

# МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.36

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

Ячиков И.М., Портнова И.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия.

**Аннотация.** Предложена математическая модель для определения магнитных полей вблизи токоподводов к подовому электроду дуговой печи постоянного тока (ДППТ) в виде винтовой линии, плоской или пространственной спирали Архимеда. Посредством компьютерного моделирования проанализированы напряженности магнитных полей в ванне ДППТ. Даны рекомендации по параметрам конструкции токоподводящей шины.

**Ключевые слова:** дуговая печь постоянного тока, магнитное поле, токоподвод.

### Введение

В металлургической промышленности достаточно широко распространены технологии с использованием больших электрических токов, протекающих через ванну расплава. Типичными примерами являются электрометаллургия, электрошлаковый и вакуумно-дуговой переплав, где металлургические расплавы представляют собой высокотемпературные токонесущие жидкости. Их поведение описывается законами магнитной гидродинамики, связанными с явлениями, которые возникают при взаимодействии проходящего через расплав электрического тока с его собственным и внешним магнитными полями.

Внешние магнитные поля могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на технологические процессы. Так, при воздействии магнитного поля на токонесущий расплав, находящийся в ванне дуговой печи постоянного тока (ДППТ), с одной стороны, возникают объемные электромагнитные силы, приводящие к кондукционному его перемешиванию, что интенсифицирует протекание тепломассообменных процессов. С другой стороны, внешние магнитные поля могут приводить к возникновению интенсивных течений, вымывающих футеровку, к отклонению от вертикали дуги или характерному ее движению по поверхности жидкого расплава [1].

Отсюда грамотное использование кондукционного перемешивания позволяет повысить технико-экономические характеристики металлургического процесса, качество получаемого металла и свести к минимуму негативные воздействия.

### Математическая модель и моделирование магнитных полей при разной конструкции токоподводящей шины к подовому электроду

Один из возможных способов управления процессом кондукционного перемешивания связан с изменением напряженности магнитного поля в разных областях токонесущего расплава ванны от внешних проводников с током. В патентах [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 (рис. 1). Внутри винтовой линии может находиться сердечник из ферромагнитного материала, перемещая который в вертикальном и горизонтальном направлениях можно управлять изменением величины напряженности магнитного поля в разных областях токонесущего расплава ванны.

Сравнительная оценка силового воздействия на расплав в ванне ДППТ, имеющей один подовый электрод, смещенный относительно оси ванны, и токоподвод в виде плоского кольца, показала, что величины собственных и внешних магнитных полей одного порядка и оказывают примерно одинаковое силовое воздействие на расплав [4]. Установлено, что с помощью кондукционного перемешивания можно весьма существенно и гибко влиять на процессы в ванне расплава, кроме того, его можно использовать независимо или совместно с электровихревым перемешиванием.

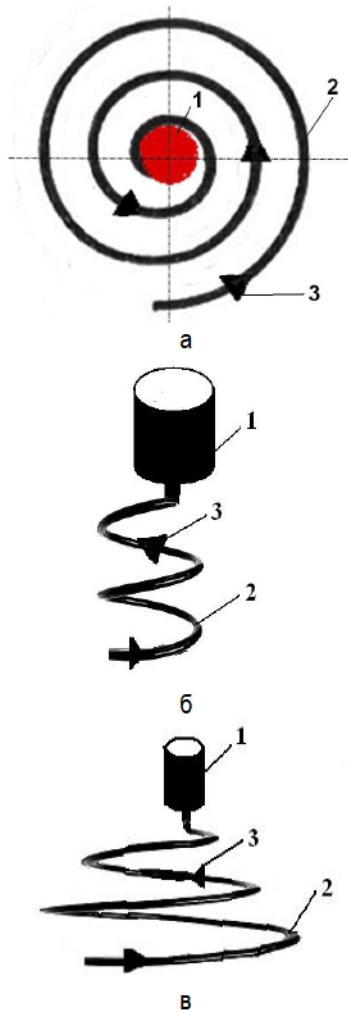


Рис. 1. Виды токоподводов к подовому электроду:  
 а – плоская спираль Архимеда;  
 б – цилиндрическая спираль;  
 в – пространственная спираль Архимеда;  
 1 – подовый электрод; 2 – жесткая токоподводящая шина; 3 – направление тока

Целью данной работы является изучение магнитного поля в ванне ДППТ при использовании токоподводящей шины к подовому электроду в форме винтовой линии либо в виде плоской или пространственной спирали Архимеда.

