

УДК 004.422.8

DOI: 10.15827/0236-235X.030.3.537-545

Дата подачи статьи: 14.12.16

2017. Т. 30. № 3. С. 537–545

## **КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ ТРЕХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, ГОРЯЩИХ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ**

*И.М. Ячиков, д.т.н., профессор, jachikov@mail.ru;*

*Е.М. Костылева, аспирант, ezaretskaya@yandex.ru*

*(Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
просп. Ленина, 38, г. Магнитогорск, 455000, Россия)*

В металлургической промышленности эксплуатируется множество агрегатов, в которых в качестве источников тепловой энергии используются электрические дуги, горящие на горизонтальную тепловоспринимающую поверхность. Знание электромагнитных сил, действующих на дуги, их положение и поведение важны при конструировании новых печей и автоматизации их работы.

Обзор литературы показывает, что многие вопросы, связанные с электрическими дугами трехфазного переменного тока, освещены недостаточно полно, поскольку на промышленных или опытных установках изучение большинства проблем технически сложно, дорого и часто невыполнимо по самым разным причинам.

Возможным направлением исследования является создание адекватных математических моделей, их реализация в виде прикладного ПО и дальнейшее компьютерное моделирование.

В данной работе показаны математические модели и разработанный комплекс программ, включающий в себя модули для определения напряженности магнитного поля, электромагнитных сил, формы дуг и теплового потока вблизи трех дуг трехфазного переменного тока, горящих на горизонтальную поверхность.

Результатом работы созданного программного комплекса являются расчет и визуализация векторных полей – напряженности магнитного поля и среднеинтегральных электромагнитных сил, а также визуализация средней за период формы осей столбов электрических дуг и распределение тепловых потоков по горизонтальной тепловоспринимающей поверхности.

**Ключевые слова:** *трехфазный переменный ток, напряженность магнитного поля, электромагнитные силы, форма оси столба дуги, тепловой поток, математическая модель, программное обеспечение.*

В настоящее время существует множество агрегатов, в которых в качестве источников тепловой энергии используются трехфазные электрические дуги, горящие на горизонтальную поверхность. Это дуговые печи для выплавки металлов и сплавов, рудотермические, рудовосстановительные печи и другие. Знание ряда параметров электрических дуг, таких как магнитные поля, электромагнитные силы, действующие на дуги, положение и динамика поведения дуг, а также тепловые потоки излучения вблизи горящих дуг, является важным при эксплуатации существующих, конструировании новых печей и автоматизации их работы. На основе литературного анализа установлено, что многие вопросы, связанные с электрическими дугами трехфазного переменного тока, горящими на горизонтальную поверхность, освещены недостаточно полно. На промышленных или опытных установках исследование этих и других подобных проблем технически сложно, дорого и часто невозможно по самым разным причинам. Одним из возможных методов их изучения являются создание адекватных математических моделей, их реализация в виде ПО и дальнейшее исследование с использованием компьютерных моделей.

Для электрических дуг трехфазного переменного тока наиболее практически значимыми являются такие параметры, как напряженность магнитного поля в районе горения дуг, электромагнитные силы, действующие на дуги, форма дуг и радиаци-

онные тепловые потоки, падающие на горизонтальную поверхность.

В работах [1, 2] рассмотрена математическая модель для определения результирующей мгновенной напряженности магнитного поля в произвольной точке пространства  $A$  от токов, проходящих через три параллельных электрода. Находятся векторы напряженности магнитных полей, вызываемые токами в  $j$ -м электроде, а затем определяется результирующая сумма векторов с использованием принципа суперпозиции магнитных полей.

В выбранной полярной системе координат относительно центра распада электродов центры первого, второго и третьего электродов имеют координаты  $C_1(r_p, 0)$ ,  $C_2(r_p, 2\pi/3)$  и  $C_3(r_p, 4\pi/3)$  соответственно. Выбранная полярная система координат и совмещенная с ней декартова система координат  $Oxy$ , а также схематическое расположение токов и точки  $A$  показаны на рисунке 1.

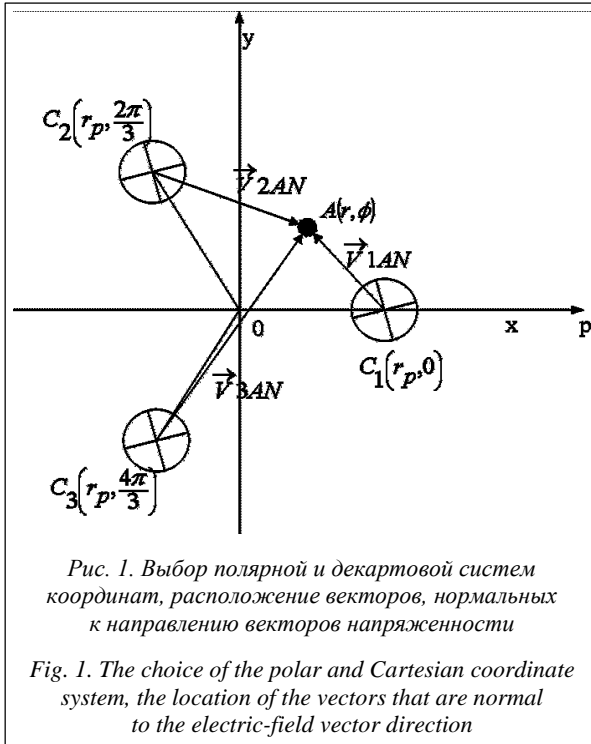
Напряженность магнитного поля  $\vec{H}_A$  в произвольной точке  $A(r, \varphi)$  определяется суммой трех векторов, координаты которых определяются по формуле

$$\vec{H}_{Aj} = \vec{H}_{Aj} \left( (-y_A + y_{Cj}) \cdot d, (x_A - x_{Cj}) \cdot d \right), \quad (1)$$

