

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

УДК 669.187.013.621

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ДУГИ В ТРЁХФАЗНОЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

*Н.В. Евсеева, Л.А. Лазуко, Ю.Б. Черкасова, С.У. Хасанов
г. Челябинск, ОАО «Челябинский металлургический комбинат»*

RESEARCH OF ELECTRODYNAMIC FORCES INFLUENCING THE ARCS OF THREE-PHASE EAF

*N. Yevseyeva, L. Lazuko, Y. Cherkasova, S. Khasanov
Chelyabinsk, Joint Stock Company "Chelyabinsk Metallurgical Plant"*

Приведён принцип расчёта электродинамических сил, действующих на электрические дуги в трёхфазной ДСП, с построением графического изображения этих сил. Дано объяснение экстремальному характеру зависимости потребляемой из сети активной мощности от тока. Доказано, что образование мениска под дугой наблюдается только при токах, соответствующих нисходящей ветви зависимости мощности дуги от тока. Визуализация дуги позволяет выбрать оптимальную рабочую точку для любого периода плавки.

Ключевые слова: электродинамические силы, визуализация (графическое изображение), газовая струя ореола, столб дуги, восходящая и нисходящая ветвь зависимости мощности дуги от тока.

The article describes the calculation principle for electrodynamic forces influencing the electric arcs of a three-phase EAF and their graphic representation. Extreme type of the relationship between current and active power consumed from the network is explained. The article proves that metal meniscus is formed under the arc when the currents correspond with descending branch of graphic chart showing the relationship between current and arc power only. Graphic representation of the arc allows choosing the effective operating point for any period of melting process.

Keywords: electrodynamic forces, imaging (graphic representation), circle of flame efflux, arc column, ascending and descending branches of the graphic chart showing the relationship between current and arc power.

Исследование электродинамических сил, действующих на электрическую дугу в трёхфазной дуговой сталеплавильной печи (ДСП), выполнено по методике, применяемой в теории электрических аппаратов, и изложено в работах [1–4].

Все электродинамические силы, действующие на дуги в трёхфазных ДСП, имеют чёткую математическую интерпретацию, и при современном состоянии программирования и вычислительной техники, применяемой на ДСП, могут быть изображены графически для действующей печи в реальном или ином масштабе времени. Величина и направление электродинамических сил (э.д.сил) определяют поведение электрической дуги, её столба и ореола. При наличии в ДСП холодной шихты магнитная проницаемость среды μ возрастает в десятки раз (на жидкой ванне $\mu=1$), э.д.силы,

пропорциональные величине μ , увеличиваются настолько, что выдувают не только газовую оболочку дуги (ореол), но и сам столб дуги. Поскольку в трёхфазной ДСП э.д.силы вращаются и направлены наружу в сторону стен печи, то в процессе расплавления шихты образуются колодцы, диаметр которых зависит от длины дуги и величины э.д.сил, определяемых магнитной проницаемостью μ , т. е. температурой шихты. В процессе работы печи электрический режим подбирается таким образом, чтобы проплавляемые колодцы имели форму перевёрнутого конуса.

В ходе расплавления шихты образуется жидкая ванна и магнитная проницаемость среды даже при наличии нерасплавленных, но нагретых выше точки Кюри (700 °С) кусков шихты, снижается до $\mu=1$. Э.д.силы также снижаются по величине и

даже при достаточно больших токах не могут изменить положение столба дуги, но ореол дуги сдувается этими силами в сторону стен печи и вверх, а при токах, больших максимального значения, – в сторону стен печи и вниз.

В характеристике $P_d(I)$ зависимости мощности дуги P_d от тока дуги I будем выделять восходящую ветвь – до достижения критического значения тока $I_{кр}$, экстремальный (весьма «размытый») участок и нисходящую ветвь – до тока короткого замыкания.

Визуальное наблюдение за дугой на печах от 8 МВА до 80 МВА показало, что при работе на восходящей ветви зависимости $P_d(I)$ не наблюдается мениска под дугой.

При токе $I_{кр}$ происходит лавинообразное увеличение сечения дуги вследствие перехода дуги из режима работы с катодным пятном в режим работы без катодного пятна. При уменьшении тока происходит внезапный обратный переход к режиму с катодным пятном, однако при более низком значении тока, чем $I_{кр}$ [6].

