

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

УДК 621.365.2:681:325

DOI: 10.14529/ctcr200212

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА, ГОРЯЩИХ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ, ПРИ ИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

И.М. Ячиков, Е.М. Костылева

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия*

Введение. В металлургии широкое распространение получили многоэлектродные дуговые печи с использованием трехфазного переменного тока. Наличие нескольких электрических дуг создает систему, обладающую специфическими свойствами, отсутствующими при единственной горящей дуге. Данные свойства связаны с поведением напряженности магнитного поля вблизи трех дуг, с появлением дополнительных электромагнитных сил, меняющих форму и размеры дуг, а значит, и их тепловое излучение. От геометрии дуг и силы тока зависит интенсивность электромагнитных взаимодействий, форма дуги и ее динамическое поведение, которое в свою очередь существенно влияет на тепловую работу печи. Знание характера сил, действующих на дугу, ее положения и поведения является важным при конструировании и эксплуатации печей, повышении эффективности управления и автоматизации их работы. **Целью исследования** является изучение поведения основных характеристик свободных электрических дуг трехфазного тока, горящих на горизонтальную поверхность, путем создания соответствующего математического, алгоритмического и программного обеспечения. **Материалы и методы.** При выполнении работы применялись методы вычислительной математики и теории алгоритмов. Созданное программное обеспечение с использованием средств разработки приложений MATLAB и пакета MathCAD основывалось на известных методах: численного интегрирования и поиска минимума функций многих переменных. **Результаты.** Рассмотрены вопросы, связанные с изучением системы трех одновременно горящих дуг. Проведен анализ поведения напряженности магнитного поля вблизи трех дуг. Исследованы электромагнитные силы, меняющие форму и размеры дуг, а следовательно, и их тепловое излучение на горизонтальную поверхность. Результаты моделирования были косвенно подтверждены экспериментальными данными, проведенными на промышленной печи. **Заключение.** Созданы алгоритмы и программы, позволяющие: оценивать воздействие электромагнитных полей на приборы и человека, расположенные вблизи дуговых печей; изучать поведение среднеинтегральных электромагнитных сил, действующих на электрические дуги; рассчитывать и визуализировать тепловой поток, падающий на горизонтальную поверхность, в зависимости от геометрии дуг и их параметров. На основе созданных алгоритмов может быть создано специальное программное обеспечение, встроенное в систему автоматизированного регулирования и прогнозирования тепловой работы многоэлектродных дуговых агрегатов, для повышения достоверности оценки тепловосприятости шихты и водоохлаждаемых панелей, износа футеровки печи при разных технологических режимах горения дуг.

Ключевые слова: электрическая дуга, дуговая сталеплавильная печь, трехфазный переменный ток, напряженность магнитного поля, принцип суперпозиции электромагнитных полей, электромагнитное взаимодействие, форма оси столба дуги, тепловой поток, тепловосприятость стенки.

Введение

В настоящее время в России и за рубежом эксплуатируется множество промышленных агрегатов, работающих в черной, цветной металлургии и химической промышленности, в которых в качестве источников тепловой энергии используются электрические дуги.

В металлургии широкое распространение получили многоэлектродные дуговые печи с исполь-

зованием трехфазного переменного тока, прежде всего дуговые сталеплавильные печи (ДСП), ферросплавные, рудотермические и рудовосстановительные печи самых разных конструкций.

На электрическую дугу как на легкоподвижный проводник с током существенное влияние оказывают внешние магнитные поля, возникающие от тока, протекающего через саму дугу, от других токов, проходящих: через параллельно горящие дуги, токоподводящие электроды к ним, через жидкий металл, шихту, токоподводы и пр. Особенностью электрической дуги переменного тока, в частности дуги, горящей в трехфазных дуговых печах, является непрерывное изменение ее формы, размеров и параметров излучения. Дуга переменного тока имеет специфические условия протекания электрофизических процессов. В течение каждого полупериода сила тока меняется от нуля до максимального значения и снова до нуля, что создает нестабильность тепловых и ионизационных процессов в столбе дуги [1]. Несмотря на колебания температуры в течение полупериода тока, сохраняется квазистационарное тепловое состояние столба дуги, обеспечивающее его высокую электро- и теплопроводность. Мощная дуга переменного тока по своей геометрии близка к дуге постоянного тока, но столб дуги непрерывно меняет очертания с двойной частотой переменного тока. Площадь привязки дуги на ванне жидкого металла в полтора-два раза превышает площадь пятна на электроде [2, 3].

В ДСП трехфазного переменного тока дуга непрерывно меняет свою конфигурацию, отклоняясь от вертикального положения. Этот эффект возникает из-за взаимодействия силы, вызванной взаимодействием тока дуги с собственным магнитным полем дуги, и силы, создаваемой электромагнитным полем от тока, протекающего в жидкой ванне [4, 5]. Продольный поток газа, образующийся внутри столба дуги, при его искривлении в результате электромагнитного взаимодействия дуги создает центробежные силы, стремящиеся распрямить столб. При искривлении столба возникают также выпрямляющие силы, обусловленные взаимодействием тока с собственным магнитным полем дуги. Равенство электромагнитных и центробежных сил определяет форму оси столба дуги [6].

Температура дуги зависит от состава плазмообразующего газа, вводимой мощности, характера теплопередачи в столбе дуги и характера теплообмена с окружающим пространством и электродами. Температура дуги максимальна на оси столба дуги и убывает по мере отдаления от нее. Это уменьшение связано с теплопередачей от оси к поверхности столба дуги и далее в окружающую среду.

Распределение плотности потоков излучения по поверхностям стен, своду печи и обрабатываемому металлу зависит от электрических и геометрических параметров дуг. Рациональные с точки зрения электрических параметров режимы работы многодуговой печи могут оказаться нерациональными по теплообмену в рабочем пространстве [7–9]. Несогласованность электрических и тепловых режимов особенно сказывается на работе высокомошных крупнотоннажных печей, что приводит к неодновременному протеканию электротехнологического процесса под электродами фаз, появлению горячих пятен на футеровке печи [10].

Однако многие вопросы, связанные с поведением системы горящих одновременно дуг, изучены еще недостаточно. В литературе представленные данные порой противоречивы, неполно проанализированы системные связи, возникающие с учетом особенностей электромагнитного взаимодействия дуг. Не до конца понятно, чем определяется характер электромагнитного взаимодействия нескольких параллельно горящих дуг трехфазного переменного тока, суммарные тепловые потоки от этих дуг на тепловоспринимающие поверхности и обрабатываемые материалы. Изучение этих практических важных вопросов на промышленных или опытных установках технически сложно, дорого и часто невозможно по самым различным причинам. Отсюда одним из подходов является систематизация и обобщение существующих знаний, создание на их основе специального математического, алгоритмического обеспечения, его реализация в виде компьютерных программ и дальнейшего анализа информации с использованием компьютерных методов ее обработки с целью использования в автоматизированных промышленных системах.