Рассмотрим магнитное поле, возникающее вблизи проводника в форме винтовой линии, по которому протекает ток  $I$  (рис. 2, а). Будем использовать цилиндрическую систему координат  $(r, \varphi, z)$ , связанную с декартовой  $(x, y, z)$  через соотношения:  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $\varphi = \arctg(y/x)$ . Зададим функцию линии проводника в параметрической форме  $y(\varphi) = R_y \cdot \cos(\varphi)$ ,  $x(\varphi) = R_y \cdot \sin(\varphi)$ ,  $z(\varphi) = b \cdot \varphi / (2 \cdot \pi)$ , где  $b$  – шаг винтовой линии, определяющий изменение координаты  $z$  при увеличении  $\varphi$  на  $2 \cdot \pi$ ,  $R_y$  – радиус витка. Если винто-

вая линия имеет  $n$  витков, то ее длина  $L_e = n\sqrt{4\pi^2 R_y^2 + b^2}$ .

Для определения напряженности магнитного поля в произвольной точке  $A$  от тока  $I$ , протекающего через элемент  $d\vec{l}$  (точка  $B$ ), воспользуемся уравнением Био-Савара-Лапласа в дифференциальной форме

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

Распишем координаты векторов  $\vec{R}$ ,  $\vec{R}_y$ ,  $\vec{r}'$  (рис. 2, а) [5]:

$$OB = \vec{R} = (R_y \cdot \cos\varphi, R_y \cdot \sin\varphi, z),$$

$$\vec{R}_y = (R_y \cdot \cos\varphi, R_y \cdot \sin\varphi, 0),$$

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

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

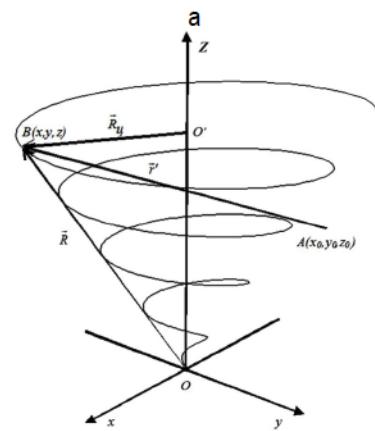
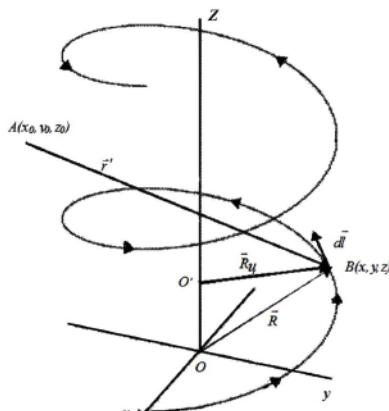


Рис. 2. К расчету напряженности магнитного поля от токоподводов, имеющих форму: а – пространственной винтовой линии; б – пространственной спирали Архимеда

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

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

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

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

В частном случае, при  $b=0, n=1$  имеем математическую модель осесимметричного магнитного поля от кругового витка [4, 6]:

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

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

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

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

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

Рассмотрим магнитное поле, возникающее вблизи проводника в форме пространственной спирали Архимеда, по которому протекает ток  $I$  (рис. 2, 6). Форма такого проводника в параметрическом виде задается как  $y(\varphi) = a \cdot \varphi \cdot \cos(\varphi)$ ,  $x(\varphi) = a \cdot \varphi \cdot \sin(\varphi)$ ,  $z(\varphi) = b \cdot \varphi / (2 \cdot \pi)$ , где  $a = R_u / (2\pi \cdot n)$  – параметр, определяющий радиальное смещение линии и характеризующий количество витков  $n$ , которые сделает спираль для достижения внешнего радиуса  $r = R_u$ . Полную длину пространственной спирали Архимеда можно определить как

$$L_a = \int_0^{2\pi n} \sqrt{a^2 (\varphi^2 + 1) + \frac{b^2}{4\pi^2}} d\varphi.$$

Распишем координаты векторов  $\vec{R}$ ,  $\vec{r}'$  (см. рис. 2, 6):

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

Аналогично, как и с винтовой линией, получаем длину вектора  $|\vec{dl}| = \sqrt{dR_u^2 + dh^2 + dz^2}$ , направление единичного вектора  $\vec{l}_e$  и вектор  $\vec{dl}$ .