Как установлено в работе [4], плотность тока в катодном пятне для всех ДСП постоянна и равна около 82 А/см^2 . При резком увеличении сечения дуги и расплывании её по всему сечению электрода плотность тока, естественно, падает.

Режим работы на нисходящей ветви характеристики $P_d(I)$ широко применялся на 100-тонных ДСП, выпускающих готовые марки стали, и рекомендован институтом металлургии (НИИМ) для периода доплавления ($\text{tg} \phi > 1$).

При лавинообразном увеличении катодного пятна электрическое сопротивление столба дуги r_d длиной l_d и сечением S_d падает: $r_d = \rho_d l_d / S_d$, где ρ_d – удельное электрическое сопротивление дуги, $\rho_d = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [4, с. 49].

Определим величину и направление э.д.сил при токах, соответствующих восходящей и нисходящей ветви характеристики $P_d(I)$.

На дугу первой фазы (фА) действуют э.д.силы:

- со стороны параллельных проводников двух других фаз $F_{1/2\parallel}, F_{1/3\parallel}$;
- со стороны токов, протекающих в жидкой ванне по сторонам треугольника, $F_{1/2\Delta}, F_{1/3\Delta}$;
- аксиальная электродинамическая сила, возникающая при взаимодействии тока дуги с собственным магнитным полем, $F_{акс}$.

Запишем мгновенные значения этих сил:

$$F_{1/2\parallel} = 2 I_1 I_2 \mu \cdot 10^{-7} \sin(\omega t) \sin(\omega t - 2/3\pi) k_{1/2\parallel}, \text{ Н,}$$

$$F_{1/3\parallel} = 2 I_1 I_3 \mu \cdot 10^{-7} \sin(\omega t) \sin(\omega t + 2/3\pi) k_{1/3\parallel}, \text{ Н,}$$

где I_1, I_2, I_3 – действующие значения фазных токов, $k_{1/2\parallel}, k_{1/3\parallel}$ – коэффициенты контура сил $F_{1/2\parallel}, F_{1/3\parallel}$ [6, с. 14].

Вычисление коэффициентов контура подробно рассмотрено в [1].

Суммарная сила $F_{1\parallel}$, действующая на дугу фазы 1 со стороны параллельных проводников фаз 2 и 3, равна векторной сумме

$$F_{1\parallel} = F_{1/2\parallel} + F_{1/3\parallel}.$$

Электродинамические силы, действующие на дугу фазы 1 со стороны условных проводников 2 и 3 (рис. 1), образованных токами в ванне ДСП, равны:

$$F_{1/2\Delta} = \mu I_A I_{AB} \cdot 10^{-7} k_{1/2\Delta}, \text{ Н,}$$

$$F_{1/3\Delta} = \mu I_A I_{CA} \cdot 10^{-7} k_{1/3\Delta}, \text{ Н,}$$

где I_A, I_{AB}, I_{CA} – действующие значения токов, $k_{1/2\Delta}, k_{1/3\Delta}$ – коэффициенты контуров для проводников 1–2 и 1–3 [1].

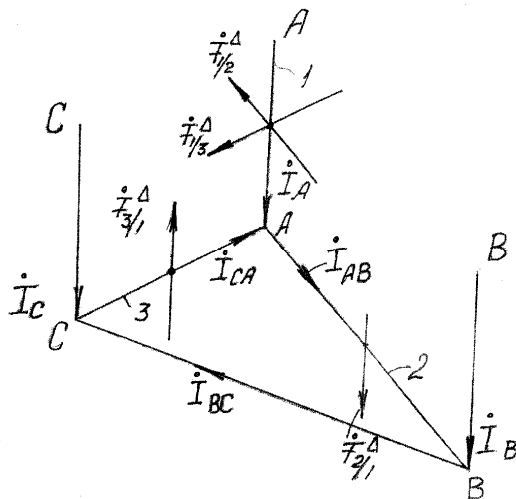


Рис. 1. Направление э.д.сил $F_{1/2\Delta}, F_{2/1\Delta}, F_{1/3\Delta}, F_{3/1\Delta}$ для положительных значений I_A, I_{AB}, I_{CA}

Мгновенные значения токов:

$$i_A = \sqrt{2} I_A \sin(\omega t), i_{AB} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_A \sin(\omega t + \pi/6),$$

$$i_{CA} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_A \sin(\omega t + 5/6 \pi)$$

