

**ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА В ВАННЕ  
ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ**

*Ячиков И.М., Ларина Т.П.*

**Аннотация.** В дуговой печи постоянного тока происходит электромагнитное перемешивание жидкого металла за счет объемных электромагнитных сил, возникающих при взаимодействии тока, протекающего по ванне от пятна дуги к подовому электроду, с собственным магнитным полем. Для дуговой печи постоянного тока с осесимметричным расположением подового электрода получены выражения для определения мощности и кинетической энергии расплава при электровихревом перемешивании. В результате моделирования выявлены основные факторы, влияющие на мощность и кинетическую энергию электровихревых течений. Установлено, что мощность электровихревых течений, определяющих перемешивание металла в ванне дуговой печи, пропорциональна плотности расплава, кубу тока дуги и расстоянию между пятном дуги и подовым электродом. Кроме этого, мощность определяется их интенсивностью, которая зависит от размеров и конфигурации подового электрода и пятна дуги.

**Ключевые слова:** дуговая печь постоянного тока, электровихревые течения, объемная электромагнитная сила, перемешивание расплава, ток дуги, математическая модель, подовый электрод.

**ASSESSMENT OF POWER OF HASHING OF FUSION IN THE BATHTUB THE ARC FURNACE OF THE  
DIRECT CURRENT UNDER ACTION ELECTROVORTEX CURRENTS**

*Yachikov I.M., Larina T.P.*

**Abstract.** In the arc furnace of a direct current there is an electromagnetic hashing of liquid metal at the expense of the volume electromagnetic forces arising at interaction of the current proceeding on a bathtub from an arch spot to a bottom electrode with own magnetic field. For the arc furnace of a direct current with an ax symmetric arrangement of a bottom electrode expressions for determination of power and kinetic energy of fusion at electrovortex hashing are received. As a result of the mathematical analysis and computer modeling the major factors influencing the power and kinetic energy of electrovortex currents are revealed. It is established that the power of the electrovortex currents defining hashing of metal in a bathtub of the arc furnace is proportional to the fusion density, a cube of current of an arch and distance between a spot of an arch and a bottom electrode. Besides, power is defined by their intensity which depends on the sizes and a configuration of a bottom electrode and a spot of an arch.

**Keywords:** arc furnace of a direct current, electrovortex currents, volume electromagnetic force, fusion hashing, arch current, mathematical model, bottom electrode.

**Введение**

Дуговые печи постоянного тока (ДППТ) находят широкое применение в «малой» металлургии машиностроительного и литейного производства при выплавке стали, чугуна, цветных металлов и сплавов, переработке шлаков. В отличие от дуговых печей трехфазного переменного тока они обладают важным преимуществом, связанным с наличием токонесящего расплава, что дает более широкие возможности применения электромагнитного перемешивания, прежде всего посредством электровихревых течений (ЭВТ).

В дуговой печи постоянного тока происходит электромагнитное перемешивание жидкого металла за счет объемных электромагнитных сил (ОЭМС), возникающих из-за взаимодействия тока, протекающего по ванне от пятна дуги к подовому электроду, с собственным магнитным полем. Подобное перемешивание расплава посредством электровихревых течений наблюдается и в печах переменного тока в области воздействия электрических дуг на расплав [1]. По мнению ряда исследователей, мощность этого перемешивания относительно невелика. Так по данным японских специалистов, в 100 т печи интенсивность этого перемешивания примерно такая же, как и при донной продувке ванны инертным газом с расходом  $6 \text{ м}^3/\text{ч}$  [2].

Сравнительно полно изучено перемешивание с использованием механических мешалок. Имеются методики и математические модели, отражающие физический механизм процесса и позволяющие осуществлять расчеты гидродинамики, теплообмена и массообмена с учетом свойств среды, конструкций мешалок и размеров аппаратов. Менее изучены проблемы массообмена в системах жидкость – жидкость, а также выравнивания концентраций перемешиваемых веществ в микроскопических объемах.