где  $d = \frac{i_0 \cdot \sin(2\pi\nu\tau + \varphi_j)}{2 \cdot \pi \cdot \left( (-y_A + y_{Cj})^2 + (x_A - x_{Cj})^2 \right)}$ ;  $r_p$  – радиус

окружности, на которой расположены токи;  $\tau$  –

время;  $i_0$  – амплитуда тока;  $\varphi_j = 2\pi(j-1)/3, j = 1, 2, 3$ ;  $\nu = 50$  Гц – частота тока;  $T = 1/\nu$  – период;  $\vec{H}_{Aj}$  – напряженность магнитного поля в точке  $A$  от тока  $j$ -го электрода;  $A(x_a, y_a)$  – координаты точки  $A$ ;  $C_j(x_{cj}, y_{cj})$  – координаты точек  $C_j$ .



Результирующая напряженность магнитного поля в точке  $A$  от действия трех токов, проходящих через графитированные электроды

$$\vec{H}_A = \vec{H}_A(x_{H1} + x_{H2} + x_{H3}, y_{H1} + y_{H2} + y_{H3}), \quad (2)$$

где  $x_{Hj}, y_{Hj}$  – координаты  $x$  и  $y$  вектора напряженности магнитного поля от действия  $j$ -го тока.

На основе математической модели в среде разработки и моделирования MathCad создан программный модуль, позволяющий определять магнитные поля вблизи трех параллельно горящих дуг трехфазного переменного тока. В качестве входных параметров задаются диаметр распада электродов, амплитудное значение тока дуг и полярные координаты точки, в которой ищем магнитное поле. Программа позволяет строить графики изменения напряженности магнитного поля в зависимости от безразмерного расстояния до центра распада электродов в различные моменты времени или при разных значениях угловой координаты, нормированные векторные поля напряженности магнитного поля вблизи трех дуг трехфазного переменного тока, годографы векторов напряженности магнитного поля. В качестве примера были построены нормированные векторные поля напряженности магнитного поля в различные моменты времени. Так, для моментов времени  $\tau = n \cdot T/2$ , где  $n=0, 1, 2, \dots$ ,

магнитное поле вблизи первого электрода отсутствует. В последующие моменты времени оно постепенно увеличивается, принимает максимальное значение при  $\tau = T/4 + n \cdot T/2$ , после чего постепенно уменьшается и к моменту времени  $\tau = T/2 + n \cdot T/2$  пропадает. Аналогично ведут себя напряженности магнитных полей вблизи второго и третьего электродов, возле которых поле отсутствует в моменты времени  $\tau = T/6 + n \cdot T/2$  и  $\tau = T/3 + n \cdot T/2$  и максимально  $\tau = 5T/12 + n \cdot T/2$  и  $\tau = 7T/12 + n \cdot T/2$  соответственно. Установлено, что вблизи трех электрических дуг, горящих на горизонтальную поверхность, имеет место бегущее магнитное поле. На рисунке 2 приведен пример работы программы, показаны нормированные векторные поля напряженности магнитного поля вблизи трех параллельно горящих дуг трехфазного переменного тока в разные моменты времени, а также годографы вектора напряженности магнитного поля внутри и вне диаметра распада электродов.

Для электрометаллургической теории и практики важными являются методы расчета локальной электромагнитной силы, действующей на элемент дуги, и среднеинтегральной силы, действующей на всю дугу. При постоянных токах для локальной силы, действующей на элемент дуги от тока, протекающего через жидкий металл, в [3] получено выражение

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

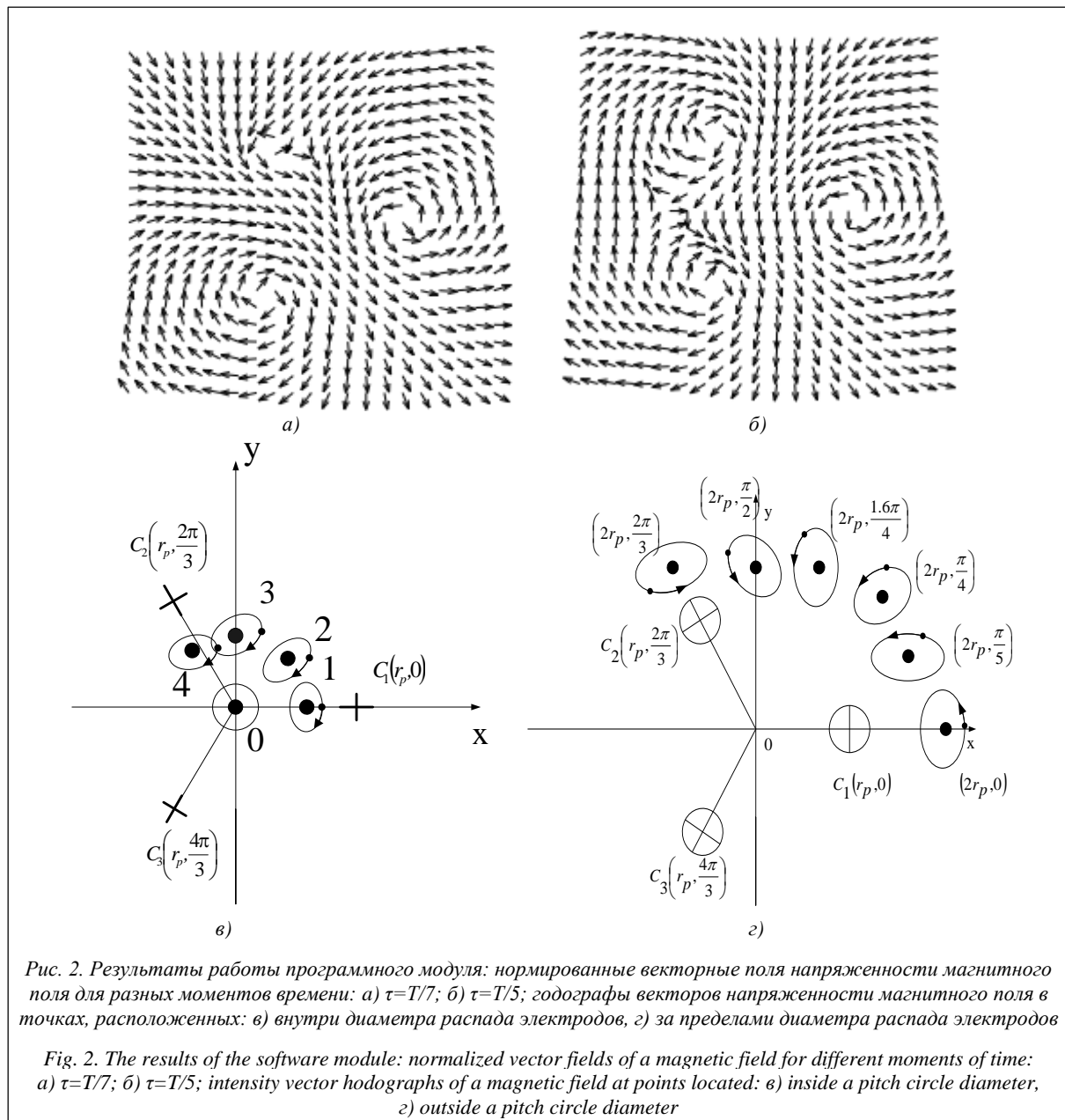
а для среднеинтегральной электромагнитной силы [4, 5] зависимость

