

УДК 621.365.2

ПОВЕДЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ДУГУ В ТРЕХФАЗНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ

Ячиков И.М., д.т.н., доцент, профессор кафедры

вычислительной техники и программирования (jachikov@mail.ru)

Костылева Е.М., аспирант кафедры вычислительной техники и программирования

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

(455000, Россия, Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

Аннотация. Дана математическая модель для определения основных локальных и среднеинтегральных электромагнитных сил, действующих на дуговые разряды в условиях трехфазной дуговой печи. Это силы, действующие на столб дуги от токов, протекающих через жидкий металл, силы электромагнитного взаимодействия дуги с другими дугами и токами, протекающими через графитированные электроды и силы взаимодействия дуги с собственным магнитным полем. Посредством компьютерного моделирования показано, что в трехфазной дуговой печи при расстоянии между электродами меньше 1,5 – 2,5 длины дуги наиболее существенное влияние на поведение электрической дуги и ее форму оказывают силы электромагнитного взаимодействия между токами, протекающими через дуги и графитированные электроды, а при больших расстояниях силы взаимодействия дуг с токами, протекающими через жидкий металл. Установлено, что средняя результирующая электромагнитная сила, действующая на дугу, может существенно отклонять ее в сторону от прямой, соединяющей центр распада электродов и ось электрода.

Ключевые слова: трехфазная дуговая печь, электрическая дуга, столб электрической дуги, электромагнитная сила, выпрямляющая сила, пинч-эффект.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-7-479-485

В настоящее время трехфазные электродуговые печи применяются для выплавки черных, цветных металлов и их сплавов. Источником тепла в них служат электрические дуги. От положения, формы и динамики дуги во многом зависят тепловое состояние металла и шлака, стойкость футеровки печи. Эти факторы необходимо учитывать при конструировании и эксплуатации печей, а также автоматизации их работы.

Дуга представляет собой легкоподвижный проводник, на который действуют электромагнитные силы:

- со стороны токов, протекающих между дугами через жидкий металл;
- со стороны токов, протекающих через графитированные электроды и другие дуги;
- сжатия дуги посредством пинч-эффекта;
- выпрямляющие дугу при ее изгибе.

Поведение и влияние каждой из этих четырех сил на электрическую дугу рассматривалось как отечественными, так и зарубежными исследователями.

Немецкий инженер И. Вочке определил силу сжатия дуги посредством пинч-эффекта и силу, действующую на металл в трехфазной дуговой печи со стороны тока дуги. Назвав ее угловой силой, он установил, что наибольшее ее значение достигается в зонах привязки дуги на расплав [1]. А.В. Егоров получил зависимость средней электромагнитной силы F_m взаимодействия дуги с полем тока, протекающего через жидкий металл перпендикулярно току дуги, и зависимость средней

силы F_d взаимодействия дуги с током, протекающим через соседнюю дугу и параллельный графитированный электрод [2]. Им было также показано, что F_d составляет 2 – 5 % F_m и снижается с уменьшением длины дуги.

В работах [3 – 5] было показано, что в трехфазной печи при изменении полярности тока возникают две различные формы дуги, которые ведут себя по-разному. При их усреднении во времени было установлено, что дуги отклоняются от вертикали на угол $\theta = 45 - 65^\circ$. Ю.М. Миронов рассмотрел силы, действующие на электрическую дугу в дуговой печи постоянного тока от горизонтального и вертикального участков токоподвода. Им получены зависимости для определения сил, действующих на дугу у поверхности металла (максимальное значение) и у конца электрода (минимальное значение) и приведено значение угла отклонения дуги от зеркала ванны $\chi = 90^\circ - \theta = 25 - 45^\circ$ [6].

При рассмотрении этих и других работ осталось не совсем понятным, как получены формулы для расчета некоторых сил, нет детального анализа поведения и роли отдельных электромагнитных сил, воздействующих на дугу в условиях трехфазной печи переменного тока в зависимости от расположения и геометрии электродов, токов, длин дуг и прочих параметров. Однако для электрометаллургической теории и практики важно знать методы расчета как локальных электромагнитных сил, действующих на элементы дуги, так и среднеинтегральных сил, действующих на дугу.

Целью данной работы является описание математической модели для расчета основных электромагнитных локальных и среднеинтегральных сил, действующих на дугу, анализ влияния этих сил на поведение электрической дуги в условиях трехфазной дуговой печи.

Рассмотрим электромагнитную силу, действующую на столб дуги, от токов, протекающих через жидкий металл в трехфазной дуговой печи переменного тока. Будем считать, что оси дуг горят перпендикулярно поверхности металлической ванны (оси их совпадают с осями электродов), действующее значение линейных токов одинаковое. Электрическая ось токопроводящего слоя между дугами расположена на глубине Δ от поверхности металла [2]. Для жидкой стали эту величину можно принять примерно равной половине глубины проникновения поля промышленной частоты

$$\Delta \approx \Delta_0/2 = 3,2 - 3,6 \text{ см},$$

где $\Delta_0 = \sqrt{\rho / (\pi \mu_0 \nu)}$; ρ – удельное электросопротивление жидкой стали; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (В} \cdot \text{с) / (А} \cdot \text{м)}$ – магнитная постоянная; $\nu = 50 \text{ Гц}$ – промышленная частота.