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

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

В частном случае, при  $b=0$  можно получить математическую модель магнитного поля вблизи плоской спирали Архимеда [4]:

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

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

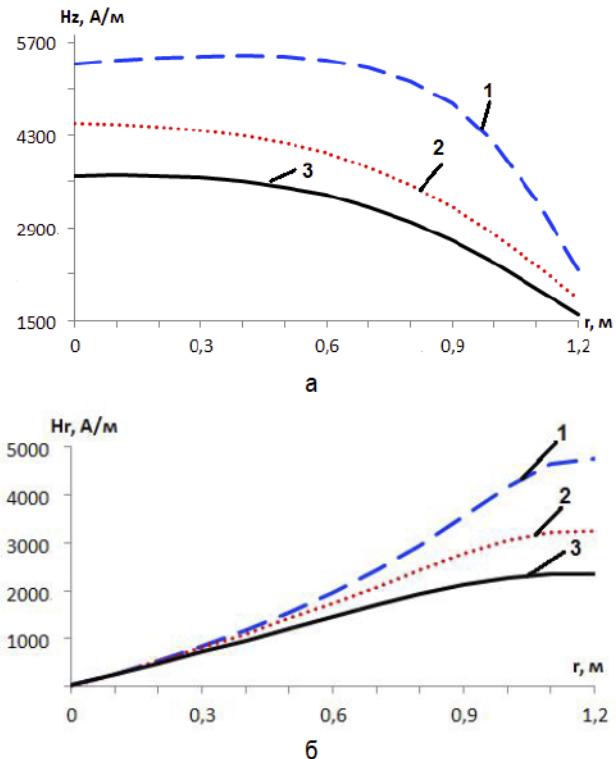
$$H_z(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I \cdot a}{4\pi} \times \times \int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{1+\varphi^2} (a \cdot \varphi - r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0))}{(a^2 \cdot \varphi^2 + r_0^2 - 2a \cdot \varphi \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + z_0^2)^{3/2}} \cdot d\varphi. \quad (12)$$

Посредством компьютерного моделирования проведено исследование поведения магнитного поля в ванне сталеплавильной печи ДППТ-5 стандартной конфигурации с одним подовым электродом при следующих параметрах:  $I=6$  кА; радиус ванны по жидкому металлу  $R_e=1,245$  м; высота ванны по жидкому металлу и шлаку  $H_e=0,34$  м. Моделирование магнитного поля проводилось для токоподвода к подовому электроду, выполненного в виде винтовой линии  $R_y=1,2$  м,  $b=-0,3$  м,  $n=4$  ( $L_e \approx 30,2$  м) и в виде пространственной спирали Архимеда  $b=-0,3$  м,  $n=4$ ,  $a=0,048$  м ( $L_a \approx 15,3$  м).

При моделировании принималось, что ванна с расплавом находится в положительном полу-пространстве ( $z>0$ ) относительно  $xOy$ , а шина токоподвода располагается в отрицательном полу-пространстве ( $z<0$ ). Подина ванны, контактирующая с жидким металлом, расположена на расстоянии  $z=0,3$  м. Построены графики изменения осевой и радиальной составляющих напряженности магнитного поля в разных областях ванны при разной форме токоподвода. При этом учитывалось влияние магнитного поля только от токоподвода.

На **рис. 3** для токоподвода, выполненного в виде винтовой линии, показана зависимость осевой  $H_z$  и радиальной  $H_r$  проекций напряженности

магнитного поля по координате  $r$  на подине, на середине ванны по ее высоте и на ее свободной поверхности. Видно, что осевая и радиальная проекции напряженности магнитного поля имеют один порядок, при этом с приближением к краю витков ( $r \rightarrow R_y$ ) величина  $H_z$  снижается, а  $H_r$  возрастает. С увеличением расстояния  $z$  от токоподвода значения напряженностей магнитного поля снижаются.