Целью работы является системное исследование основных характеристик свободных электрических дуг трехфазного тока, горящих на горизонтальную поверхность, путем создания соответствующего математического, алгоритмического и программного обеспечения.

Наличие нескольких электрических дуг создает систему, обладающую специфическими свойствами, отсутствующими при единственной горящей дуге. Данные свойства связаны с пове-

дением напряженности магнитного поля вблизи трех дуг, с появлением дополнительных электромагнитных сил, меняющих форму и размеры дуг, а значит, и их тепловое излучение.

1. Анализ напряженности магнитного поля для трех параллельно горящих дуг трехфазного переменного тока, горящих на горизонтальную поверхность

Изучение электромагнитного поля вблизи технологических дуговых агрегатов является важной задачей, так как оно влияет на основные технологические процессы, воздействует на приборы и человека. Проведенный литературный анализ показал, что в большинстве своем рассматриваются модели для определения напряженности магнитного поля вблизи вертикальной дуги постоянного или переменного тока. Была построена математическая модель для нахождения напряженности магнитного поля вблизи трех вертикальных параллельно горящих дуг трехфазного переменного тока [11]. Для нахождения результирующего магнитного поля в произвольной точке использовался принцип суперпозиции. Для этого находились векторы напряженности магнитных полей, вызываемых токами с учетом фазы в каждой дуге, а затем – их сумма.

На основе созданной математической модели разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитывать магнитные поля вблизи одного или трех электродов. С ее помощью было проведено компьютерное моделирование, в ходе которого получены закономерности поведения магнитных полей.

Установлено, что годограф вектора напряженности магнитного поля имеет вид эллипса с направлением движения вектора напряженности магнитного поля по часовой стрелке при нахождении точки A внутри диаметра распада электродов (рис. 1, а) и против хода часовой стрелки вне его (рис. 1, б). При смещении точки по окружности относительно центра распада электродов меняется направление большой оси эллипса годографа. Построены нормированные векторные поля напряженности магнитного поля в различные моменты времени. Теоретически установлено, что вблизи трех электродов, через которые протекает трехфазный переменный ток, наблюдается бегущее магнитное поле 1000 об/мин, что полностью согласуется с экспериментальными данными А.И. Леушина [12].

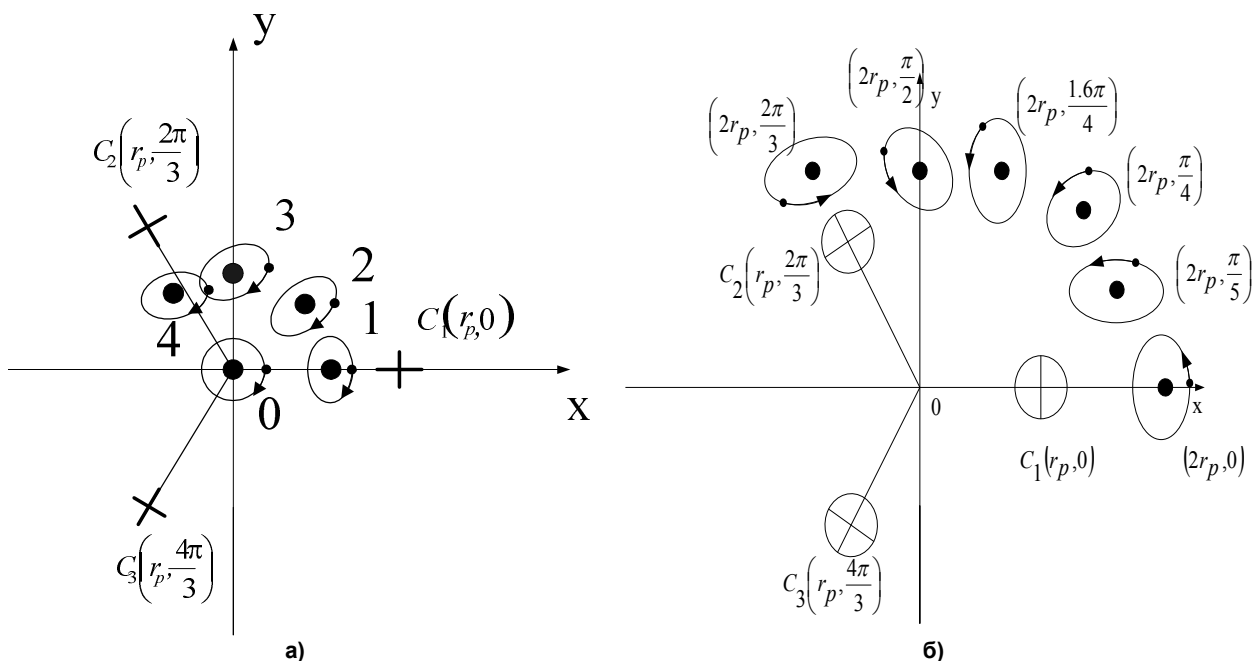


Рис. 1. Годографы векторов напряженности магнитного поля в точках, расположенных: а – внутри диаметра распада электродов $r < r_p$; б – поля за пределами диаметра распада электродов ($r > r_p$) (точками обозначено положение векторов в момент времени $\tau = 0$)

Fig. 1. Godographs of magnetic field intensity vectors at points located: а – inside diameter of electrode decay $r < r_p$; б – fields outside the electrode decay diameter ($r > r_p$) (points indicate the position of the vectors at time $\tau = 0$)

Вблизи одиночной дуги (постоянного или переменного токов) напряженность магнитного поля (или его амплитуда) обратно пропорциональна расстоянию от ее оси. Напряженность магнитного поля вблизи трех дуг, через которые протекает трехфазный переменный ток, обратно пропорциональна квадрату расстояния от центра распада электродов.