Проанализируем электромагнитную силу, действующую на ток дуги i_0 со стороны тока, протекающего через металл от другой дуги i_1 (рис. 1). Для этого найдем напряженность магнитного поля в точке A , находящейся на дуге длиной l_d , создаваемого прямым горизонтальным отрезком провода CB длиной l , через который протекает ток i_1 . Ее можно определить как [6]

$$H = \frac{i_1}{4\pi(\Delta + z)} (\cos(\alpha) - \cos(\alpha_0)).$$

Вектор напряженности магнитного поля перпендикулярен плоскости ABC (см. рис. 1). Подставляя $\alpha_0 = \pi/2$ и $\cos(\alpha) = \frac{l}{\sqrt{l^2 + (\Delta + z)^2}}$, получим

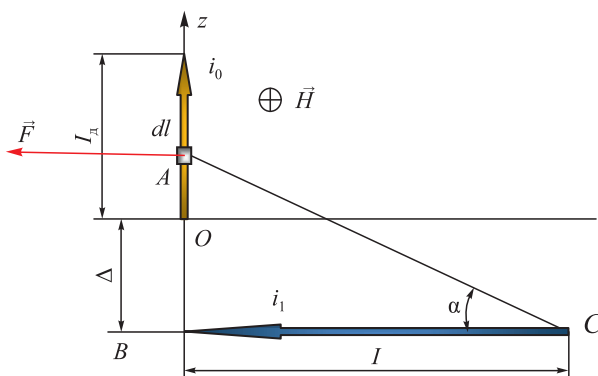


Рис. 1. К расчету напряженности магнитного поля и электромагнитной силы на проводник со стороны перпендикулярного проводника конечной длины

Fig. 1. To the calculation of the magnetic field and the electromagnetic force acting on the conductor, from the perpendicular conductor of finite length

$$H = \frac{i_1}{4\pi(\Delta + z)} \frac{l}{\sqrt{l^2 + (\Delta + z)^2}}. \quad (1)$$

Сила, действующая на элемент дуги dl в точке A , совпадает с направлением тока i_1 , и модуль ее определяется как $dF = \mu_0 i_0 dl H$. Локальная электромагнитная сила, действующая на единицу длины дуги

$$\frac{dF}{dl} = f_m = \frac{i_0 i_1 \mu_0}{4\pi(\Delta + z)} \frac{l}{\sqrt{l^2 + (\Delta + z)^2}}. \quad (2)$$

Это уравнение совпадает с уравнением, полученным Ю.М. Мироновым [6]. Полная сила, действующая на проводник l_d

$$F = \frac{\mu_0 i_0 i_1 l_d}{4\pi} \int_0^{l_d} \frac{1}{(\Delta + z) \sqrt{l^2 + (\Delta + z)^2}} dz. \quad (3)$$

Интеграл в этом выражении можно взять по частям, получим

$$F = \frac{\mu_0 i_0 i_1}{4\pi} \ln \left[\frac{(\sqrt{l^2 + \Delta^2} + l)(\Delta + l_d)}{\Delta(\sqrt{(l_d + \Delta)^2 + l^2} + l)} \right]. \quad (4)$$

Найдем токи, протекающие через жидкий металл в трехфазной дуговой печи переменного тока. Считаем, что в электрической схеме замещения три фазы приемника имеют одинаковые фазные сопротивления $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$, которые соединены по схеме «треугольник». Тогда, независимо от характера нагрузки, напряжение на каждой фазе приемника равно линейному напряжению $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$, но фазные и линейные токи не равны между собой [7].

При заданном напряжении и сопротивлении фаз нагрузки фазные токи можно определить как

$$i_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_{AB}} = I \sin(\omega t); \quad i_{BC} = \frac{U_{BC}}{Z_{BC}} = I \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$i_{CA} = \frac{U_{CA}}{Z_{CA}} = I \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right),$$

где I – амплитудное значение фазного тока. Соответственно линейные токи: $i_1 = i_A = i_{AB} - i_{CA}$; $i_2 = i_C = i_{CA} - i_{BC}$; $i_3 = i_B = i_{BC} - i_{AB}$. Сила тока, проходящего через фазу A

$$i_A = i_1 = i_{AB} - i_{CA} = I\sqrt{3} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right).$$

Рассмотрим электромагнитную силу, действующую на ток дуги $i_1 = i_A$ со стороны трех фазных токов i_{AB} , i_{BC} , i_{CA} , протекающих через металл. Результирующая сила есть векторная сумма трех сил F_{AB} , F_{BC} , F_{CA} , модуль каждой из которых зависит от среднего значения произведения токов [8]:

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_{AB} i_A dt = \frac{3}{4} I^2; \quad \frac{1}{T} \int_0^T i_{CA} i_A dt = -\frac{3}{4} I^2; \quad \frac{1}{T} \int_0^T i_{BC} i_A dt = 0.$$

Данные выражения говорят о том, что на дугу фазы A действуют только силы со стороны фазных токов i_{AB} и i_{CA} . Направление сил $\vec{F}_{AB}$, $\vec{F}_{CA}$ и их равнодействующая $\vec{F}_{M1}$, а также направления подобных сил на дуги других фаз показаны на рис. 2. Модуль равнодействующей силы пропорционален $3I^2/4$. С учетом действующего значения линейного тока $I_{дл} = \frac{\sqrt{3}I}{\sqrt{2}}$, получим среднее интегральное значение силы, действующей на дугу

$$F_M = \frac{\mu_0 I_{дл}^2}{8\pi} \ln \left[\frac{(\sqrt{l^2 + \Delta^2} + l)(\Delta + l_d)}{\Delta(\sqrt{(l_d + \Delta)^2 + l^2} + l)} \right], \quad (5)$$

и локальное среднее значение электромагнитной силы, действующей на единицу длины дуги

$$f_M(z) = \frac{\mu_0 I_{дл}^2}{8\pi} \frac{1}{(\Delta + z)} \frac{l}{\sqrt{l^2 + (\Delta + z)^2}}.$$

Уравнение (5) совпадает с полученным в работе [2] с точностью до коэффициента перед логарифмом.

Рассмотрим вторую электромагнитную силу, действующую на столб дуги – силу электромагнитного взаимодействия с другими дугами и токами, протекающими

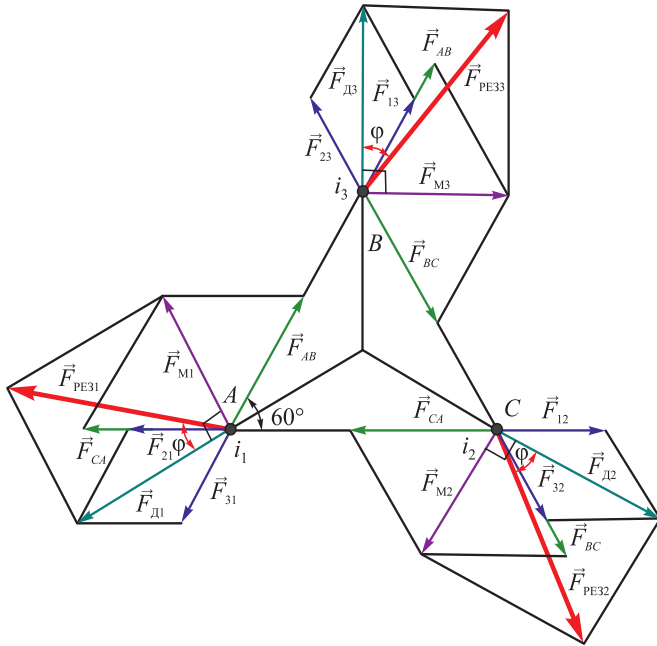


Рис. 2. Направления средних электромагнитных сил, действующих на электрические дуги в трехфазной печи:

$\vec{F}_{Mi}$ – силы со стороны токов, протекающих между дугами через жидкий металл; $\vec{F}_{di}$ – силы со стороны токов, протекающих через дуги и графитированные электроды; $\vec{F}_{PE3i}$ – результирующие силы

Fig. 2. Directions of the average electromagnetic forces acting on the three-phase electric arc furnace:

$\vec{F}_{Mi}$ – the forces from the currents flowing between arcs through the liquid metal; $\vec{F}_{di}$ – the forces from the currents flowing through the arc and graphite electrodes; $\vec{F}_{PE3i}$ – the resultant forces

через графитированные электроды. Она действует на ток дуги i_0 со стороны другого тока i_1 , протекающего по графитированному электроду длиной $l_{эд}$ и дуге длиной l_d (рис. 3). Найдем напряженность магнитного поля, создаваемого прямым вертикальным отрезком провода BC длиной $l_d + l_{эд}$, через который протекает ток i_1 , в точке A , находящейся на дуге. Вектор напряженности магнитного поля перпендикулярен плоскости ABC . Подставляя в уравнение (1)

$$\cos(\alpha_1) = \frac{z}{\sqrt{l^2 + z^2}};$$

$$\cos(\alpha_2) = \cos(\pi - \alpha_3) = -\cos(\alpha_3) = -\frac{l_d + l_{эд} - z}{\sqrt{l^2 + (l_d + l_{эд} - z)^2}},$$