**Рис. 3. Зависимости осевой (а) и радиальной (б) проекций напряженности магнитного поля по радиусу ванны для  $\varphi=\pi/3$ , создаваемых винтовой линией: 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)**

На **рис. 4** показаны аналогичные зависимости осевой  $H_z$  и радиальной  $H_r$  проекции напряженности магнитного поля для токоподвода, выполненного в виде пространственной спирали Архимеда, по координате  $r$ . Видно, что величина осевой проекции напряженности магнитного поля  $H_z$  примерно на один порядок больше, чем радиальная  $H_r$ . С возрастанием расстояния  $z$  от токоподвода значение напряженности магнитного поля снижается для обеих проекций. Также из графиков видно (рис. 4, б), что радиальная составляющая магнитного поля для пространственной спирали Архимеда вдоль координаты  $r$  имеет экстремум.

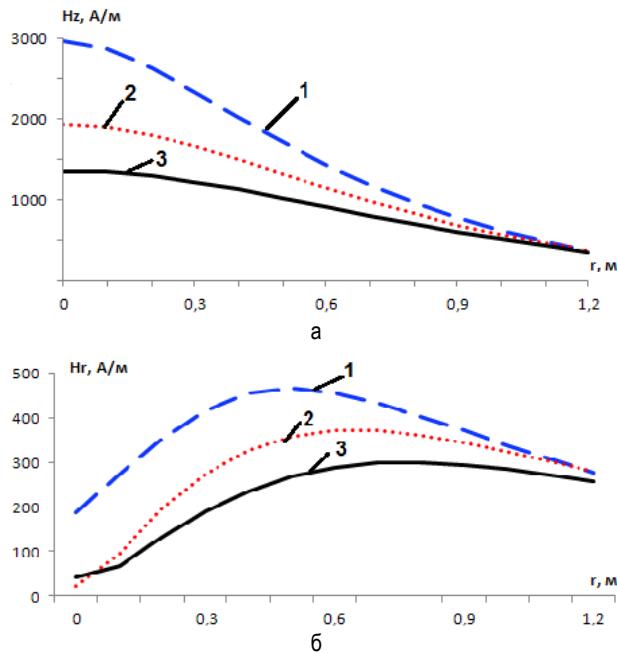


Рис. 4. Зависимости осевой (а) и радиальной (б) проекций напряженности магнитного поля по радиусу ванны, создаваемых пространственной спиралью Архимеда (при  $\varphi=\pi/3$ ): 1 – на подине ванны ( $z = 0,3$  м); 2 – на середине ванны по ее высоте ( $z=0,47$  м); 3 – на свободной поверхности ванны ( $z=0,64$  м)

Для токоподвода в виде винтовой линии проекция напряженности магнитного поля  $H_z$  при движении по координате  $r$  сначала практически не меняется до  $r/R_y < 0,5$ , а затем наблюдается ее резкое снижение (рис. 3, а). Для токоподвода в виде пространственной спирали Архимеда для величины осевой напряженности магнитного поля это снижение имеет плавный характер (рис. 4, а).  $H_z$  в обоих случаях имеют один порядок. С увеличением значений координаты  $r$  для винтовой линии наблюдаем плавный рост величины  $H_r$  (рис. 3, б), а для пространственной спирали Архимеда – максимальное значение поля (см. рис. 4, б).

Для плоской спирали Архимеда расчеты проводились для следующих условий:  $I=6$  кА,  $R_y=1,2$  м,  $a=0,048$  м,  $n=4$ , а расстояние от плоскости витка токоподвода до подины ванны, контактирующей с жидким металлом, составляет 0,3 м [4].

На рис. 5 показаны зависимости осевой и радиальной проекций напряженностей магнитного поля от координаты  $r$ , создаваемых токоподводом в виде плоской спирали Архимеда. Проекции  $H_z$  и  $H_r$  имеют величины одного порядка. При этом значение  $H_z$  имеет максимальные величины на оси. Для  $H_r$ , как и для пространственной спирали Архимеда, наблюдается максимальное значение поля при движении от оси ванны к периферии.