2. Анализ поведения основных электромагнитных сил, действующих на электрическую дугу

Проведено исследование поведения основных электромагнитных сил, действующих на электрическую дугу. В условиях трехфазной дуговой печи на дугу действуют две силы со стороны токов, протекающих по жидкому металлу, две силы со стороны параллельных дуг и токоподводов (графитированных электродов) и сила взаимодействия тока дуги с собственным магнитным полем [13, 14]. Получено среднеинтегральное значение силы, действующей на дугу со стороны токов, протекающих по жидкому металлу:

$$F_M = \frac{\mu_0 I_{\text{дл}}^2}{8\sqrt{3}\pi} \ln \left[\frac{(\sqrt{l^2 + \Delta^2} + l)(\Delta + l_{\text{д}})}{\Delta(\sqrt{(l_{\text{д}} + \Delta)^2 + l^2} + l)} \right], \quad (1)$$

и локальное среднее значение электромагнитной силы, действующей на единицу длины дуги на расстоянии z от горизонтальной поверхности

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

где $I_{\text{дл}}$ – действующее значение линейного тока, $l_{\text{д}}$ – длина дуги, $l = 0,5D\sqrt{3}$ – расстояние между осями дуг, D – диаметр распада электродов, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (В с)/(А м) – магнитная постоянная, $\Delta = 3,2-3,6$ см глубина расположения электрической оси токопроводящего слоя между дугами от поверхности металла.

Получены формулы для определения средней результирующей силы, действующей на дугу со стороны токов, протекающих по параллельным дугам и электродам длиной $l_{\text{эд}}$:

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

и локальной электромагнитной силы, действующей на единицу длины дуги

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

Создано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать и визуализировать в графическом виде направление среднеинтегральных сил, а также динамику их поведения в течение половины периода тока промышленной частоты [15].

Из рис. 2 показаны направления среднеинтегральных электромагнитных сил, действующих на электрические дуги, горящие на горизонтальную поверхность. Видно, что суммарный вектор силы, действующей на дугу со стороны токов, протекающих по жидкому металлу $\vec{F}_{\text{мi}}$, и суммарный вектор, действующей на дугу со стороны токов, протекающих по параллельным дугам $\vec{F}_{\text{дi}}$, расположены друг к другу под прямым углом. Равнодействующая сила направлена под углом φ к прямой, проходящей через центр распада электродов и их оси. Установлено, что направление отклонения результирующей силы не зависит от порядка подключения фаз (если смотреть сверху, то всегда по ходу часовой стрелки).

Все рассмотренные электромагнитные силы пропорциональны квадрату действующего значения тока, поэтому для анализа характера зависимостей сил от длины дуги выбран комплекс $F / I_{\text{дл}}^2$. На рис. 3, а показаны графики зависимости $F_{\text{д}} / I_{\text{дл}}^2$ от безразмерного расстояния между дугами при разных безразмерных длинах электрода. Величина $F_{\text{д}} / I_{\text{дл}}^2$ находится в пределах от 0,1 до 0,2 Н/кА² при $l / l_{\text{эд}} \approx 1$, убывает с увеличением расстояния между дугами по закону,

близкому к обратной пропорциональности, и существенно зависит от безразмерной длины электрода $l_{\text{эо}} / l_{\text{д}}$ в диапазоне от 0 до 5. На этом же рис. 3 приведена зависимость $F_{\text{м}} / I_{\text{дл}}^2$ от безразмерного расстояния между дугами, величина $F_{\text{м}} / I_{\text{дл}}^2$ находится в пределах от 0 до 0,08 Н/кА².

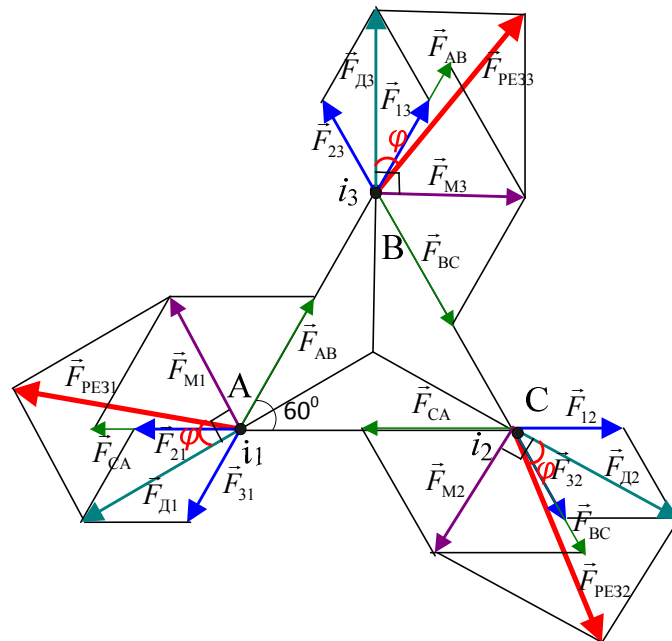


Рис. 2. Направления среднеинтегральных электромагнитных сил, действующих на электрические дуги, горящие на горизонтальную поверхность в ДСП: $\vec{F}_{\text{ми}}$ – силы со стороны токов, протекающих между дугами через жидкий металл; $\vec{F}_{\text{ди}}$ – силы со стороны токов, протекающих через дуги и графитированные электроды;

$\vec{F}_{\text{PE3и}}$ – результирующие силы

Fig. 2. Directions of mid-integral electromagnetic forces acting on electric arcs burning on the horizontal surface in CPD: $\vec{F}_{\text{ми}}$ – forces from the side of currents flowing between arcs through liquid metal; $\vec{F}_{\text{ди}}$ – forces from currents flowing through arcs and graphitized electrodes; $\vec{F}_{\text{PE3и}}$ – resultant forces