получим

$$H = \frac{i_1}{4\pi l} \left(\frac{z}{\sqrt{l^2 + z^2}} + \frac{l_d + l_{эд} - z}{\sqrt{l^2 + (l_d + l_{эд} - z)^2}} \right). \quad (6)$$

Сила, действующая на элемент дуги dl в точке A , перпендикулярна направлению тока i_1 и модуль ее определяется как $dF = \mu_0 i_0 dl H$. Локальная электромагнитная сила, действующая на единицу длины дуги

$$\frac{dF}{dl} = f_d = \frac{i_1 i_0 \mu_0}{4\pi l} \left(\frac{z}{\sqrt{l^2 + z^2}} + \frac{l_d + l_{эд} - z}{\sqrt{l^2 + (l_d + l_{эд} - z)^2}} \right)$$

и суммарная сила, действующая на проводник l_d

$$F_d = \frac{\mu_0 i_1 i_0}{4\pi l} \int_0^{l_d} \left(\frac{z}{\sqrt{l^2 + z^2}} + \frac{l_d + l_{эд} - z}{\sqrt{l^2 + (l_d + l_{эд} - z)^2}} \right) dz. \quad (7)$$

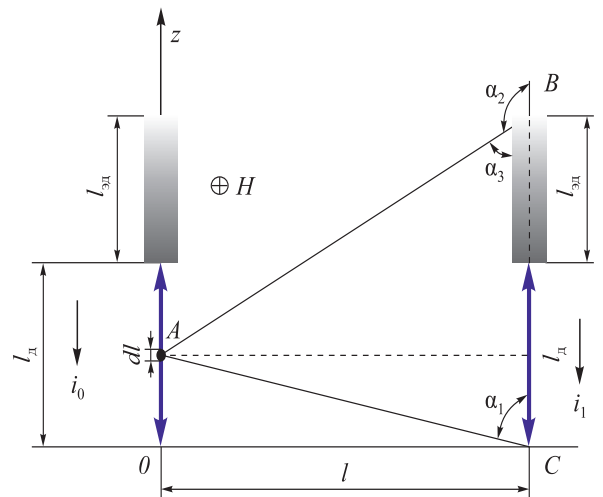


Рис. 3. К расчету напряженности магнитного поля и электромагнитной силы на проводник со стороны параллельного проводника конечной длины

Fig. 3. To the calculation of the magnetic field and the electromagnetic force acting on the conductor from the side of the parallel conductor of finite length

Найдем силу взаимодействия одной из дуг трехфазной дуговой печи переменного тока с двумя другими дугами. Токи, протекающие по дугам:

$$i_1 = I \sin(\omega t); i_2 = I \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right); i_3 = I \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right),$$

где I – амплитудное значение линейного тока. Среднеинтегральные силы взаимодействия первого и второго токов по периоду F_{12} и первого и третьего токов по периоду F_{13} пропорциональны $\frac{1}{T} \int_0^T i_1 i_2 dt = -\frac{I^2}{2}$ и

$\frac{1}{T} \int_0^T i_1 i_3 dt = -\frac{I^2}{2}$ соответственно. Силы F_{12} и F_{13} направлены под углом 60° , поэтому векторная сумма этих сил F пропорциональна $\frac{\sqrt{3}I^2}{2}$. Таким образом, можно получить среднюю результирующую силу на дугу с учетом действующего значения линейного тока $I_{\text{дл}} = I/\sqrt{2}$

$$F_{\text{д}} = \frac{\sqrt{3}\mu_0 I_{\text{дл}}^2}{4\pi l} \left(\sqrt{l^2 + l_{\text{д}}^2} - l - \sqrt{l^2 + l_{\text{эд}}^2} + \sqrt{l^2 + (l_{\text{д}} + l_{\text{эд}})^2} \right) \quad (9)$$

и локальную электромагнитную силу, действующую на единицу длины дуги

$$f_{\text{д}}(z) = \frac{\sqrt{3}\mu_0 I_{\text{дл}}^2}{4\pi l} \left(\frac{z}{\sqrt{l^2 + z^2}} + \frac{l_{\text{д}} + l_{\text{эд}} - z}{\sqrt{l^2 + (l_{\text{д}} + l_{\text{эд}} - z)^2}} \right).$$

Уравнение (9) совпадает с полученным в работе [2] с точностью до коэффициента перед скобкой и знаков сложения и вычитания.

Из рис. 2 видно, что векторы $\vec{F}_{\text{м}}$ и $\vec{F}_{\text{д}}$ расположены под прямым углом, поэтому модуль результирующей силы $F_{\text{РЕЗ}} = \sqrt{F_{\text{м}}^2 + F_{\text{д}}^2}$. Она направлена под углом φ к прямой, проходящей через центр распада электродов и ось электрода.