При оценочных расчетах мощность, потребляемая на перемешивание, определяется по формуле [9]

$$P = K\gamma \cdot n^3 d_m^5, \tag{1}$$

где  $\gamma$  – плотность перемешиваемой среды,  $n$  – частота вращения мешалки,  $d_m$  – ее диаметр,  $K$  – коэффициент мощности, зависящий от типа мешалки, размеров и конструкции аппарата, а также от свойств среды. При турбулентном режиме для ньютоновских жидкостей  $K$  мало изменяется от скорости вращения, а при ламинарном зависит от числа Рейнольдса  $Re_m = nd_m^2/\nu$ . При его увеличении  $K$  уменьшается и для  $Re_m > 500$  коэффициент мощности становится порядка единицы [9].

Для электровихревых течений, возникающих в токонесущем расплаве, необходимо отметить, что в литературе достаточно мало надежных данных по оценке эффективности и (или) мощности перемешивания металла.

Целью работы является оценка мощности электровихревых осесимметричных течений, возникающих в ванне расплава ДППТ, влияющих на эту мощность факторов посредством математического и компьютерного моделирования.

### Математическая модель для оценки мощности перемешивания расплава в ванне

Объемную электромагнитную силу  $\vec{f}$ , действующую на единицу токонесущего объема жидкости, в произвольной точке можно определить как [3]

$$\vec{f} = \mu_0 \cdot \vec{j} \times \vec{H} \quad (2)$$

или через проекции плотности тока и магнитного поля в цилиндрической системе координат как

$$\vec{f} = \mu_0(J_\varphi H_z - J_z H_\varphi)\vec{e}_r + \mu_0(J_z H_r - J_r H_z)\vec{e}_\varphi + \mu_0(J_r H_\varphi - J_\varphi H_r)\vec{e}_z, \quad (3)$$

где  $\vec{j}$  – плотность тока;  $\vec{H}$  – значение напряженности магнитного поля, создаваемого токами, протекающими через объем, на который эта сила действует.

В ванне с осесимметричным растеканием тока имеем только азимутальную составляющую магнитного поля  $H_\varphi$  и две составляющие плотности тока (радиальную  $J_r$  и вертикальную  $J_z$ ) [4]. Поэтому выражение (3) принимает следующий вид

$$\vec{f} = \vec{f}_r + \vec{f}_z = -\mu_0 J_z H_\varphi \vec{e}_r + \mu_0 J_r H_\varphi \vec{e}_z. \quad (4)$$

Из него видно, что объемная электромагнитная сила  $\vec{f}$  имеет две проекции:  $f_r$  и  $f_z$ .

Для дальнейшего анализа распишем составляющие ротора силы ( $rot \vec{f} = \nabla \times \vec{f}$ ) в цилиндрической системе координат [3]:

$$(rot \vec{f})_r = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial f_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial f_\varphi}{\partial z}; \quad (5)$$

$$(rot \vec{f})_\varphi = \frac{\partial f_r}{\partial z} - \frac{\partial f_z}{\partial r}; \quad (6)$$

$$(rot \vec{f})_z = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial(r f_\varphi)}{\partial r} - \frac{\partial f_r}{\partial \varphi} \right). \quad (7)$$

Учитывая, что  $f_\varphi = 0$  и  $(\partial f_z)/\partial \varphi = (\partial f_r)/\partial \varphi = 0$ , получим, что  $(rot \vec{f})_r = (rot \vec{f})_z = 0$ . Объемные электромагнитные силы имеют вихревой характер из-за того, что ток, проходя по ванне от подового электрода к области пятна дуги, пространственно неоднороден ( $(rot \vec{f})_\varphi \neq 0$ ).

Следствием этого является то, что сила Лоренца приводит жидкость в движение и производит над ней механическую работу. На первый взгляд может показаться, что имеется противоречие, так как чаще всего сила Лоренца не производит над движущимися зарядами никакой работы, а лишь меняет направление их движения. В действительности, как показано в работе [10], никакого противоречия здесь нет. При воздействии магнитного поля на проводники в работу сил Лоренца входит не только механическая работа, но и работа электродвижущих сил, индуцированных в проводнике при его движении. Эти две работы равны по величине и противоположны по знаку.