Мгновенные значения сил:

$$F_{1/2\Delta} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_A^2 \cdot 10^{-7} k_{1/2\Delta} \sin(\omega t) \sin(\omega t + \pi/6),$$

$$F_{1/3\Delta} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_A^2 \cdot 10^{-7} k_{1/3\Delta} \sin(\omega t) \sin(\omega t + 5/6 \pi).$$

Суммарная сила $F_{1\Delta}$, действующая на дугу фазы 1 со стороны токов, протекающих в ванне печи по сторонам треугольника, равна векторной сумме сил $F_{1/2\Delta}, F_{1/3\Delta}$:

$$F_{1\Delta} = F_{1/2\Delta} + F_{1/3\Delta}.$$

На рис. 1 показано положительное направление векторов тока I_A, I_{AB}, I_{CA} . В соответствии с [6, с. 19], если ток проходит через угол от одного проводника к другому, то силы, действующие на эти проводники, направлены наружу (силы $F_{1/2\Delta}, F_{2/1\Delta}$). Если токи направлены навстречу, к углу (как I_A и I_{CA} на рис. 1), то силы, действующие на проводники 1 и 3, стремятся уменьшить угол и направлены внутрь (силы $F_{1/3\Delta}, F_{3/1\Delta}$ на рис. 1).

Аксиальная электродинамическая сила возникает в результате взаимодействия тока дуги с соб-

ственным магнитным полем и определяется по формуле [2]:

$$F_{\text{акс}} = 5 \cdot 10^{-8} I^2 \mu \ln \frac{S_{\Sigma}}{S_p}, \text{ Н},$$

где I – действующее значение тока дуги, А; μ – магнитная проницаемость среды; S_{Σ} – площадь сечения электрода, см^2 ; S_p – площадь растекания тока в жидкой ванне, см^2 .

Площадь растекания тока S_p в жидкой ванне печи пропорциональна сечению дуги $S_p = k_p S_d$, где k_p – коэффициент растекания тока.

Статистическое сечение дуги (в см^2) при токе $I < I_{\text{кр}}$ может определяться по формуле $S_d = 12,2 I$, где I – ток дуги, кА [7].

В общем случае сечение дуги определяется по формуле

$$S_d = \rho_d I_d / r_d, \text{ м}^2,$$

где ρ_d – удельное сопротивление плазмы дуги, $\rho_d = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [7]; I_d – длина дуги, м.

Приняв, что градиент падения напряжения вдоль вертикальной оси дуги равен 1 В/мм [9, с. 49], получим эмпирическое соотношение: длина дуги I_d (мм) численно равна напряжению дуги U_d (В). Тогда

$$S_d = 11,7 U_d / r_d \text{ (см}^2\text{)}.$$

Для агрегата комплексной обработки стали (АКП) с печным трансформатором (ПТ) 32 МВА для 9-й ступени ($U_{\text{ст}} = 306 \text{ В}$) принято $k_p = 3,2$ и формула для определения аксиальной силы примет вид

$$F_{\text{акс}} = 5 \cdot 10^{-8} I_d^2 \mu \ln \left(\frac{S_{\Sigma} r_d}{3,2 \cdot 11,7 U_d} \right), \text{ Н}.$$

Запишем эту формулу для мгновенного значения тока дуги $i_d = \sqrt{2} I_d \sin \omega t$:

$$F_{\text{акс}} = 10^{-7} I_d^2 \sin^2(\omega t) \mu \ln \left(\frac{S_{\Sigma} r_d}{3,2 \cdot 11,7 U_d} \right), \text{ Н}.$$

При токах $I_{\text{пр}}$, когда $S_{\Sigma} = S_p$, выражение под знаком \ln равно 1, а $F_{\text{акс}} = 0$. При токах $I > I_{\text{пр}}$ аксиальная сила меняет знак, становится отрицательной и направлена вниз. Результирующая э.д.сил, действующая на дугу первой фазы F_1 , равна векторной сумме сил $F_{1\parallel}$, $F_{1\Delta}$, $F_{1\text{акс}}$:

$$F_1 = F_{1\parallel} + F_{1\Delta} + F_{1\text{акс}}.$$

Угол поворота ψ_1 результирующей силы $F_1(\omega t)$ относительно оси Z равен

$$\psi_1 = \arccos \left(\frac{F_{1\text{акс}} F_1}{|F_{1\text{акс}}| \cdot |F_1|} \right).$$

При $\cos \psi_1 > 0$ результирующая сила F_1 направлена вверх и в сторону стен печи, при $\cos \psi_1 = 0$ сила F_1 перпендикулярна вертикальной оси и выдувает ореол дуги в сторону стен печи, при $\cos \psi_1 < 0$ сила F_1 направлена вниз и в сторону стен печи.