$$F = \frac{\mu_0 i_1 i_0}{4\pi} \ln \left[ \frac{(\sqrt{l^2 + \Delta^2} + l)(\Delta + l_d)}{\Delta(\sqrt{(l_d + \Delta)^2 + l^2} + l)} \right], \quad (3)$$

где  $\Delta = 3,2-3,6$  см – глубина электрической оси токопроводящего слоя от поверхности жидкого металла [6];  $i_0$  – ток дуги;  $i_1$  – ток, протекающий через жидкий металл со стороны другой дуги;  $l_d$  – длина дуги;  $l$  – длина горизонтального отрезка, по которому протекает ток  $i_1$ ;  $z$  – расстояние от точки привязки дуги на горизонтальной поверхности до рассматриваемого элемента дуги.

В работе [4] получены выражения для электромагнитной силы, действующей на ток дуги  $i_1 = i_A$  со стороны трех фазных токов  $i_{AB}, i_{BC}, i_{CA}$ , протекающих через металл. Установлено, что модуль равнодействующей силы пропорционален  $\sqrt{3}I^2/4$ . С учетом действующего значения линейного тока  $I_{дл} = \sqrt{3}I/\sqrt{2}$  получено локальное среднее значение электромагнитной силы, действующей на единицу длины дуги:

$$f_m(z) = \frac{\mu_0 I_{дл}^2}{8\sqrt{3}\pi} \frac{1}{(\Delta + z)} \frac{l}{\sqrt{l^2 + (\Delta + z)^2}}, \quad (4)$$



и среднеинтегральное значение силы, действующей на дугу:

$$F_m = \frac{\mu_0 I_{\text{дл}}^2}{8\sqrt{3}\pi} \ln \left[ \frac{(\sqrt{l^2 + \Delta^2} + l)(\Delta + l_d)}{\Delta(\sqrt{(l_d + \Delta)^2 + l^2} + l)} \right]. \quad (5)$$

В работе [7] рассмотрено взаимодействие двух вертикальных дуг постоянного тока, получена локальная электромагнитная сила, действующая на единицу длины дуги, на ток столба дуги  $i_0$  со стороны тока  $i_1$ , протекающего через дугу (длиной  $l_d$ ) и графитированный электрод (длиной  $l_{\text{эд}}$ ):

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

и среднеинтегральная сила, действующая на дугу:

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

Среднюю результирующую силу взаимодействия одной из дуг в трехфазной дуговой печи переменного тока с двумя другими дугами с учетом действующего значения линейного тока  $I_{\text{дл}} = I / \sqrt{2}$  и локальную электромагнитную силу, действующую на единицу длины дуги [4, 7], можно определить следующим образом:

$$F_0 = \frac{\sqrt{3}\mu_0 I_{\text{дл}}^2}{4\pi l} \left( \sqrt{l^2 + l_d^2} - l - \sqrt{l^2 + l_{\text{эд}}^2} + \sqrt{l^2 + (l_d + l_{\text{эд}})^2} \right), \quad (6)$$

$$f_d(z) = \frac{\sqrt{3}\mu_0 I_{\text{дл}}^2}{4\pi l} \left( \frac{z}{\sqrt{l^2 + z^2}} + \frac{l_d + l_{\text{эд}} - z}{\sqrt{l^2 + (l_d + l_{\text{эд}} - z)^2}} \right). \quad (7)$$

На основе разработанных математических моделей в среде разработки и моделирования MatLab создана компьютерная программа «Расчет электромагнитных сил, действующих на дуги в трехфазной дуговой печи», позволяющая рассчитывать основные электромагнитные силы (Свид. о гос. регистр. № 2016618499), ее главное окно показано на рисунке 3. Исходными данными для программы являются расстояние между дугами, длина дуги, длина электрода, действующее значение тока. Все они проходят проверку на корректность ввода [8]. Далее рассчитываются значения среднеинтегральных

сил от токов, протекающих по жидкому металлу, и от токов, протекающих через параллельные дуги и электроды. Значения этих сил одинаковы для каждой из дуг и различаются только направлениями. Далее при помощи методов аналитической геометрии визуализируются расположение электродов, среднеинтегральных электромагнитных сил и их результирующее направление. Также в программе имеется возможность построения графиков локальных и среднеинтегральных электромагнитных сил. При нажатии на кнопку «Графики» на экране появляется рабочее окно для вывода графиков (рис. 4).