При отклонении формы дуги от прямой линии возникает третья электромагнитная сила $\vec{F}_{\text{с}}$ взаимодействия тока дуги с собственным магнитным полем, которая старается выпрямить дугу. Эта сила вместе с центробежной компенсирует сумму сил $\vec{F}_{\text{м}}$ и $\vec{F}_{\text{д}}$ и во многом определяет средний угол отклонения θ и среднюю форму дуги. Подробно алгоритм расчета формы дуг был рассмотрен в работе [9]. На основе него создана компьютерная программа, позволяющая находить среднюю форму оси столба дуги по заданным геометрическим и технологическим параметрам горения дуг [10]. В алгоритме программы учитывается действие центробежной силы потока газа на форму оси столба дуги, однако эта сила не электромагнитной природы, поэтому в данной работе она не рассматривается.

В работах [9, 10] показано, что в первом приближении форму дуги можно описать параболой $y = \frac{ax^2}{l_{\text{д}}^2}$

(рис. 4), где a – горизонтальное отклонение дуги от вертикальной оси.

Напряженность магнитного поля в точке A от тока i , проходящего через элемент dl_2 , находим по формуле Био-Савара-Лапласа $dH = \frac{idl_2 r}{4\pi r^3}$, где

$$\vec{r} = (x_0 - x, y_0 - y); dl_2 = \left(1, \frac{2ax}{l_{\text{д}}^2}\right) dx;$$

$$|\vec{r}| = r = |\vec{BA}| = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (|y_0 - y| + \bar{y}_0)^2}.$$

Среднее геометрическое расстояние $\bar{y}_0$ площади сечения дуги в ее цилиндрической части от самой себя $\bar{y}_0 = 0,778r_0$, где r_0 – радиус дуги в цилиндрической части столба. Распишем векторное произведение

$$dl_2 dr = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ dx & \frac{2ax}{l_{\text{д}}^2} dx & 0 \\ x_0 - x & y_0 - y & 0 \end{vmatrix} =$$

$$= \vec{k} \left(y_0 - y - \frac{2ax(x_0 - x)}{l_{\text{д}}^2} \right) dx = \vec{k} \frac{a}{l_{\text{д}}^2} (x_0 - x)^2 dx;$$

$$dH = \frac{ia(x_0 - x)^2}{4\pi l_{\text{д}}^2 r^3} dx.$$

Полную напряженность магнитного поля в точке A от тока всей дуги получаем интегрированием

$$H = \frac{ia}{4\pi l_{\text{д}}^2} \int_0^{l_{\text{д}}} \frac{(x_0 - x)^2}{\left((x_0 - x)^2 + \left(\frac{a}{l_{\text{д}}^2} |x_0^2 - x^2| + \bar{y}_0 \right)^2 \right)^{3/2}} dx.$$

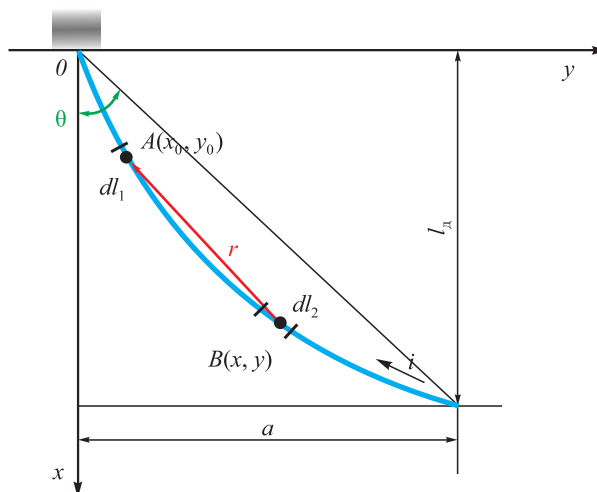


Рис. 4. К расчету силы взаимодействия дуги с собственным магнитным полем

Fig. 4. To the calculation of the interaction force of the arc with its own magnetic field

Элементарная сила, действующая на элемент тока дуги dl_1 , находится в плоскости yOz , направлена перпендикулярно $d\vec{l}_1$, а ее модуль равен $dF = i\mu_0 dl_1 H$. Направление элемента дуги dl_1 определяется вектором $dl_1 = \left(1, \frac{2ax_0}{l_d^2}\right) dx_0$. Проекция сил, действующих на всю дугу $i = I_{дл}$:

$$F_x = \frac{I_{дл}^2 a \mu_0}{4\pi l_d^2} \int_0^{l_d} \int_0^{l_d} \frac{2ax_0}{l_d^2} \times \frac{(x_0 - x)^2 dx}{\left((x_0 - x)^2 + \left(\frac{a}{l_d^2} |x_0^2 - x^2| + \bar{y}_0\right)^2\right)^{3/2}} dx_0; \quad (10)$$

$$F_y = \frac{I_{дл}^2 a \mu_0}{4\pi l_d^2} \int_0^{l_d} \int_0^{l_d} \frac{(x_0 - x)^2 dx}{\left((x_0 - x)^2 + \left(\frac{a}{l_d^2} |x_0^2 - x^2| + \bar{y}_0\right)^2\right)^{3/2}} dx_0. \quad (11)$$

Полная сила, отклоняющая дугу от вертикали $F_c = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$. Интегралы, стоящие в выражениях (10) – (11), можно определить только численно.