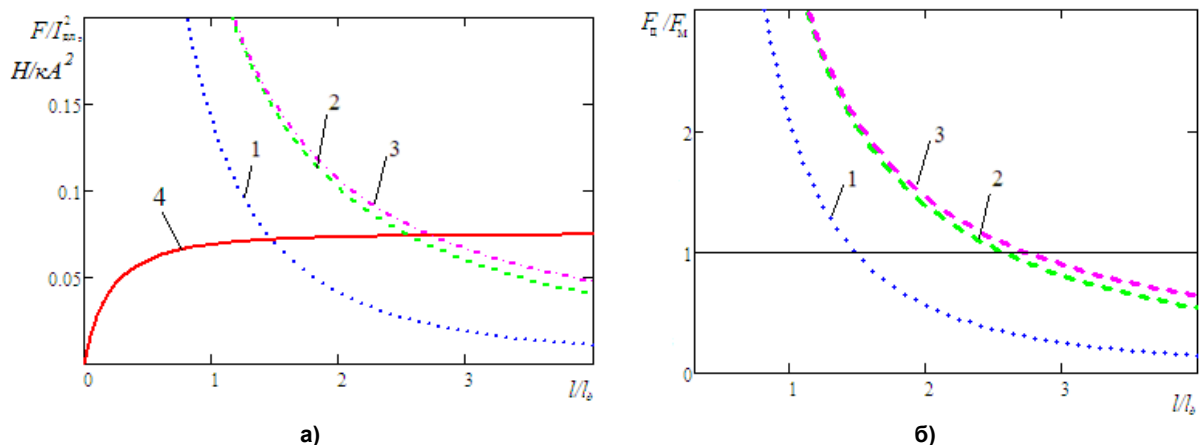


Рис. 3. Зависимости электромагнитных сил, деленных на квадрат тока $F_{\text{д}} / I_{\text{дл}}^2$ (линии 1–3); $F_{\text{м}} / I_{\text{дл}}^2$ (линия 4) (а) и соотношения сил $F_{\text{д}} / F_{\text{м}}$ (б) от безразмерного расстояния между дугами при безразмерной длине электрода: 1 - $l_{\text{эо}} / l_{\text{д}} = 0$; 2 - $l_{\text{эо}} / l_{\text{д}} = 5$; 3 - $l_{\text{эо}} / l_{\text{д}} = 20$

Fig. 3. Relationships of electromagnetic forces divided by current square $F_{\text{д}} / I_{\text{дл}}^2$ (lines 1–3); $F_{\text{м}} / I_{\text{дл}}^2$ (line 4) (a) and ratios of forces $F_{\text{д}} / F_{\text{м}}$ (b) from dimensionless distance between arcs at dimensionless electrode length: 1 - $l_{\text{эо}} / l_{\text{д}} = 0$; 2 - $l_{\text{эо}} / l_{\text{д}} = 5$; 3 - $l_{\text{эо}} / l_{\text{д}} = 20$

Видно, что с увеличением расстояния между дугами от 0 до l_0 сила F_m резко возрастает от 0 до некоторого значения и далее увеличивается очень незначительно. На рис. 3, 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 $|\vec{F}_1|$ и $|\vec{F}_d|$. 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°.

3. Анализ формы параллельно горящих на горизонтальную поверхность электрических дуг переменного тока при их электромагнитном взаимодействии

На дугу действует сила, которая пытается вернуть ее в вертикальное положение, – сила взаимодействия дуги с собственным магнитным полем. Эта сила вместе с центробежной компенсирует сумму сил $\vec{F}_m + \vec{F}_d$ и во многом определяет средний угол отклонения θ и наиболее вероятное положение дуги.

На основании модели дуги, предложенной Н.И. Бортничуком и М.М. Крутянским [6], разработан алгоритм расчета [16] для нахождения формы осей дуг трехфазного переменного тока при их электромагнитном взаимодействии с учетом центробежной силы для свободной дуги, горящей в среде аргона или воздуха. Созданная компьютерная программа позволяет рассчитывать и визуализировать форму дуг в зависимости от их количества, рода тока, физических свойств газа и окружающей среды [17].

В реальных электродуговых установках угол отклонения дуги от вертикали может составлять 45–65°. Были проведены расчеты отклонения дуг от вертикали θ для условий их горения в промышленных агрегатах или экспериментальных установках. Различия между результатами расчетов и экспериментальными данными, полученными Ю.М. Мироновым [1] и Г.А. Сисоном [18], не превышали 10 %

4. Анализ теплового потока, падающего на горизонтальную поверхность от трех наклонных дуг переменного тока

В работах А.Н. Макарова [10] была предложена модель дуги как излучающего цилиндра и разработана методика расчета теплообмена излучением в ДСП трехфазного тока, в ДППТ и плазменно-дуговых сталеплавильных печах постоянного тока. Там же была предложена схема теплообмена в рабочем пространстве печи с короткими и длинными дугами, расчет потоков излучения на свод и футеровку печи. Получена формула, позволяющая рассчитывать локальную плотность теплового потока

$$q_{ПД} = \frac{0,9P_D \cos(\alpha) \cos(\beta) l_{отк}}{\pi^2 r^2 l_D}, \quad (5)$$

где P_D – мощность дуги, α – угол между нормалью к оси дуги и направлением излучения, β – угол между нормалью к площадке в точке A и направлением излучения, r – расстояние от дуги до точки A , $l_{отк}$ – излучающая часть дуги. Данная зависимость была подтверждена экспериментальными исследованиями В.Д. Смоляренко и Р.И. Спелицина [19]. В работе [10] А.Н. Макаровым была получена формула для расчета плотности теплового потока, падающего в точку A , расположенную на ванне металла

$$q = \frac{\alpha_{изл} P_D \sin^2(\beta)}{\pi^2 r l_D}, \quad (6)$$

где $\alpha_{изл}$ – коэффициент излучения дуги, β – угол между нормалью к площадке и направлением теплового излучения.

С использованием формулы (6) создана математическая модель для определения теплового потока, падающего от трех наклонных одновременно горящих электрических дуг длиной l_0 на

произвольно расположенную площадку, находящуюся на горизонтальной поверхности. Было разработано алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее рассчитывать и визуализировать тепловой поток в зависимости от количества дуг и их параметров [20, 21]. На рис. 4 показаны зависимости теплового излучения дуги от угловой координаты ψ , определяющей расположение площадки dS при разных углах наклона θ дуги. Видно наличие плоскости зеркальной симметрии Oxz , минимальное значение теплового потока $q_{изл}$ наблюдается при $\psi = 0^\circ$, а максимальное – вблизи $\psi = 180^\circ$. При $\psi = 90^\circ$ и 270° тепловой поток не зависит от угла наклона дуги, это является следствием того, что при этих θ величина $A = \cos\psi \cdot \sin\theta = 0$. С увеличением расстояния от точки привязки дуги на расплав тепловой поток резко убывает и практически не зависит от ψ при $r/l_0 > 5$.