При сравнении пространственной и плоской

спиралей Архимеда можно сказать, что графики полученных кривых имеют похожий вид, но разные значения напряженностей. Для плоской спирали Архимеда величина осевой проекции напряженности магнитного поля в 1,3 раза больше на оси и практически нулевые значения при  $r=1,2$  м (рис. 5, а). Величина радиальной проекции напряженности магнитного поля на порядок больше (рис. 5, б), по сравнению с  $H_r$ , создаваемой пространственной спиралью Архимеда (см. рис. 4, б).

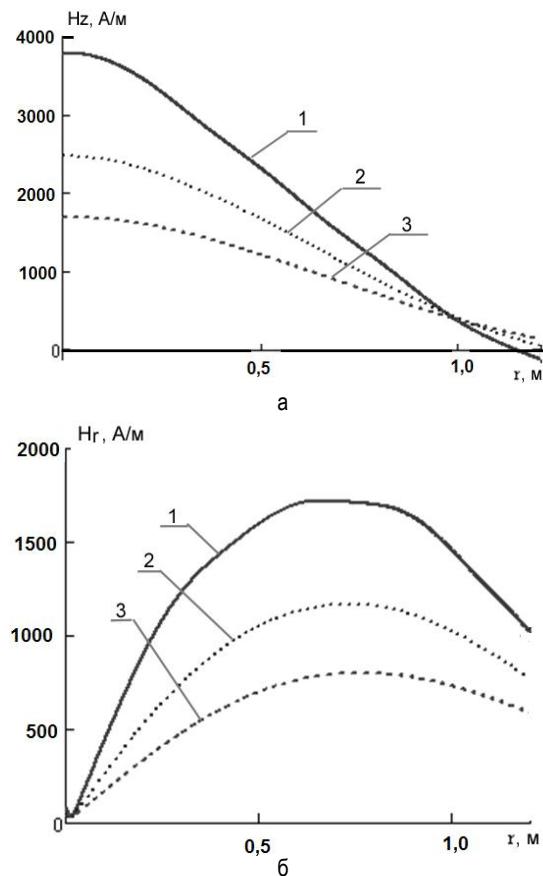
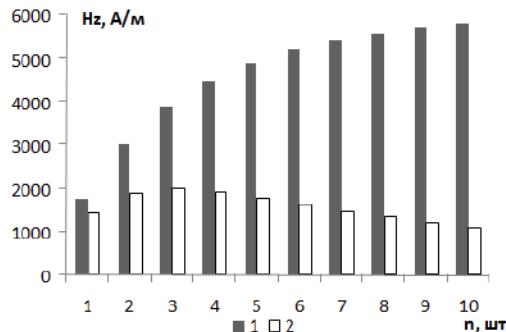


Рис. 5. Зависимости осевой (а) и радиальной (б) проекций напряженности магнитного поля от координаты  $r$ , создаваемых токоподводом в виде плоской спирали Архимеда (в): 1 – на подине ванны ( $z = 0,3$  м); 2 – на середине ванны по ее высоте ( $z=0,47$  м); 3 – на свободной поверхности ванны ( $z=0,64$  м)

Получена зависимость осевой проекции напряженности магнитного поля от числа витков для токоподводов разной конфигурации на середине ванны ( $r=0$ ,  $z=0,47$  м) (рис. 6). Видно, что для токоподвода в форме винтовой линии осевая проекция напряженности магнитного поля  $H_z$  плавно возрастает. Для токоподвода в форме пространственной спирали Архимеда  $H_z$  имеет максимальное значение при количестве витков  $n=3-4$ . При этом величина  $H_z$  в два раза меньше, чем для токоподвода в форме винтовой линии.



**Рис. 6. Зависимость осевой напряженности магнитного поля от числа витков, при  $r=0$ ,  $z=0,47$  м для токоподводов разной формы: 1 – винтовая линия; 2 – пространственная спираль Архимеда**

### Выводы

Создана математическая модель поведения горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля в ванне дуговой печи при разных конструкциях токоподвода к подовому электроду.