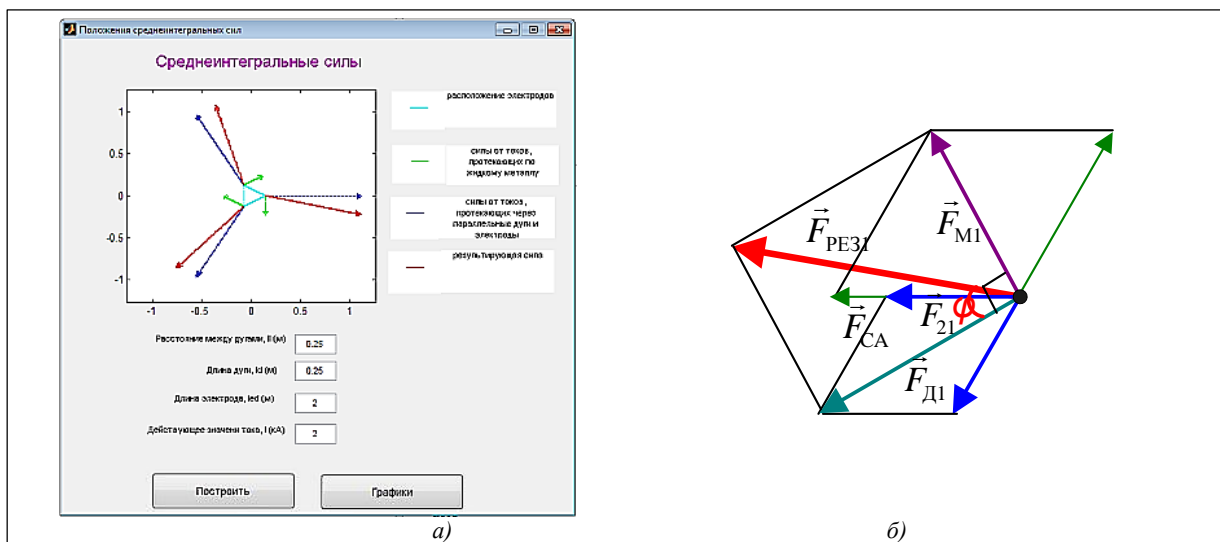


Рис. 3. Программа «Расчет электромагнитных сил, действующих на дуги в трехфазной дуговой печи»: а) главное окно, б) результаты моделирования основных векторов среднеинтегральных электромагнитных сил, действующих на дугу

Fig. 3. A program “Calculation of electromagnetic forces affecting arcs in a three-phase arc furnace”: a) the main window, б) simulation results of the main vectors of average integral electromagnetic forces affecting the arc

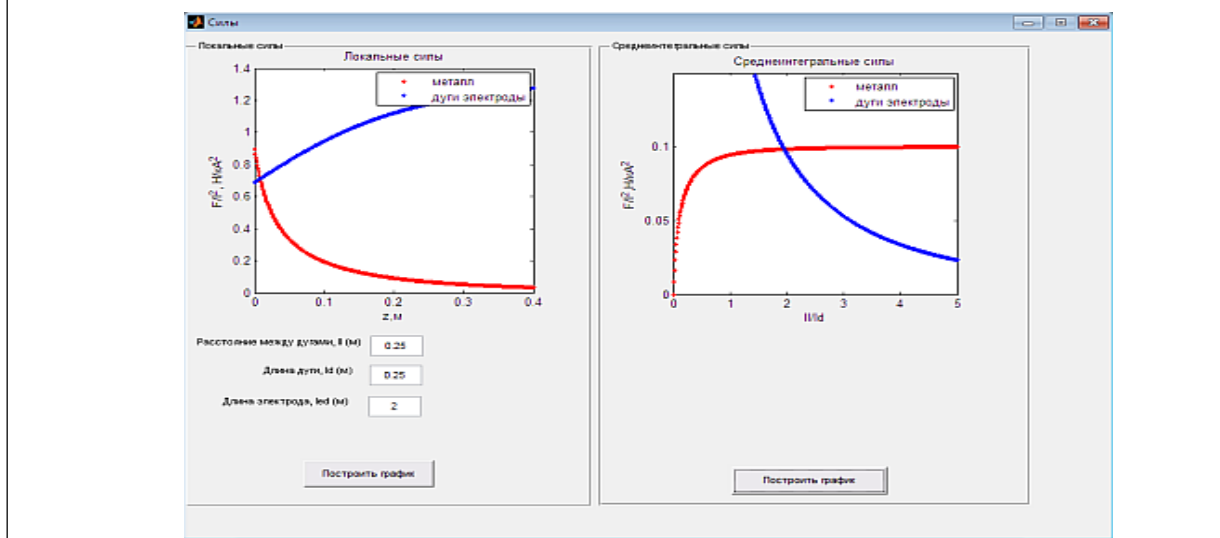


Рис. 4. Рабочее окно программы «Расчет электромагнитных сил, действующих на дуги в трехфазной дуговой печи» для вывода графиков локальных и среднеинтегральных электромагнитных сил

Fig. 4. The working window of the program “Calculation of electromagnetic forces affecting arcs in a three-phase arc furnace” for the charts of local and average integral electromagnetic forces



многочленов  $a_{2j} = a_{3j} = \dots = a_{nj}$  находились как минимум функции нескольких переменных:

$$\varphi_3 = \int_0^l (\Phi_1^2 + \Phi_2^2) dz = \min, \text{ где } \Phi_1, \Phi_2 - \text{ левые части}$$

уравнения (8), записанные для первой и второй дуг соответственно.