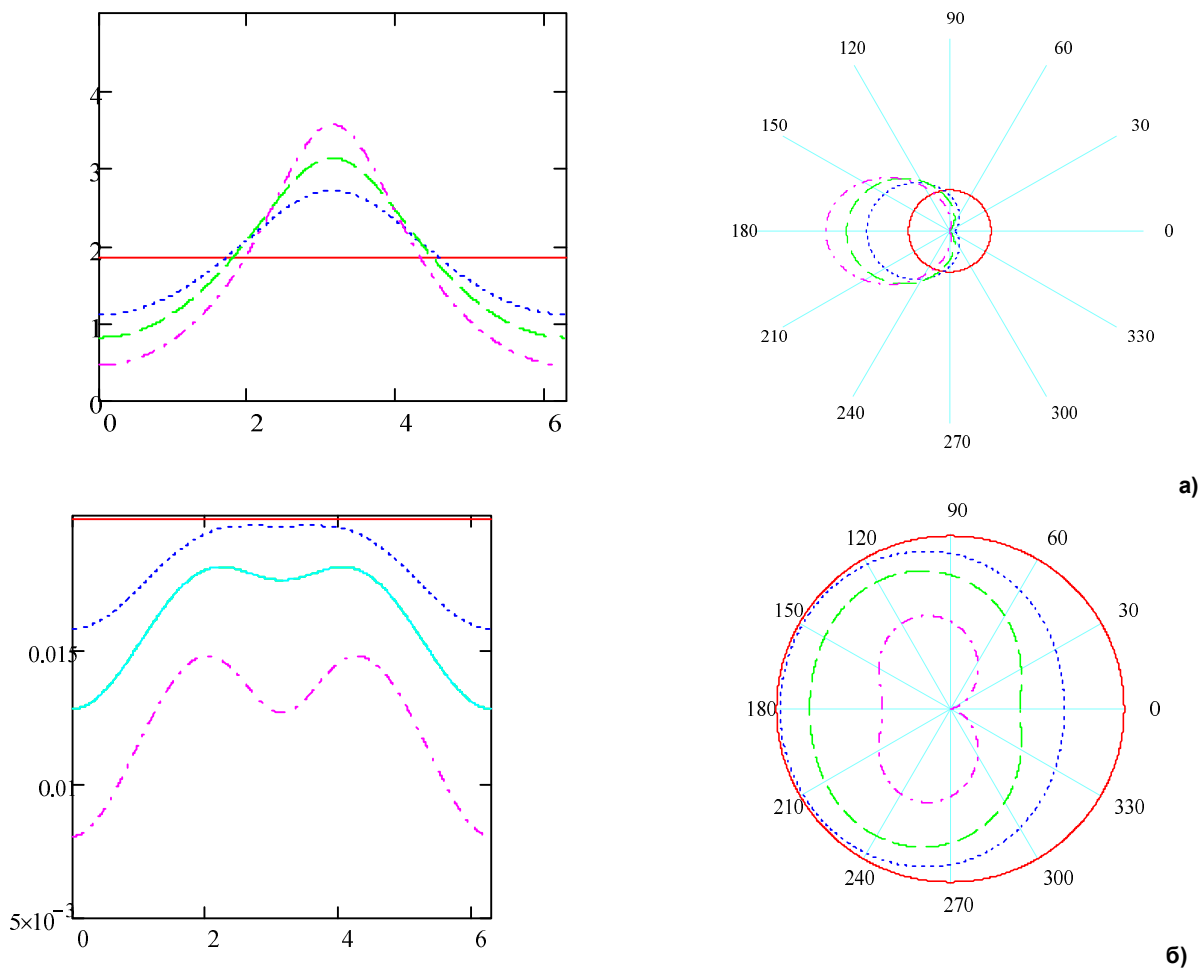


Рис. 4. Тепловой поток вдоль азимутальной координаты на разных расстояниях от точки привязки дуги: а – $r/l_0 = 1$; б – $r/l_0 = 5$. Угол наклона дуги: 1 - $\theta = 0^\circ$; 2 - $\theta = 20^\circ$; 3 - $\theta = 30^\circ$; 4 - $\theta = 45^\circ$
 Fig. 4. Heat flux along the azimuth coordinate at different distances from the arc anchor point: а – $r/l_0 = 1$; б – $r/l_0 = 5$. Arch tilt angle: 1 - $\theta = 0^\circ$; 2 - $\theta = 20^\circ$; 3 - $\theta = 30^\circ$; 4 - $\theta = 45^\circ$

На рис. 5 приведено распределение теплового потока по азимутальной координате при разном расстоянии от центра распада электродов. Наибольший тепловой поток наблюдается под дугами на расстоянии, расположенном между половиной диаметра распада электродов и точками привязки дуг на горизонтальную поверхность. Внутри диаметра распада электродов он ниже и сильно снижается при удалении от точек привязки дуг на горизонтальную поверхность от центра распада электродов. При движении по азимутальной координате минимальный тепловой поток наблюдается между электродами в направлениях $\alpha = 60, 180$ и 300° . Наибольший тепловой поток при движении по азимутальной координате внутри диаметра распада электродов ($r < D_p/2$) отмечается в направлениях их осей, а вне распада электродов ($r > D_p/2$) в направлениях, смещенных от осей электродов на $\pm 15^\circ$ (см. рис. 5).

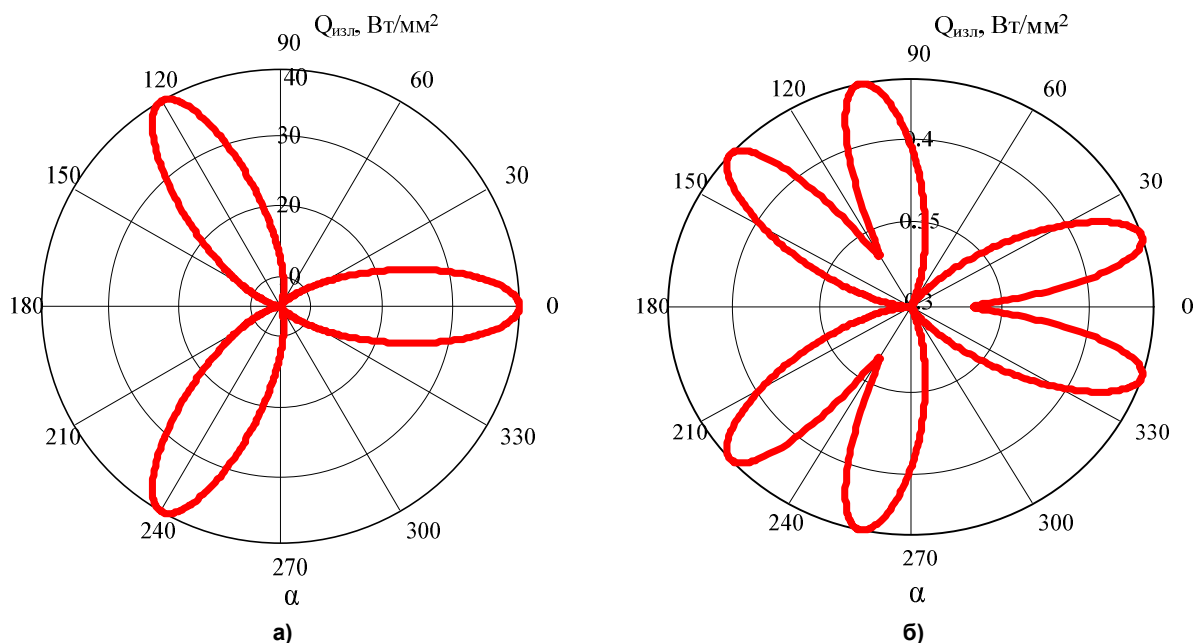


Рис. 5. Распределение теплового потока по азимутальной координате на расстоянии от центра распада электродов: а - $r = 0,4$ м; б - $r = 1,4$ м для шахтной печи, мощность трансформатора 86 МВА, действующее напряжение 450 В, $I_{дл} = 50$ кА, $I_{д} = 0,3$ м