При протекании тока заданной плотности  $J$  через проводник диссипация энергии не зависит от того, движется проводник или нет, поэтому джоулево тепло определяется законом

Ома:  $q_v = \frac{J^2}{\sigma} = JE$ . Однако если проводник движется со скоростью  $\vec{W}$ , то вместо напряженности электрического поля  $\vec{E}$  необходимо брать «эффективную» напряженность электрического поля  $\vec{E}_{\text{эф}} = (\vec{E} + \mu_0 \vec{W} \times \vec{H})$ , которая создает ток проводимости. Согласно закону Фарадея возникает дополнительная ЭДС при изменении магнитного потока за счет движения проводника (при неизменном магнитном поле).

Таким образом, при осесимметричном прохождении постоянного тока по ванне ДППТ объемная электромагнитная сила имеет лишь две проекции:  $f_r$  и  $f_z$ , которые порождают плоский вихревой характер движения жидкости, при этом азимутальная составляющая ОЭМС отсутствует. Течение жидкости в ванне носит вихревой характер и возникает за счет энергии внешнего источника ЭДС.

Известно, что наиболее интенсивные ЭВТ наблюдаются в районе пятна дуги и вблизи подового электрода [4-6]. Удельная мощность ЭВТ на единицу объема определяется как скалярное произведение векторов силы и скорости  $p = f(r, z) \cdot W(r, z)$ . Полная мощность ЭВТ в ванне определяется интегралом удельной мощности по всему объему ванны (ванна представляет собой усеченный конус высотой  $H_e$ )

$$P = \int_V p dV = 2\pi \int_0^{H_e} \int_0^{r_B(z)} r \cdot [f_r(r, z) \cdot W_r(r, z) + f_z(r, z) \cdot W_z(r, z)]_r dr dz, \quad (7)$$

где  $W_r$  и  $W_z$  – радиальная и осевая проекции скорости расплава.

Интеграл (7) имеет два слагаемых. Первое представляет собой составляющую мощности за счет радиальных течений  $P_r$ , а второе – за счет вертикальных течений  $P_z$ .

Кинетическая энергия расплава при электровихревом перемешивании складывается из кинетических энергий осевого  $E_z$  и радиального  $E_r$  движения объемов металла

$$E = \frac{\gamma}{2} \int_V W^2 dV = \gamma\pi \int_0^{H_e} \int_0^{r_B(z)} r \cdot [W_r^2(r, z) + W_z^2(r, z)]_r dr dz. \quad (8)$$

В качестве объекта моделирования выбрана трехтонная сталеплавильная ДППТ стандартной конфигурации, имеющая следующие параметры:  $R_B = 840$  мм – радиус ванны на ее свободной поверхности;  $r_B = 500$  мм – радиус ванны на уровне ее подины; угол откоса ванны  $45^\circ$ ;  $X_2 = 100$  мм – радиус подового электрода, ось которого совпадает с осью ванны. Проведены расчеты при следующих свойствах жидкой стали:  $\sigma = 6 \cdot 10^5$  (Ом·м)<sup>-1</sup> – электрическая проводимость,  $\gamma = 7000$  кг/м<sup>3</sup> – плотность,  $\nu = 8,57 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с – кинематическая вязкость, радиус пятна дуги на поверхности металла определяется плотностью тока  $5$  А/мм<sup>2</sup>.

С использованием математической модели, описанной в работах [5-6], разработана программа [8], позволяющая для выбранной геометрии ванны и подового электрода при заданном токе дуги рассчитывать поле электрических потенциалов, распределение плотности тока и напряженности магнитного поля, далее, стационарные (или нестационарные) ЭВТ в ванне расплава.

Посредством моделирования получены зависимости мощности перемешивания и кинетической энергии расплава жидкой стали в ванне ДППТ посредством ЭВТ, при изменении глубина ванны  $H_e$  при токе дуги  $I_d = 10$  кА (рис. 1). Видно, что полная мощность  $P$  и энергия  $E$  установившихся ЭВТ растут пропорционально увеличению расстояния между пятном дуги и подовым электродом.