Уравнение равновесия элемента столба дуги расширено и применено для нахождения формы осей двух или трех дуг постоянного или трехфазного переменного тока и может быть записано как

$$k_1 d\vec{F}_{1-2} + d\vec{F}_{1-1} + d\vec{F}_{1-q} = 0, \quad (9)$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий вид электромагнитного взаимодействия;  $d\vec{F}_{1-2}$  – сила взаимодействия дуги с токами, протекающими по другим дугам;  $\vec{F}_{1-1}$  – сила взаимодействия дуги с собственным током;  $d\vec{F}_{1-q}$  – центробежная сила, выпрямляющая дугу. Значение коэффициента  $k_1$  и характер электромагнитного взаимодействия зависят от рода тока и количества дуг [17].

На основе разработанных математических моделей в среде разработки и моделирования MatLab создан программный модуль «Взаимодействие дуг», позволяющий в зависимости от количества дуг, рода и значения протекающего по ним тока, расстояния между дугами, физических свойств плазмообразующего газа рассчитывать и визуализировать форму дуг (Свид. о гос. регистр. № 2016618499); главное окно программы показано на рисунке 6. Исходными данными являются расстояние между дугами, длина дуги, токи первой и второй дуг, степень полинома, при помощи которого аппроксимируется форма дуги, род тока, участвующего во взаимодействии дуг. Далее с учетом физических свойств плазмообразующего газа и

свойств окружающей среды находятся коэффициенты для построения формы оси столба дуги. Программа строит график формы осей столбов дуг  $y(z)$  в сантиметрах.

В дуговой сталеплавильной печи (ДСП) трансформация электрической энергии в тепловую происходит в разрядном промежутке. За счет электромагнитного взаимодействия электрических токов, протекающих по графитированным электродам и в поверхностных слоях расплава с током дуги, происходит ее выдувание от центра печи. Средний угол наклона столба дуги  $\theta$  по отношению к нормали зеркала ванны колеблется для ДСП различной мощности и емкости в пределах  $45^\circ$ – $65^\circ$  (см., например, [18, 19]).

В работе [20] была получена модель теплового потока на произвольно расположенную площадку  $dS$ , находящуюся на поверхности ванны от электрической дуги, расположенной под углом к ней:

$$q_{\text{изл}}(r, A) = \frac{K_3 \cdot P \cdot \sqrt{1-A^2}}{2\pi^2 \cdot l_d \cdot r} \left[ \frac{-B + A \cdot \text{arcth}\left(\frac{A}{B}\right)}{B^3} + \frac{B \cdot r(l_d A + r) - A(r^2 + 2A \cdot r \cdot l_d + l_d^2) \text{arcth}\left(\frac{l_d + rA}{rB}\right)}{B^3(r^2 + 2A \cdot r \cdot l_d + l_d^2)} \right], \quad (10)$$

где  $A = \cos\psi \cdot \sin\theta$ ;  $B = \sqrt{A^2 - 1}$ ;  $r$  – расстояние от начала координат до площадки  $dS$ ;  $\psi$  – угол, под которым расположена площадка  $dS$  к началу координат;  $\theta$  – угол между направлением излучения и нормалью к поверхности ванны;  $K_3$  – поправочный экспериментальный коэффициент, учитывающий долю мощности дуги, идущую на излучение;  $P$  – полная мощность излучения дуги;  $l_d$  – длина дуги (рис. 7).

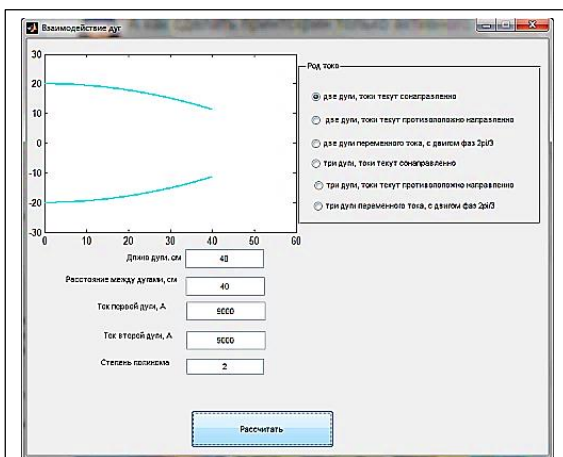


Рис. 6. Рабочее окно программы «Взаимодействие дуг» для расчета и построения формы осей столбов дуг

Fig. 6. The working window of the program “Arc interaction” for calculating and constructing shapes of arc axes

