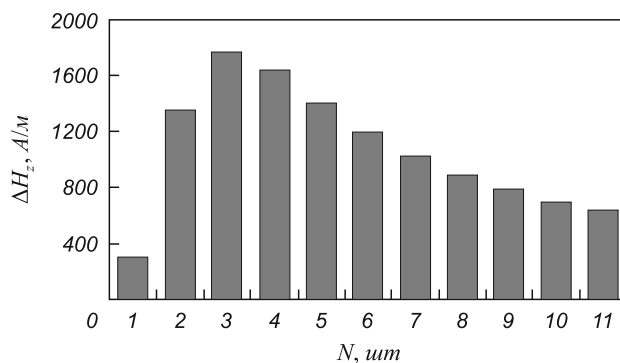


Рис. 4. Прирост осевой напряженности магнитного поля от числа витков при  $r = 0, z = 0,3$  м для «обычной» пространственной спирали Архимеда

и пространственной спирали Архимеда. Моделирование поведения магнитного поля по глубине и радиусу ванны ДППТ показало, что напряженности магнитных полей имеют один порядок и различаются характером их распределения. Для практики при использовании одного подового электрода наиболее рациональной с точки зрения удобства подключения к подовому электроду и экономии медной шины является конструкция токоподвода в виде «перевернутой» пространственной спирали Архимеда.

Установлено, что с увеличением количества витков токоподвода прирост магнитного поля сначала довольно резко увеличивается, а затем уменьшается, поэтому количество витков токоподвода не должно превышать некоторое значение, где наблюдается максимальный прирост поля. При использовании пространственной спирали Архимеда для получения поля, близкого к осесимметричному, необходимо использовать токоподвод с несколькими витками.

Результаты данной работы могут быть полезны проектным организациям, занимающимся конструированием новых и модернизацией действующих дуго-

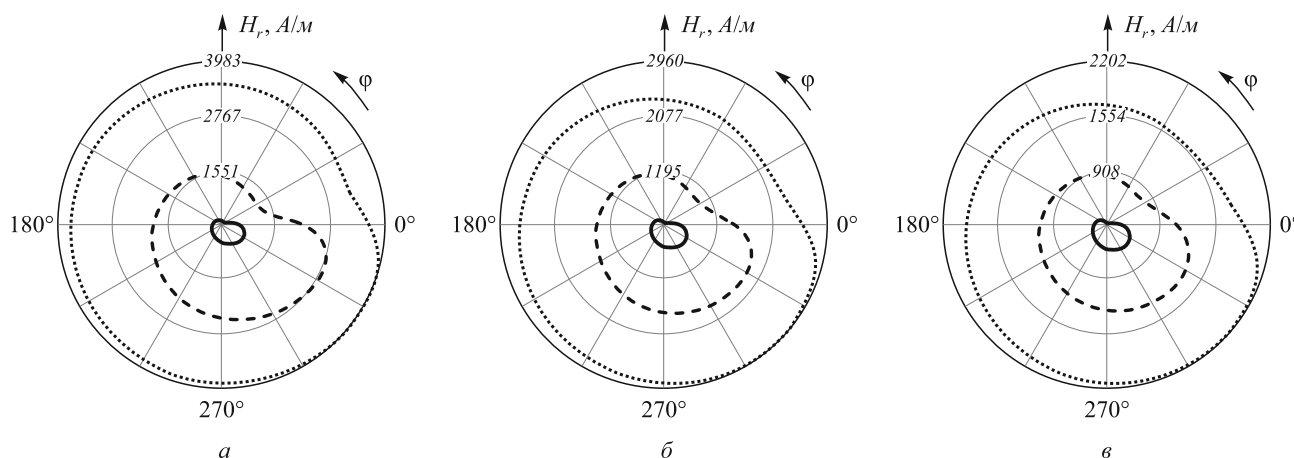


Рис. 5. Зависимость радиальной проекции магнитного поля  $H_r$  от азимутальной координаты при разном количестве витков  $n$  для «обычной» спирали Архимеда ( $r = R_u$ ):

а – на подине ванны ( $z = 0,3$  м); б – на середине по высоте ( $z = 0,47$  м); в – на поверхности расплава ( $z = 0,64$  м);  
—  $n = 3$ ; ---  $n = 4$ ; .....  $n = 5$ .