При увеличении глубины ванны падение напряжения на ней растет практически линейно и составляет  $U = 160-186$  мВ. Соответственно мощность джоулева тепловыделения в ванне при токе через ванну  $10$  кА составляет  $P_{\text{дж}} = U \cdot I_d = 1,6-1,86$  кВт. При неизменном токе через ванну при разной ее глубине доля мощности ЭВТ от джоулева тепловыделения практически не изменяется и составляет

$$\eta = \frac{P_r + P_z}{P_{\text{дж}}} 100\% \approx 0,19\%.$$

Кинетическая энергия течения жидкости пропорциональна  $\gamma$ , что видно из уравнения (8). Скорость жидкости в ванне прямо пропорциональна параметру электровихревого течения  $S_3 = \frac{\mu_0 I_d^2}{4\pi^2 \gamma v^2}$ , а значит обратно пропорциональна плотности расплава, отсюда мощность ЭВТ будет также пропорциональна  $\gamma$ .

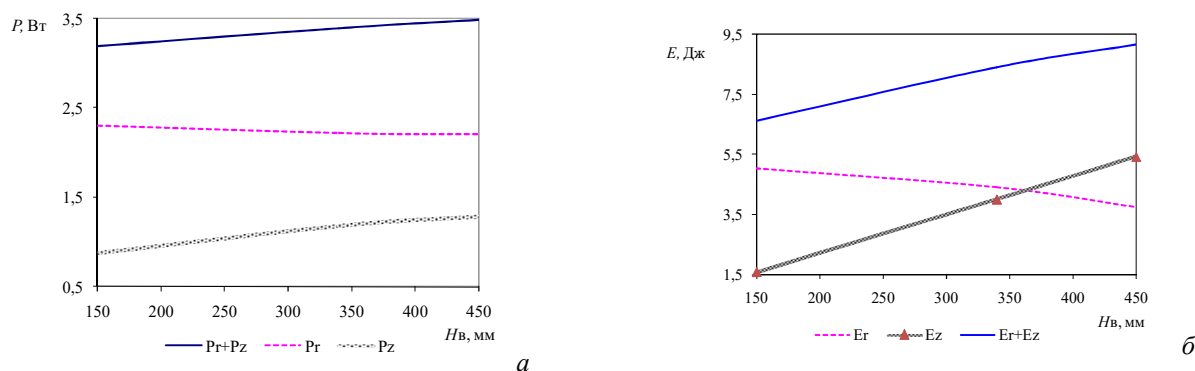


Рис. 1. Полная, радиальная и осевая составляющие мощности (а) и энергии (б) электровихревого перемешивания расплава в зависимости от глубины ванны

На рис. 2 показана функция изменения мощности электровихревого перемешивания в зависимости от тока дуги. Установлено, что мощность от тока определяется зависимостью

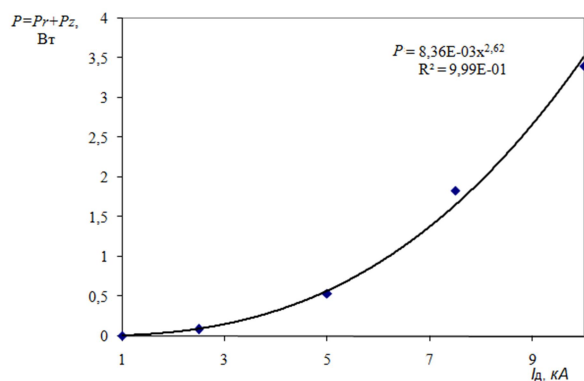


Рис. 2. Мощность электровихревого перемешивания в зависимости от тока дуги

близкой к кубической. В работах [4-7] показано, что объемные электромагнитные силы пропорциональны квадрату плотности тока, а локальные скорости ЭВТ при токах  $I_d > 0,5$  кА пропорциональны плотностям тока в районе пятна дуги и подового электрода.

Локальные скорости расплава  $W$  в ванне пропорциональны протекающему через электроды току и могут быть представлены в виде уравнения линейной регрессии [5, 6]

$$W - W_{0,5} = n(I_d - 0,5), \quad (9)$$

где  $W_{0,5}$  – локальная скорость расплава при токе 0,5 кА;  $n$  – коэффициент пропорциональности.