Fig. 5. Heat flux distribution along the azimuth coordinate at a distance from the center of electrode decay: а - $r = 0,4$ м; б - $r = 1,4$ м for shaft furnace, transformer power 86 MVA, active voltage 450 V, $I_{дл} = 50$ кА, $I_{д} = 0,3$ м

5. Исследования излучения дуги на промышленном агрегате

Адекватность предлагаемой модели излучения дуг при их электромагнитном взаимодействии проводилась при помощи данных, полученных на промышленной дуговой шахтной печи, имеющей номинальную вместимость по металлошихте 150 т, $D_p = 1100$ мм и диаметр электродов 610 мм.

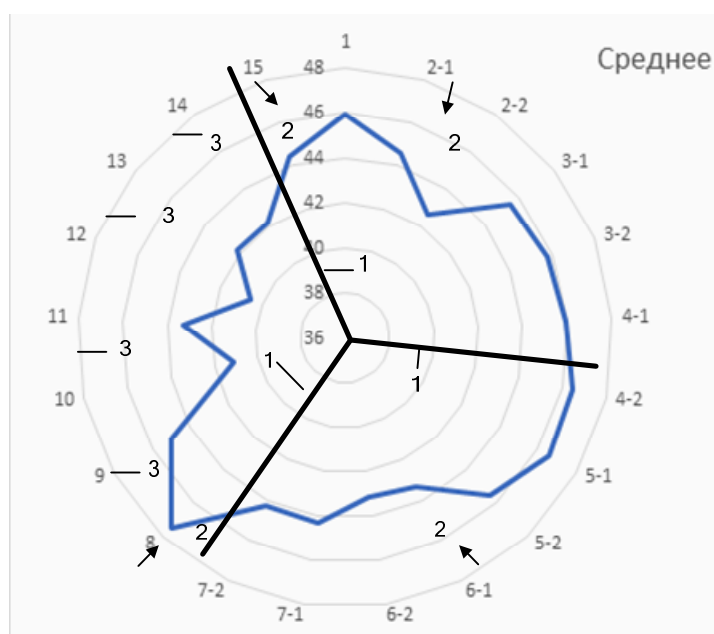


Рис. 6. Распределение средней температуры охлаждающей воды по азимутальной координате в зависимости от номера панели:

1 – прямые, соединяющие оси электродов с центром диаметра распада электродов, 2 – расположение газовых горелок RCB, 3 – расположение кислородных инжекторов
 Fig. 6. Distribution of average cooling water temperature by azimuth coordinate depending on panel number: 1 – straight lines connecting electrode axes to the center of electrode decay diameter, 2 – location of gas burners RCB, 3 – location of oxygen injectors

Косвенное влияние интенсивности излучения электрических дуг, падающего на боковые стенки печи, определялось по перепаду температур воды, проходящей через 20 водоохлаждаемых панелей. Из полученного многомерного массива данных были убраны грубые ошибки, далее были получены средние перепады температур для каждой панели. На рис. 6 показан полученный график зависимости значения средней температуры от номера панели в том порядке, в котором они расположены вдоль азимутальной координаты в печи.

Видно, что максимальные температуры наблюдаются не напротив линии, соединяющей центр распада электродов и их оси, а немного отклонены от нее по азимутальной координате (по ходу часовой стрелки). Это отклонение косвенно подтверждает тот факт, что среднеинтегральная равнодействующая электромагнитная сила к данной линии направлена под углом φ , как это показано на рис. 2. Видно также, что полученное распределение температур от номера панели вдоль азимутальной координаты не является симметричным. Объяснить это можно тем, что в шахтной печи на тепловосприятие боковых стен оказывают влияние газовые горелки и кислородные инжекторы.

Выводы

1. Проанализированы и уточнены существующие алгоритмы расчета для определения основных параметров системы свободных дуг трехфазного переменного тока, горящих на горизонтальную поверхность. Разработано программное обеспечение, позволяющее определять магнитные поля вблизи электрических дуг трехфазного переменного тока, находить величину и направление среднеинтегральных сил в зависимости от количества дуг, их геометрии и расположения. Установлено, что вблизи трех дуг трехфазного переменного тока наблюдается бегущее магнитное поле, значение модуля напряженности магнитного поля обратно пропорционально квадрату расстояния от центра распада электродов.

2. Получено, что среднеинтегральная электромагнитная сила, действующая на дугу, отклоняется от прямой, соединяющей центр распада электродов и ось электрода. Установлено, что если дуги имеют длину, превышающую в 1,5–2 раза расстояние между ними, то сила электромагнитного взаимодействия с другими параллельно горящими дугами существенно превышает силу взаимодействия с токами, проходящими по жидкому металлу.

3. Созданная компьютерная программа позволяет рассчитывать и визуализировать форму дуг. С помощью компьютерного моделирования была определена форма оси столба дуги для трехфазного переменного тока, установлено, что угол отклонения дуги от вертикали может составлять 45–65°.

4. С учетом формы дуг разработано алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее определять тепловой поток от трех дуг трехфазного переменного тока, горящих на горизонтальную поверхность, принимать решения об эффективной теплоотдаче излучения дуг к шихте в зависимости от наклона дуг, определяемое геометрией печи и токоподводов, а также протекающих токов.

5. Характер поведения равнодействующих электромагнитных сил и распределение тепловых потоков вблизи распада электродов подтверждаются экспериментальными данными.