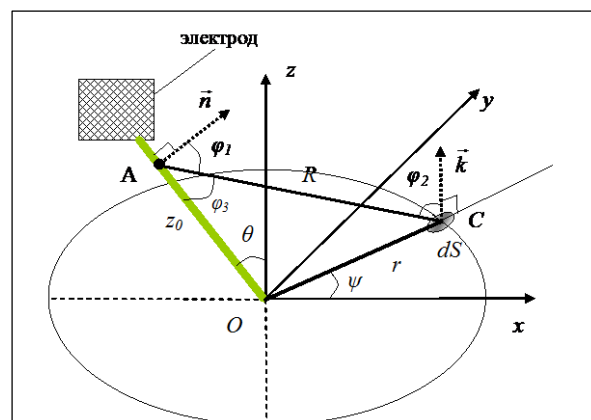


Рис. 7. К расчету плотности теплового излучения дуги на площадку  $dS$

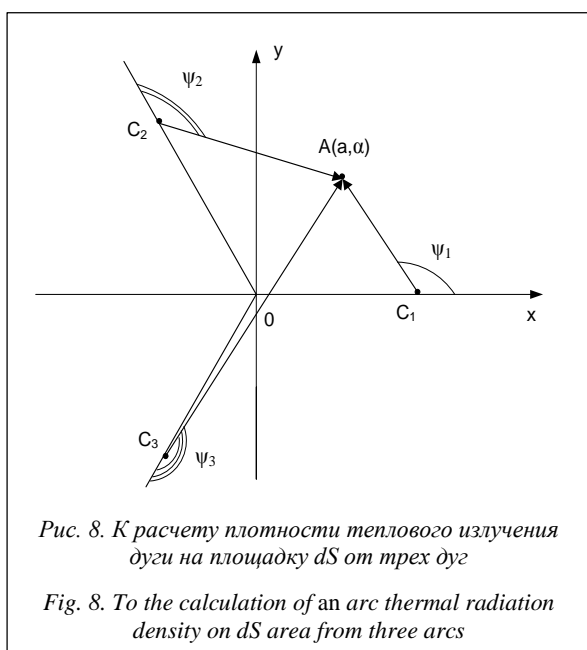
Fig. 7. To the calculation of an arc thermal radiation density on  $dS$  area



Тепловой поток от трех наклонных горящих электрических дуг длиной  $l_d$  на произвольно расположенную горизонтальную площадку находится по принципу суперпозиции как сумма тепловых потоков, падающих в данную точку  $A$  (рис. 8). Тепловой поток, падающий на элементарную площадку, определяется как

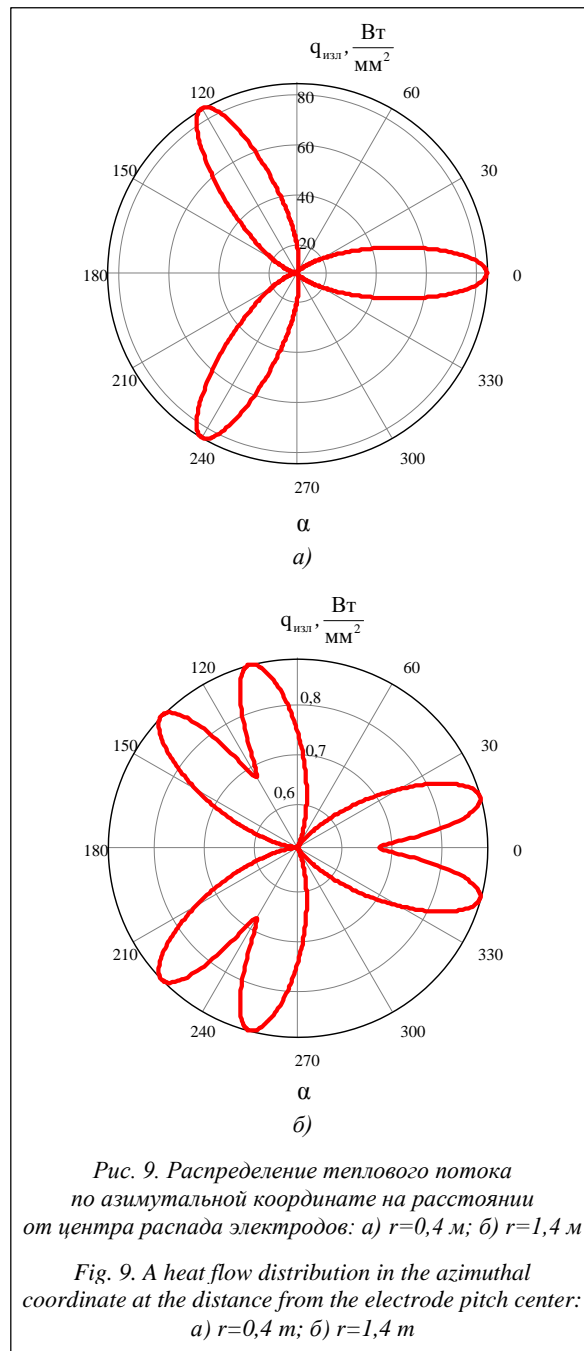
$$q_{изл}(a, \alpha, \theta) = \sum_{j=1}^3 q_{j\text{ изл}}(r_j, \psi_j, \theta), \quad (11)$$

где  $q_{j\text{ изл}}(r_j, \psi_j, \theta)$  – тепловой поток, падающий на горизонтальную поверхность от  $j$ -й дуги;  $r_j$  – расстояние от  $j$ -й дуги до площадки  $dS$ ;  $\psi_j$  – угол, под которым расположена площадка  $dS$  к  $j$ -й дуге;  $\theta$  – угол между направлением излучения и нормалью к поверхности ванны [21].