нальности.

Оценка полной мощности электровихревых течений показывает, что при  $I_d > 0,5$  кА она должна быть пропорциональна кубу тока  $P \sim I_d^3$ , а также пропорциональна кубу характерной скорости жидкости  $P \sim W^3$ . Данные зависимости подтверждает и то, что доля мощности ЭВТ от джоулева тепловыделения прямо пропорционально току дуги  $\eta = 0,019 \cdot I_d$  (%/кА).

Анализ уравнения (1) показал, что мощность, потребляемая на перемешивание с использованием механических мешалок, пропорциональна плотности расплава, кубу характерной скорости и квадрату характерного размера  $P \sim \gamma \cdot W^3 L^2$ .

Мощность электровихревого перемешивания по аналогии механическими мешалками записывается в виде:

$$P \sim \gamma \cdot W^3 L^2 \sim \gamma \cdot I_d^3 L_1 L_2, \quad (10)$$

где  $L_1$  – характерный размер, определяющий расстояние между пятном дуги и подовым электродом;  $L_2$  – характерный размер, определяющий интенсивность ЭВТ и связанный с размерами и конфигурацией подового электрода и пятна дуги.

**Заключение**

1. Выявлены основные факторы, влияющие на мощность электровихревых течений, возникающих в дуговой печи постоянного тока с осесимметричным расположением подового электрода.

2. В результате математического анализа и компьютерного моделирования установлено, что мощность ЭВТ, идущая на перемешивание металла в ванне ДППТ пропорциональна плотности расплава и кубу тока, протекающего через расплав.

3. Мощность перемешивания ванны возрастает при увеличении расстояния между пятном дуги и подовым электродом.

**Список использованных источников**

1. Дуговые печи постоянного тока в современном электросталеплавильном производстве / И.Ю. Зиннуров [и др.] // Электротехнология. – 2005. – № 10. – С. 3-12.
2. Stell Times Int. 1992. Sept. P. 12-13.
3. Жидкий металл под действием электромагнитных сил / Ю.М. Гельфгат, О.А. Лиелаусис, Э.В. Щербинин. – Рига : Зинатне, 1975. – 248 с.
4. Моделирование электромагнитных процессов в электродуговых печах постоянного тока/ И.М. Ячиков [и др.] – Магнитогорск : МГТУ, 2005. – 139 с.
5. Ячиков, И.М. Моделирование электровихревых течений в ванне электродуговой печи постоянного тока / И.М. Ячиков, О.И. Карандаева, Т.П. Ларина. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 234 с.
6. Ячиков, И.М. Моделирование электровихревых течений расплава в ванне ДППТ с осесимметричным подовым электродом // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 1. – С. 11–16.
7. Ячиков, И.М. Моделирование объемных электромагнитных сил в ванне расплава ДППТ / И.М. Ячиков, В.Н. Манагаров // Вестник Самарского государственного университета. – 2008. – №6 (65). – С. 330 – 340.
8. Ячиков, И.М. Электромагнитные процессы в ванне дуговой печи / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, В.Н. Манагаров : Свидетельство РФ о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012661209. ОБПТБ. – 2012. – № 5. – С. 589.
9. Брагинский, Л.Н. Перемешивание в жидких средах / Л.Н. Брагинский, В.И. Бегачев, В.М. Барабаш. – Л. : Химия, 1984.- 336 с.
10. Ландау, Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : Наука, 1982.– 620 с.

**Ячиков Игорь Михайлович** – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры вычислительной техники и программирования ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

E-mail: jachikov@mail.ru.

**Ларина Татьяна Петровна** – старший преподаватель кафедры электротехники и электротехнических систем ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

E-mail: tp\_larina@mail.ru.

---

Ячиков И.М., Ларина Т.П. Оценка мощности перемешивания расплава в ванне дуговой печи постоянного тока под действием электровихревых течений // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2016. – Т.4. – №2. – С. 21-25.

Yachikov, I.M. and Larina, T.P. (2016) Assessment of power of hashing of fusion in the bathtub the arc furnace of the direct current under action electrovortex currents. Software of systems in the industrial and social fields, 4 (2): 21-25.

---