Посредством компьютерного моделирования установлено, что с увеличением количества витков токоподвода в виде пространственной спирали Архимеда наиболее рациональным является токоподвод из 2–3 витков. Для токоподвода в форме винтовой линии число витков должно быть не более 5–6, так как с их дальнейшим увеличением величина магнитного поля возрастает несущественно. Наиболее перспективной является конструкция токоподвода в форме плоской

спирали Архимеда, так как при прочих равных условиях при компактной форме она обеспечивает высокие значения напряженности магнитного поля в обрабатываемом расплаве.

Результаты данной работы могут быть полезны проектным организациям, занимающимся конструированием новых и модернизацией действующих дуговых печей постоянного тока по выплавке металлов и сплавов.

### Список литературы

1. Ячиков И.М., Портнова И.В., Харченко О.А. Характер электровихревого течения металла в ванне ДЛПП при изменении положения катода // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2009. № 3. С. 18–20.
2. Пат. 119556 на ПМ РФ, МКИ7 H05B 7/20. Электродуговая печь постоянного тока / Портнова И.В., Ячиков И.М., Харченко О.А.
3. Пат. 126810 на ПМ РФ, МКИ7 F27B3/08. Электродуговая печь постоянного тока / Ячиков И.М., Портнова И.В., Заляутдинов Р.Ю.
4. Ячиков И.М., Портнова И.В. Оценка эффективности электровихревого и кондукционного воздействия на расплав в ванне ДЛПП // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 418–423.
5. Ячиков И.М., Заляутдинов Р.Ю. Исследование магнитного поля в ванне дуговой печи постоянного тока при разной форме токоподводящей шины к подовому электроду // Изв. вузов. Черная металлургия. 2014. № 3. С. 58–63.
6. Ячиков И.М., Портнова И.В., Заляутдинов Р.Ю. Моделирование поведения магнитного поля в ванне ДЛПП при разных конструкциях токоподвода к подовому электроду // Математическое и программное обеспечение в промышленной и социальной сферах: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 183–190.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## BEHAVIOR OF A MAGNETIC FIELD IN A BATH OF A DC ARC FURNACE WITH DIFFERENT DESIGNS OF A SUPPLY RAIL TO A BOTTOM ELECTRODE

**Yachikov Igor Mikhailovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-63. E-mail: jachikov@mail.ru.

**Portnova Irina Vasilyevna** – Engineer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-63.

**Abstract.** This paper gives a mathematical model to determine the magnetic fields near conductors to the bottom electrode of a DC arc furnace (DCAF) in the form of a helical line, a planar or spatial spiral of Archimedes. A computer simulation is used to analyze magnetic fields in a DCAF bath. Recommendations for the design parameters of the supply rail are given.

**Keywords:** DC arc furnace, magnetic field, conductors.

### References

1. Yachikov I.M., Portnova I.V., Kharchenko O.A. A character of an eddy flow of metal in a bath of a DC arc furnace, when changing a position of a cathode. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2009, no. 3, pp. 18–20.
2. Utility model patent RU 119556 IPC7 H05B 7/20. DC electrical arc furnace. Portnova I.V., Yachikov I.M., Kharchenko O.A.
3. Utility model patent RU 126810 IPC7 F27B3/08. DC electrical arc furnace. Yachikov I.M., Portnova I.V., Zalyautdinov R.Yu.
4. Yachikov I.M., Portnova I.V. Evaluating efficiency of an eddy and conduction impact on the melt in the DCAF bath. *Teoriya i praktika teplovykh protsessov v metallurgii: sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Theory and practice of thermal processes in metallurgy. Collection of reports of the international scientific and practical conference]. Yekaterinburg: UFU, 2012, pp. 418–423.
5. Yachikov I.M., Zalyautdinov R.Yu. Investigation of a magnetic field in a bath of a DC arc furnace at different busbars to the bottom electrode. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2014, no. 3, pp. 58–63.
6. Yachikov I.M., Portnova I.V., Zalyautdinov R.Yu. Modeling the behavior of a magnetic field in the bath of DCAF at different designs of current feeders to the bottom electrode. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie v promyshlennoj i sotsialnoj sfere: mezhdunarodnyj sbornik nauchnykh trudov* [Mathematical support and software in industrial and social spheres: international collection of research papers]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, pp. 183–190.