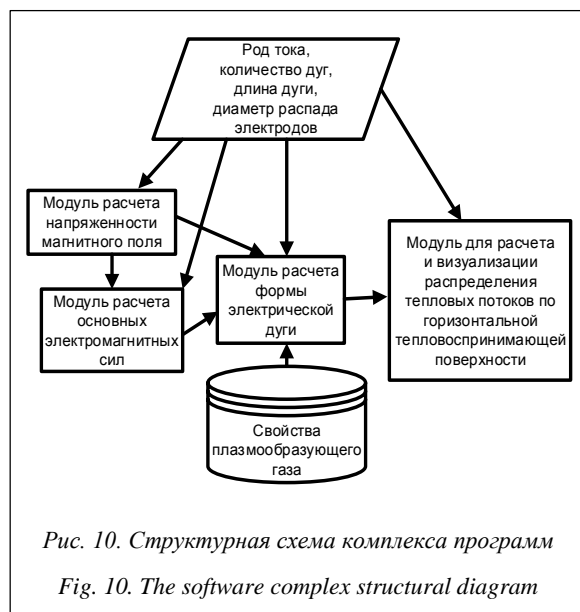


С использованием созданной математической модели (10)–(11) разработан компьютерный модуль, позволяющий рассчитывать и визуализировать тепловые потоки, падающие на горизонтальную поверхность, вблизи горения трех наклонных электрических дуг. В качестве входных параметров задаются диаметр распада электродов, действующее значение тока, координаты точек, в которых ищется и визуализируется тепловой поток. На рисунке 9 изображено распределение теплового потока по азимутальной координате при разном расстоянии от центра распада электродов в трехфазной дуговой печи ДСП-180 (ток дуги – 50 кА,  $l_d = 0,5$  м, диаметр распада электродов – 1,2 м), построенное при помощи разработанного модуля.

Таким образом, на основе оригинальных математических моделей разработан комплекс компьютерных программ для определения основных параметров электрических дуг трехфазного переменного тока. Комплекс программ позволяет рассчитать напряженность магнитных полей, опре-



делить и визуализировать среднеинтегральные электромагнитные силы, действующие на дуги, и локальные силы, действующие на элементы дуги: от токов, протекающих через жидкий металл, и от токов, проходящих через параллельно горящие дуги и графитированные электроды. Также специальные модули позволяют рассчитать и визуализировать формы осей столбов в зависимости от их количества и рода тока и для определения и визуализации теплового потока от трех горящих наклонных электрических дуг по азимутальной координате. Структурная схема комплекса программ представлена на рисунке 10. Разработанный комплекс компьютерных программ может использоваться при конструировании многоэлектродных



дуговых или плазменных печей для определения положения электрических дуг в системах автоматизированного регулирования их тепловой работы, для оценки стойкости футеровки вблизи горящих дуг при разных технологических режимах, для определения воздействия электромагнитных полей на приборы и человека.

#### Литература

1. Леушин А.И. Дуга горения. М.: Metallurgy, 1973. 240 с.
2. Ячиков И.М., Зарецкая Е.М. Анализ поведения магнитного поля вблизи электродов дуговых печей посредством математического моделирования // Изв. вузов: Черная металлургия. 2011. № 1. С. 18–20.
3. Миронов Ю.М. Электрическая дуга в электротехнологических установках: монография. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. 290 с.
4. Yachikov I.M., Kostyleva E.M. Electromagnetic forces on the arc in a three-phase arc furnace. Steel in Translation. 2015. vol. 45, no. 7, pp. 467–472. DOI: 10.3103/S0967091215070141.
5. Егоров А.В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей. М.: Изд-во МИСиС, 2000. 272 с.
6. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Metallurgy, 1985. 280 с.
7. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Metallurgy, 1981. 320 с.
8. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. СПб: Питер, 2005. 512 с.
9. Бортничук Н.И., Крутянский М.М. Плазменно-дуговые плавильные печи. М.: Энергоиздат, 1981. 120 с.
10. Азбелев Н.В., Максимов В.П., Рахматуллина Л.Ф. Элементы современной теории функционально-дифференциальных уравнений. Методы и приложения. Ижевск: Изд-во ИКИ, 2002. 304 с.
11. Дмитриев С.С., Кузнецов Е.Б. Численное решение систем интегро-дифференциально-алгебраических уравнений с запаздывающим аргументом // Журн. вычислит. матем. и матем. физики. 2008. № 3. С. 430–444.
12. Вержбицкий В.М. Численные методы. Математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Высш.шк., 2001. 383 с.
13. Федоренко Р.П. Введение в вычислительную физику. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 504 с.
14. Зализняк В.Е. Основы научных вычислений. Введение в численные методы для физиков. М.: Editorial URSS, 2002. 296 с.
15. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы М.: Бином. Лаборатория знаний, 2003. 632 с.
16. Лёзин И.А. Решение систем полиномиальных уравнений на ЭВМ // Программные продукты и системы. 2012. № 3. С. 22–25.
17. Ячиков И.М., Костылева Е.М. Математическое моделирование формы дуг при их электромагнитном взаимодействии. Сообщ. 2: Форма электрических дуг постоянного или трехфазного переменного тока, горящих между электродами и токоподводящей поверхностью // Изв. вузов: Черная металлургия. 2014. № 5. С. 56–61.
18. Макаров А.Н. Теплообмен в дуговых сталеплавильных печах. Тверь: Изд-во ТГТУ, 1998. 184 с.
19. Миронов Ю.М., Михадаров Д.Г. Влияние межэлектродного промежутка на отклонение столба дуги // Вестн. ЧГУ. 2009. № 2. С. 139–142.
20. Yachikov I.M., Zaretskaya E.M. Radiant heat flux from an electric arc inclined to the plane of the receiving surface. Steel in Translation, 2011, vol. 41, no. 7, pp. 550–554. DOI: 10.3103/S0967091211070151.
21. Макаров А.Н., Свенчанский А.Д. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей. М.: Энергоатомиздат, 1992. 96 с.