вых печей постоянного тока по выплавке металлов и сплавов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ячиков И.М., Карандаева О.И., Ларина Т.П., Портнова И.В. Моделирование электромагнитных процессов в электродугowych печах постоянного тока. – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – 139 с.
2. Пат. 119556 РФ. Электродуговая печь постоянного тока / Портнова И.В., Ячиков И.М., Харченко О.А. БИПМ. 2012. № 23.
3. Пат. 126810 РФ. Электродуговая печь постоянного тока / Ячиков И.М., Портнова И.В., Залаяутдинов Р.Ю. БИПМ. 2013. № 10.
4. Ячиков И.М., Портнова И.В. // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: Сб. докл. Междунар. научно-практич. конф. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 418 – 423.
5. Сарапулов Ф.Н. Расчет параметров цепей электротехнологических установок: Учеб. пособие. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 83 с.
6. Ячиков И.М., Портнова И.В., Залаяутдинов Р.Ю. // Математическое и программное обеспечение в промышленной и социальной сферах: Междунар. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2012. С. 183 – 190.

© 2014 г. И.М. Ячиков, Р.Ю. Залаяутдинов  
Поступила 5 ноября 2013 г.

## THE RESEARCH OF MAGNETIC FIELD OF METAL IN DC ARC FURNACE WITH DIFFERENT FORMS OF BUSBARS TO THE BOTTOM ELECTRODE

*I.M. Yachikov, Dr.Eng., Professor of the Chair of Computer Engineering, and Applied Mathematics*

*R.Yu. Zalyautdinov, Postgraduate*

**Magnitogorsk state technical university of G.I. Nosov (Magnitogorsk, Russia)**

*E-MAIL: jachikov@mail.ru*

**Abstract.** The design of busbars of the bottom electrode in a DC arc furnace can affect the current carrying melt in the metal, as well as the shape and behavior of electric arcs. The mathematical models are developed to find the magnetic field near the current supply to the bottom electrode of DC arc furnace in the form of spatial and spatial helix spiral of Archimedes. The example of modeling the behavior of axial and radial components of the magnetic field strength in depth and the radius of the molten metal in DC arc furnace is shown. The authors analyzed the influence of the number of turns of current supply to increase the magnetic field and the axial symmetry of the radial component of the magnetic field.

**Keywords:** bottom electrode, arc furnace of a direct current, mathematical modeling, intensity of a magnetic field, Archimedes spiral, screw line.

### REFERENCES

1. Jachikov I.M., Karandaeva O.I., Larina T.P., Portnova I.V. *Modelirovanie jelectromagnitnyh processov v jelectrodugovyh pechah postojannogo toka: Monografija*. (Modeling of

electromagnetic processes in electric arc furnaces DC: Monograph). Magnitogorsk: MGTU, 2005. 139 p.

2. Portnova I.V., Jachikov I.M., Harchenko O.A. *Jelectrodugovaja pech' postojannogo toka* (Electric arc furnace DC). Patent RF № 119556. BIPM. 2012. № 23.
3. Jachikov I.M., Portnova I.V., Zalyautdinov R.Ju. *Jelectrodugovaja pech' postojannogo toka* (Electric arc furnace DC). Patent RF № 126810. BIPM. 2013. № 10.
4. Jachikov I.M., Portnova I.V. *Ocenka jeffektivnosti jelectrovihrevogo i kondukcionnogo vozdejstviya na rasplav v vanne DPPT. Teorija i praktika teplovyh processov v metallurgii: Sb. dokl. mezhd. nauch.-prakt. konf.* (Evaluating the effectiveness of the conductive electric whirlwind and impact on the melt in DCA. Theory and Practice of thermal processes in metallurgy: Collection of reports. Intl. scientific-practical. conf.) Ekaterinburg: UrFU, 2012. pp. 418 – 423.
5. Sarapulov F.N. *Raschet parametrov cepej jelectrotehnologicheskikh ustanovok* (Calculation of parameters chains electro-technological installations). Ekaterinburg: UGTU, 1999. 83 p.
6. Jachikov I.M., Portnova I.V., Zalyautdinov R.Ju. *Modelirovanie povedenija magnitnogo polja v vanne DPPT pri raznyh konstrukcijah tokopodvoda k podovomu jelectro. – Matematicheskoe i programnoe obespechenie v promyshlennoj i social'noj sferah: mezhdunar. sb. nauch. tr.* (Modeling of the behavior of magnetic field in the metal in DCAF with different structures of current supply to the bottom electrode. – Mathematical and software in the industrial and social spheres: Intern. Collection of scientific reports.) Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. tehn. un-ta im. G.I. Nosova. 2012. pp. 183 – 190.

Received 5 November 2013