Четвертая сила сжимает дугу в радиальном направлении посредством пинч-эффекта. Интегральное значение этой силы рассчитано во многих работах и ее можно записать как [5]

$$F_{\pi} = \frac{\mu_0 I_{дл}^2}{8\pi}. \quad (12)$$

Все рассмотренные электромагнитные силы пропорциональны квадрату действующего значения тока, поэтому для анализа характера зависимостей сил от длины дуги удобно выбирать комплекс $F/I_{дл}^2$. На рис. 5, а показаны графики зависимости $F_d/I_{дл}^2$ от без-

размерного расстояния между дугами при разных безразмерных длинах электрода. Величина $F_d/I_{дл}^2$ находится в пределах от 0,1 до 0,2 Н/кА² при $l/l_d \approx 1$, убывает с увеличением расстояния между дугами по закону, близкому к обратной пропорциональности и существенно зависит от безразмерной длины электрода $l_{эд}/l_d$ в диапазоне от 0 до 5. На этом же рисунке приведена зависимость $F_m/I_{дл}^2$ от безразмерного расстояния между дугами, величина $F_m/I_{дл}^2$ находится в пределах от 0 до 0,08 Н/кА². Видно, что с увеличением расстояния между дугами от 0 до l_d , сила F_m резко возрастает от 0 до некоторого значения и далее увеличивается очень незначительно. На рис. 5, б показаны зависимости соотношения сил F_d/F_m от безразмерного расстояния между дугами. Видно, что при относительном расстоянии между дугами менее 1,5 – 2,5, более существенной оказывается сила F_d , чем F_m .

Направление результирующей средней силы $\vec{F}_{рез}$ определяется углом φ , который зависит от соотношения модулей сил $|\vec{F}_m|$ и $|\vec{F}_d|$. На рис. 6 показано поведение угла φ в зависимости от безразмерного расстояния между дугами при разных безразмерных длинах электрода в трехфазной дуговой печи. Видно, что дуги могут существенно отклоняться в сторону от прямой, соединяющей центр распада электродов и ось электрода. Например для печи, имеющей среднюю длину дуги 0,2 м и расстояние между электродами 0,6 м, угол φ может иметь значение 45 – 60°.

На рис. 7 представлена зависимость выпрямляющей силы, деленной на квадрат тока $F_c/I_{дл}^2$, от безразмерного отклонения дуги от вертикальной оси. Видно, что при отклонении дуги $\theta = 0 - 45^\circ$ ($a/l_d = 0 - 1$) сила F_c в зависимости от длины дуги имеет максимальное значение при $a/l_d = 0,1 - 0,4$. Средняя выпрямляющая дугу сила $\vec{F}_c$ по величине сопоставима с силами $\vec{F}_m$ и $\vec{F}_d$.

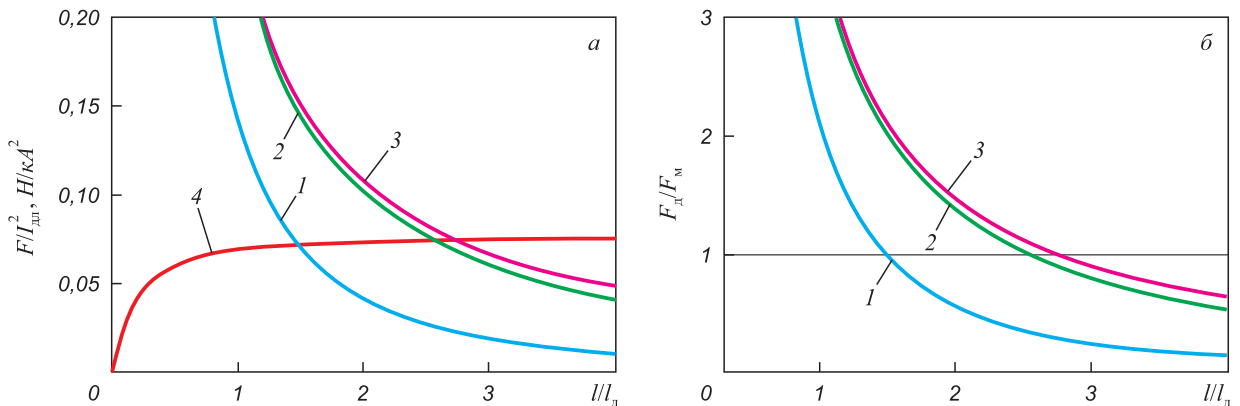


Рис. 5. Зависимости электромагнитных сил, деленных на квадрат тока $F_d/I_{дл}^2$ (линии 1 – 3); $F_m/I_{дл}^2$ (линия 4) (а) и соотношения сил F_d/F_m при безразмерной длине электрода, $l_{эд}/l_d$: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 20 (б) от безразмерного расстояния между дугами