#### A SOFTWARE SUITE TO DETERMINE THE PARAMETERS OF THREE-PHASE ALTERNATING CURRENT ELECTRIC ARCS BURNING IN A HORIZONTAL SURFACE

I.M. Yachikov<sup>1</sup>, Dr.Sc. (Engineering), Professor, yachikov@mail.ru  
E.M. Kostyleva<sup>1</sup>, Postgraduate Student, ezaretskaya@yandex.ru

<sup>1</sup> G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University), Lenin Ave. 38, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation

**Abstract.** The metallurgical industry uses a lot of equipment with electrical arcs as the sources of thermal energy. They burn in the direction of the horizontal heat-absorbing surface. Knowing electromagnetic forces affecting the arcs, their location and behavior is significant when designing new furnaces and automating their operation.



The literature review shows that many issues connected with electrical arcs of three-phase alternating current are under-served due to technical complexity, high cost and often impossible on industrial or pilot plants.

A possible method of research is the development of appropriate mathematical models, their implementation as applied software and further computer modeling.

The paper shows mathematical models and developed software, which includes modules for determining the magnetic field intensity, electromagnetic forces, arc and heat flow forms, near three arcs of three-phase alternating current burning in the direction of a horizontal surface.

The result of the created software complex is calculation and representation of vector fields including magnetic field strength and average-integral electromagnetic forces, as well as visualization of the average form of electric arc column axis by the period and the heat flux distribution on a horizontal heat-absorbing surface.

**Keywords:** three-phase alternating current, magnetic field, electromagnetic forces, form of arc column axis, heat flux, mathematical model, software.

### References

1. Leushin A.I. *Duga gorennya* [The Burning Arc]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973, 240 p.
2. Yachikov I.M., Zaretskaya E.M. The analysis of a magnetic field behavior near electric arc furnace electrodes using mathematical modeling. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2011, no. 1, pp. 18–20 (in Russ.).
3. Mironov Yu.M. *Elektricheskaya duga v elektrotehnologicheskikh ustanovkakh* [An Electric Arc in Electrotechnological Installations]. Monograph. Cheboksary, Chuvash. un-t Publ., 2013, 290 p.
4. Yachikov I.M., Kostyleva E.M. Electromagnetic forces on the arc in a three-phase arc furnace. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 7, pp. 467–472.
5. Egorov A.V. *Raschet moshchnosti i parametrov elektroplavilnykh pechey* [The Calculation of Power and Parameters of Electric Smelting Furnaces]. Moscow, MISiS Publ., 2000, 272 p.
6. Egorov A.V. *Elektroplavilnye pechi chernoy metallurgii* [Electric Melting Furnace for Ferrous Metallurgy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985, 280 p.
7. Nikolsky L.E., Smolyarenko V.D., Kuznetsov L.N. *Teplovaya rabota dugovykh staleplavilnykh pechey* [Thermal Performance of Electric Arc Furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981, 320 p.
8. Lazarev Yu. *Modelirovanie protsessov i sistem v MATLAB* [Modeling Processes and Systems in MATLAB]. St. Petersburg, Piter Publ., 2005, 512 p.
9. Bortnichuk N.I., Krutyansky M.M. *Plazmenno-dugovye plavilnye pechi* [Plasma-arcs Melting Furnace]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 120 p.
10. Azbelev N.V., Maksimov V.P., Rakhmatullina L.F. *Elementy sovremennoy teorii funktsionalno-differentsialnykh uravneny. Metody i prilozheniya* [Elements of the Modern Theory of Functional Differential Equations. Methods and Applications]. Moscow, IKI Publ., 2002, 304 p.
11. Dmitriev S.S., Kuznetsov E.B. Numerical solution to systems of delay integrodifferential algebraic equations. *Zhurn. vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics]. 2008, vol. 48, no. 3, pp. 406–419.
12. Verzhbitsky V.M. *Chislennyye metody. Matematichesky analiz i obyknovennyye differentsialnye uravneniya* [Numerical Methods. Mathematical Analysis and Ordinary Differential Equations]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 2001, 383 p.
13. Fedorenko R.P. *Vvedenie v vychislitel'nuyu fiziku* [An Introduction to Computational Physics]. 2nd ed., Intellect Publ., 2008, 504 p.
14. Zaliznyak V.E. *Osnovy nauchnykh vychisleny. Vvedenie v chislennyye metody dlya fizikov* [Fundamentals of Scientific Computing. Introduction to Numerical Methods for Physicists]. URSS Publ., 2002, 296 p.
15. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Chislennyye metody* [Numerical Methods]. Moscow, Binom. Laboratoriya znany Publ., 2003, 632 p.
16. Lezin I.A. Solving simultaneous polynomial equations using a computer. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. Tver, 2012, no. 3, pp. 22–25 (in Russ.).
17. Yachikov I.M., Kostyleva E.M. The mathematical modeling of arcs' form during their electromagnetic coupling. *Message 2. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2014, vol. 57, no. 5, pp. 56–61.
18. Makarov A.N. *Teploobmen v dugovykh staleplavilnykh pechakh* [Heat Exchange in Arc Steel-Melting Furnaces]. Tver, TSTU Publ., 1998, 184 p.
19. Mironov Yu.M., Mikhadarov D.G. The influence of the interelectrode gap on the deviation of an arc column. *Vestn. ChGU* [Cherepovets State Univ. Bulletin]. 2009, no. 2, pp. 139–142 (in Russ.).
20. Yachikov I.M., Zaretskaya E.M. Radiant heat flux from an electric arc inclined to the plane of the receiving surface. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 7, pp. 550–554.
21. Makarov A.N., Svenchansky A.D. *Optimalnye teplovye rezhimy dugovykh staleplavilnykh pechey* [Optimum Thermal Conditions of Electric Arc Furnaces]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992, 96 p.