6. Результаты моделирования и созданное программное обеспечение можно использовать при проектировании новых и реконструкции имеющихся многоэлектродных дуговых промышленных агрегатов (трехэлектродных и шестиэлектродных печей переменного тока), а также для определения воздействия электромагнитных полей и теплового излучения электрических дуг на приборы и человека. Специальное программное обеспечение может быть встроено в систему автоматизированного регулирования и прогнозирования тепловой работы промышленных агрегатов, для повышения достоверности оценки тепловосприятия шихты, износа футеровки печи при разных технологических режимах горения дуг.

Литература

1. Миронов, Ю.М. *Электрическая дуга в электротехнологических установках: моногр.* / Ю.М. Миронов. - Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – 290 с.
2. Кручинин, А.М. *Физические основы теплообменной модели электрической дуги в элект-*

ротехнологии / А.М. Кручинин // *Электротехнологии в первом десятилетии XXI века.* – М.: ИД МЭИ, 2013. – С. 55–77.

3. Mölder, H.; Järvik, J.; Vaimann, T.; Gordon, R. (2012). *Multi-Electrode Arc Furnace Technology with Improved Metal Processing Capability Using Current Driven Mixing // Conference Proceedings: 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Venice, May 18–25.* IEEE, P. 313–316.

4. Brusa, E.G.M. *Design and Structural Optimization of the Electric Arc Furnace Through a Mechatronic-Integrated Modeling Activity / E.G.M. Brusa, S.Morsut // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics.* – 2015. – Vol. 20. – P. 1099–1107. DOI: 10.1109/TMECH.2014.2364392

5. *Three dimensional analysis of an AC electric arc furnace / A. Kiyomarsi, A. Nazari, M. Ataei, H.K. Beheshti, H. Karimi // 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON 2009).* – Porto, Portugal, 2009. – P. 3697–3702. DOI: 10.1109/IECON.2009.5415134

6. Бортничук, Н.И. *Плазменно-дуговые плавильные печи / Н.И. Бортничук, М.М. Крутянский* – М.: Энергоиздат, 1981. – 120 с.

7. Кувалдин А.Б. *Компьютерное моделирование при изучении и расчете индукционных установок / А.Б. Кувалдин // Электрометаллургия.* – 2011. – № 1. – С. 37–45.

8. Елизаров, В.А. *Разработка тепловой модели рудно-термической печи и закрытой дугой / В.А. Елизаров // Электрометаллургия.* – 2011. – № 10. – С. 32–40.

9. Рогожина, И.Д. *Конструкции и проектирование дуговых печей / И.Д. Рогожина, О.И. Нохрина: учеб пособие.* – Новокузнецк.: Изд. центр СибГИУ. – 2011. – 311 с.

10. Макаров, А.Н. *Законы теплообмена электрической дуги и факела в металлургических печах и энергетических установках / А.Н. Макаров.* – Тверь: ТвГТУ, 2012. – 164 с.

11. Ячиков, И.М. *Анализ поведения магнитного поля вблизи электродов дуговых печей посредством математического моделирования / И.М. Ячиков, Е.М. Зарецкая // Известия вузов. Черная металлургия.* – 2011. – № 1. – С. 18–21.

12. Леушин, А.И. *Дуга горения / А.И. Леушин.* – М.: Металлургия, 1973. – 240 с.

13. 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. – P. 467–472. DOI: 10.3103/S0967091215070141

14. Ячиков, И.М. *Анализ основных электромагнитных сил, действующих на дугу в трехфазной дуговой печи / И.М. Ячиков, К.Н. Вдовин, Е.М. Костылева // Теория и технология металлургического производства.* – 2014. – № 2 (15). – С. 70–76.

15. *Расчет электромагнитных сил, действующих на дуги в трехфазной дуговой печи: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / И.М. Ячиков, Е.М. Костылева, В.Р. Храмин.* – № 2016618499.

16. Ячиков, И.М. *Математическая модель и алгоритмы расчета положения трех электрических дуг, горящих между параллельными электродами и токоподводящей поверхностью / И.М. Ячиков, Е.М. Костылева // Информационные технологии и системы: материалы Третьей междунар. конф.* – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2014. – С. 52–55.

17. *Взаимодействие дуг: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / И.М. Ячиков, Е.М. Костылева.* – № 2013619388. – БПБТ. – 2013. – № 4. – С. 324.

18. Сисоян Г.А. *Электрическая дуга в электрической печи / Г.А. Сисоян.* – М.: Металлургия, 1971. – 304 с.

19. Спелицин Р.И. *Влияние электрических режимов работы высокомоощных ДСП на заглубление дуги в жидкую ванну / Р.И. Спелицин, Н.А. Пирогов, В.Д. Смоляренко // Производство электростали: сб.тр. / НИИМ.* – 1977. – С. 46–50.

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. – T. 41. – № 7. – P. 550-554. DOI: 10.3103/S0967091211070151

21. Ячиков, И.М. *Модель теплового потока, падающего на поверхность металла от дуг в ДСП / И.М. Ячиков, Е.М. Зарецкая // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах: Междунар. сб. науч. трудов.* – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – Ч. 1. – С. 161–166.

Ячиков Игорь Михайлович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, jachikov@mail.ru.

Костылева Елизавета Марковна, аспирант кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, ezaretskaya@yandex.ru.

Поступила в редакцию 28 января 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200212

CHARACTERISTICS OF THREE-PHASE CURRENT ARCS, BURNING ON A HORIZONTAL SURFACE, WITH THEIR ELECTROMAGNETIC INTERACTION

I.M. Yachikov, jachikov@mail.ru,

E.M. Kostyleva, ezaretskaya@yandex.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Introduction. Multi-electrode arc furnaces using three-phase alternating current are widely used in metallurgy. The presence of several electric arcs creates a system with specific properties that are absent with a single burning arc. These properties are associated with the behavior of the magnetic field near three arcs, with the appearance of additional electromagnetic forces that change the shape and size of the arcs, and hence their thermal radiation. The intensity of electromagnetic interactions, the shape of the arc and its dynamic behavior, which in turn significantly affects the thermal work of the furnace, depend on the geometry of the arcs and the current strength. Knowing the nature of the forces acting on the arc, its position and behavior is important in the design and operation of furnaces, increasing the efficiency of management and automation of their work. The **aim** of the research is to study the behavior of the main characteristics of free electric arcs of a three-phase current burning on a horizontal surface, by creating the appropriate mathematical, algorithmic and software. **Materials and methods.** When performing the work, methods of computational mathematics and theory of algorithms were used. The created software using the Matlab application development tools and the MathCAD package was based on well-known methods: numerical integration and finding the minimum functions of many variables. **Results.** Issues related to the study of a system of three simultaneously burning arcs are considered. The analysis of the behavior of the magnetic field near three arcs is carried out. The electromagnetic forces that change the shape and size of arcs, and therefore their thermal radiation on a horizontal surface have been investigated. The simulation results were indirectly confirmed by experimental data conducted on an industrial furnace. **Conclusion.** Algorithms and programs have been created that allow to: evaluate the effect of electromagnetic fields on devices and humans located near arc furnaces; to study the behavior of the average integral electromagnetic forces acting on electric arcs; calculate and visualize the heat flux incident on a horizontal surface, depending on the geometry of the arcs and their parameters. Based on the created algorithms, special software can be created that is built into the system of automated regulation and prediction of the thermal operation of multi-electrode arc units to increase the reliability of evaluating the heat perception of a charge and water-cooled panels, wear of the furnace lining under different technological modes of arc burning.