Fig. 5. Dependences of electromagnetic forces divided by the square of the current $F_d/I_{дл}^2$ (lines 1 – 3); $F_m/I_{дл}^2$ (line 4) (a) and ratio F_d/F_m when the dimensionless length of the electrode, $l_{эд}/l_d$: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 20 (б) from the dimensionless distance among the arcs

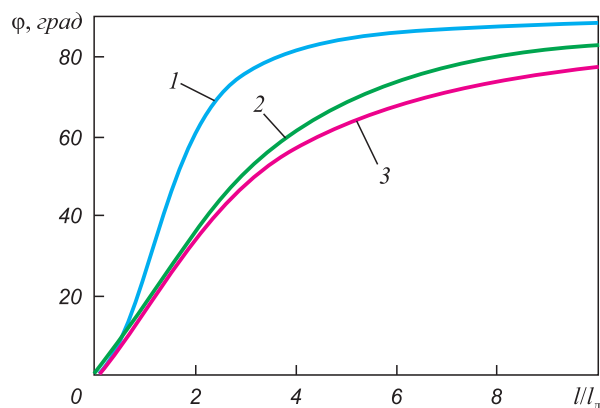


Рис. 6. Зависимость угла φ между средним значением результирующей силы и прямой, проходящей через центр распада электродов и ось электрода, от безразмерного расстояния между дугами при безразмерной длине электрода, $l_{зд}/l_d$:
1 – 0; 2 – 5; 3 – 20

Fig. 6. Dependence of the angle φ between the average value of the resultant force and the straight line passing through the center of the disintegration of the electrodes and the axis of the electrode, and the dimensionless distance between the arcs at the dimensionless length of the electrode, $l_{зд}/l_d$:
1 – 0; 2 – 5; 3 – 20

Сила, сжимающая дугу, деленная на квадрат тока имеет относительно большое значение $0,05 \text{ Н/кА}^2$, т. е. ее значение сравнимо с остальными тремя силами, однако она не оказывает существенного влияния на отклонение оси столба дуги от вертикали.

Выводы. Получена математическая модель для расчета основных локальных электромагнитных сил, действующих на дугу, и оценки их среднеинтегральных значений в условиях трехфазной дуговой печи. Показано направление векторов электромагнитных сил и приведена оценка их средних значений в зависимости от токов дуг и геометрических параметров печи. Установлено, что наиболее существенное влияние на среднее отклонение электрической дуги от вертикали и форму дуг в трехфазной дуговой печи оказывают электромагнитные силы от токов, протекающих через дуги и графитированные электроды, а также электромагнитные силы от токов, протекающих через жидкий металл. При расстоянии между дугами менее 1,5 – 2,5 длины дуги наибольшее влияние оказывает сила электромагнитного взаимодействия между дугами, а при больших расстояниях значительное влияние на форму дуги оказывает сила взаимодействия дуги с токами, протекающими через жидкий металл.

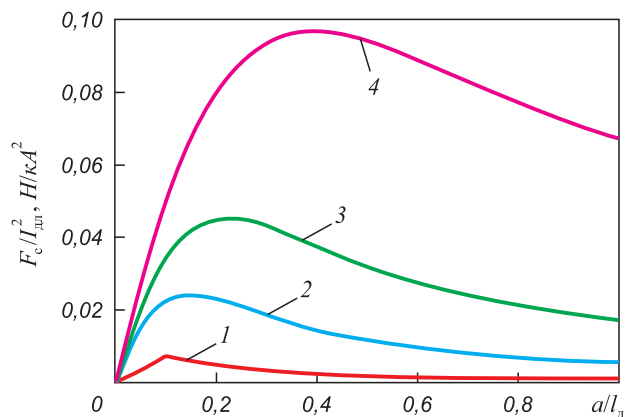


Рис. 7. Зависимость выпрямляющей силы, деленной на квадрат тока, от безразмерного отклонения дуги от вертикальной оси при длине дуги l_d , м:
1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,3; 4 – 0,5

Fig. 7. Dependence of the straightening force divided by the square of the current, and the dimensionless deflection of the arc from the vertical axis when the arc length is l_d , m:
1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,3; 4 – 0,5

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вочке И. Электрическая плавильная печь: Пер. с нем. / Под ред. А.Н. Соколова. – Ленинград; Москва: Онти. Глав. ред. лит-ры по черной металлургии, 1936. – 540 с.
2. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. – М.: Металлургия, 1985. – 280 с.
3. Макаров А.Н. Теплообмен в дуговых сталеплавильных печах. – Тверь: ТГТУ, 1998. – 184 с.
4. Макаров А.Н., Свенчанский А.Д. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 96 с.
5. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. – М.: Металлургия, 1981. – 320 с.
6. Миронов Ю.М. Электрическая дуга в электротехнологических установках. – Чебоксары: Изд. Чуваш. ун-та, 2013. – 238 с.
7. Общая электротехника. / Под. ред. В.С. Пантюшина. – М.: Высш. школа, 1970. – 568 с.
8. Ячиков И.М., Зарецкая Е.М. Анализ поведения магнитного поля вблизи электродов дуговых печей посредством математического моделирования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 1. С. 18 – 21.
9. Ячиков И.М., Костылева Е.М. Математическое моделирование формы дуг при их электромагнитном взаимодействии. Сообщение 1. Форма двух дуг постоянного тока, горящих между катодами и токопроводящей поверхностью // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 1. С. 59 – 64.
10. Ячиков И.М., Костылева Е.М. Взаимодействие дуг // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619388. БПБТ. 2013. № 4. С. 324.

Поступила 10 декабря 2014 г.

BEHAVIOR OF THE MAIN ELECTROMAGNETIC FORCES ACTING ON THE ARC IN THREE-PHASE ARC FURNACE

Yachikov I.M., Dr.Eng., Professor of the Chair of Computer Engineering and Applied Mathematics (jachikov@mail.ru)

Kostyleva E.M., Postgraduate of the Chair of Computer Engineering and Applied Mathematics

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov
(38, Lenina ave., Magnitogorsk, 455000, Russia)

Abstract. The mathematical model to determine the key local and average integral electromagnetic forces acting on the arc discharges in the three-phase arc furnace has been given. There are the forces acting on the arc column, which are caused by currents flowing through the liquid metal, the forces of the electromagnetic interaction of the arc with other arcs and currents flowing through the graphite electrodes and the forces of the interaction of the arc with its own magnetic field. Through computer simulations it is shown that in three-phase arc furnace, when the distances between the electrodes are less than 1.5 – 2.5 of the arc lengths the most significant influence on the behavior of the electric arc and its form have the forces of the electromagnetic interaction between the currents flowing through the arc and graphite electrodes, and at large distances the most significant influence on the behavior of the electric arc and its form have the force of interaction of the arcs with currents flowing through the liquid metal. It was found that average resultant electromagnetic force acting on the arc can significantly deflect it from a straight line connecting the center of the electrodes and the axis of the electrode.

Keywords: three-phase arc furnace, electric arc, electric arc column, electromagnetic force, straightening force, pinch effecting force, pinch effect.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-7-479-485

REFERENCES

1. Wotschke Johannes. *Grundlagen des elektrischen schmelzofens*. Haale 1933. (Russ.ed.: Vochke Iogan. *Elektricheskaya plavil'naya pech'*. Sokolov A.N. ed. Leningrad – Moscow: Onti. Glav. red. lit-ry po chernoi metallurgii, 1936. 540 p.).
2. Egorov A.V. *Elektroplavil'nye pechi chernoi metallurgii* [Electric smelting furnaces in ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1985. 280 p. (In Russ.).
3. Makarov A.N. *Teploobmen v dugovykh staleplavil'nykh pechakh* [Heat transfer in electric arc furnaces]. Tver: TGTU, 1998. 184 p. (In Russ.).
4. Makarov A.N., Svenchanskii A.D. *Optimal'nye teplovye rezhimy dugovykh staleplavil'nykh pechei* [Optimal thermal modes of arc furnaces]. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 96 p. (In Russ.).
5. Nikol'skii L.E., Smolyarenko V.D., Kuznetsov L.N. *Teplovaya rabota dugovykh staleplavil'nykh pechei* [Thermal work of arc furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1981. 320 p. (In Russ.).
6. Mironov Yu.M. *Elektricheskaya duga v elektrotekhnologicheskikh ustanovkakh: Monografiya* [The electric arc in the electro-technological installations: Monograph]. Cheboksary: Izd. Chuvash.un-ta, 2013. 238 p. (In Russ.).
7. *Obshchaya elektrotehnika* [General Electrical Engineering]. Pantyushin V.S. ed. Moscow: Vyssh. shkola, 1970. 568 p. (In Russ.).
8. Yachikov I.M., Zaretskaya E.M. Magnetic field behavior close to electric arc furnace electrodes analysis with mathematical modeling. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 1, pp. 18–21. (In Russ.).
9. Yachikov I.M., Kostyleva E.M. The mathematical modeling of form of arcs with their electromagnetic coupling. Report 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 1, pp. 59–64. (In Russ.).
10. Yachikov I.M., Kostyleva E.M. *Vzaimodeistvie dug. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM no. 2013619388* [Arcs interaction. Certificate of state registration of a computer program]. BPBT. 2013, no. 4, p. 324. (In Russ.).

Received December 10, 2014