Keywords: electric arc, arc steel furnace, three-phase alternating current, magnetic field strength, principle of electromagnetic fields superposition, electromagnetic interaction, form of the arc post axis, heat flow, thermal perception of the wal.

References

1. Mironov Yu.M. *Elektricheskaya duga v elektrotehnologicheskikh ustanovkakh: monografiya* [Electric Arc in the Electro Techno Logical Installations: Monograph]. Cheboksary, Chuvash. Univ. Publ, 2013, 290 p.
2. Kruchinin A. M. [Physical Bases of the Heat Exchange Model of an Electric Arc in Electrical Engineering]. *Electro Technologies in the First Decade of the XXI Century*. M.: ID MJeI, 2013, pp. 55–77.
3. Mölder H., Järvik J., Vaimann T., Gordon R. Multi-Electrode Arc Furnace Technology with Improved Metal Processing Capability Using Current Driven Mixing. Conference Proc.: *11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Venice, 2012, May 18–25. IEEE, pp. 313–316. DOI: 10.1109/EEEIC.2012.6221394
4. Brusa E.G.M., Morsut S. Design and Structural Optimization of the Electric Arc Furnace Through a Mechatronic-Integrated Modeling Activity. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, Vol. 20, pp. 1099–1107. DOI: 10.1109/TMECH.2014.2364392
5. Kiyoumars A., Nazari A., Ataei M., Beheshti H.K., Karimi, H. Three Dimensional Analysis of an AC Electric Arc Furnace. *Proc. of 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON 2009)*, Porto, Portugal (pp. 3697-3702). DOI: 10.1109/IECON.2009.5415134
6. Bortnichuk N.I., Krutyanskiy M.M. *Plazmenno-dugovye plavil'nye pechi* [Plasma Arc Melting Furnaces]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 120 p.
7. Kuvaldin A.B. [Computer Modeling in the Study and Calculation of Induction Plants]. *Electrometallurgy*, 2011, no. 1, pp. 37–45. (in Russ.)
8. Elizarov V.A. [Development of a Thermal Model of an Ore-thermal Furnace and a Closed Arc]. *Electrometallurgy*, 2011, no. 10, pp. 32–40 (in Russ.)
9. Rogozhina I.D., Nohrina O.I. *Konstruktsii i proektirovanie dugovykh pechey* [Design of Arc Furnaces]. Novokuzneck, SSIU Pibl., 2011. 311 p.
10. Makarov A.N. *Zakony teploobmena elektricheskoy dugi i fakela v metallurgicheskikh pechakh i energeticheskikh ustanovkakh* [The Laws of Heat Exchange of an Electric Arc and Torch in Metallurgical Furnaces and Power Plants], Tver', TSTU, 2012. 164 p.
11. Yachikov I.M., Zaretskaya E.M. [Analysis of the Behavior of the Magnetic Field Near the Electrodes of Arc Furnaces through Mathematical Modeling], *News of HEU. Ferrous Metallurgy*, 2011, no. 1, pp. 18–21 (in Russ.)
12. Leushin A.I. *Duga goreniya* [Arc of burning]. Moscow, Metallurgy Publ., 1973. 240 p.
13. 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
14. Yachikov I.M., Vdovin K.N., Kostyleva E.M. [Analysis of the Basic Electromagnetic Forces Acting on an Arc in a Three-phase Arc Furnace]. *Theory and Technology of Metallurgical Production*, 2014, no. 2 (15), pp. 70-76. (in Russ.)
15. Yachikov I.M., Kostyleva E.M., Hramshin V.R. *Raschet elektromagnitnykh sil, deystvuyuschikh na dugi v trekhfaznoy dugovoy pechi. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no 2016618499* [Calculation of Electromagnetic Forces Acting on Arcs in a Three-phase Arc Furnace. Certificate of State Registration of a CoP program no 2016618499].
16. Yachikov I. M., Kostyleva E. M. A Mathematical Model and Algorithms for Calculating the Position of Three Electric Arcs Burning between Parallel Electrodes and a Current-carrying Surface. *Informatsionnye tekhnologii i sistemy: materialy Tret'ey mezhdunar. konf* [Information Technologies and Systems: Materials of the Third Int. conf], Chelyabinsk, 2014, pp. 52–55. (in Russ.)
17. Yachikov I. M., Kostyleva E. M.. *Vzaimodeystvie dug. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no 2013619388* [Arc Interaction. Certificate of State Registration of a Computer Program no 2013619388].
18. Sisoyan G.A. *Elektricheskaya duga v elektricheskoy pechi* [Electric Arc in an Electric Furnace], Moscow, Metallurgu Publ., 1971, 304 p.
19. Spelitsin R.I., Pirogov N.A., Smolyarenko V.D. [The Influence of the Electrical Modes of High-power Chipboard on the Deepening of the Arc in a Liquid Bath]. *Electric Steel Production, Coll. of Works NIIM*, 1977, pp. 46–50. (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. DOI: 10.3103/S0967091211070151

21. Yachikov I.M., Zaretskaya E.M. [Model of the Heat Flux Incident on the Metal Surface from Arcs in Particleboard]. *Mathematical and Software Systems in the Industrial and Social Fields*, Magnitogorsk, 2011, part 1, pp. 161–166. (in Russ).

Received 28 January 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ячиков, И.М. Характеристики электрических дуг трехфазного тока, горящих на горизонтальную поверхность, при их электромагнитном взаимодействии / И.М. Ячиков, Е.М. Костылева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 125–137. DOI: 10.14529/ctcr200212

FOR CITATION

Yachikov I.M., Kostyleva E.M. Characteristics of Three-Phase Current Arcs, Burning on a Horizontal Surface, with Their Electromagnetic Interaction. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 125–137. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200212