На базе рассмотренного выше анализа электродинамических сил разработана программа рас-

чёта и визуализации этих сил в трёхмерном пространстве. Графическое изображение э.д.сил позволяет получить представление о положении ореола дуги и её столба по ходу плавки в реальном масштабе времени, так как непосредственное наблюдение за дугой на мощных ДСП с использованием газокислородных горелок просто невозможно. Ориентируясь на графическое изображение э.д.сил технологи могут выбрать наиболее рациональный режим работы ДСП. В программу можно ввести момент изменения μ магнитной проницаемости среды в зависимости от потребленной электроэнергии или связав уменьшение μ с исчезновением высших гармоник. Установка программы визуализации дуги особенно желательна на агрегатах ковш-печь, так как обработка металла на них ведётся, как правило, на нисходящей ветви характеристики $R_d(I)$. Эта программа позволяет рассчитывать и отображать силы как динамически – в реальном масштабе времени по текущим значениям тока, напряжения и положения переключателя ступеней напряжения, так и статически – по заданным пользователем значениям. Переключение режимов работы и задание необходимых параметров производится в специальном графическом интерфейсе.

Программный продукт состоит из двух приложений: программы расчёта сил, действующих на дугу, «ForceWind» и программы визуализации векторов сил «ForceControl».

Программа «ForceWind» написана на языке Watcom C v10.6. Программа «ForceControl» реализована в пакете визуального программирования Photon Application Builder графической оболочки Photon v1.14. Обе программы работают в среде операционной системы реального времени QNX 4.25.

В качестве примера приводим расчёт э.д.сил в статическом режиме программы по данным пользователя, соответствующим экспериментальным характеристикам печи.

На рис. 2 приведены электрические характеристики дуговой печи с ПТ 32 МВА (агрегат ковш-печь, АКП). Зависимости активной мощности P_0 и реактивной мощности Q_0 от тока сняты экспериментально, зависимости напряжения дуги U_d и активного сопротивления r_d от тока получены расчётным путём. Управляющий комплекс АКП содержит программу расчёта всех характеристик дуги, которые используются в программе визуализации дуги в динамическом режиме.

На рис. 3 показан вид сверху для режима, в котором токи по фазам выбраны одинаковыми, и диаграммы мгновенных значений э.д.сил образуют симметричную систему. Направление вращения поля ω_0 – по часовой стрелке, а электродинамические силы вращаются навстречу полю, что предотвращает раскручивание ниппельных соединений электродов при работе на жидкой ванне.

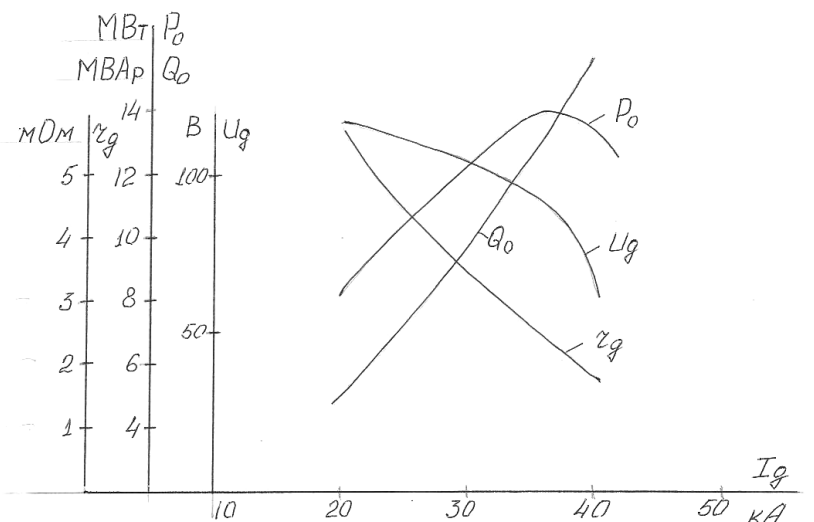


Рис. 2. Электрические характеристики ДСП (АКП), ПТ 32 МВА, ступень 9, $U_{ст}=306$ В, короткая сеть: $r_{кс}=1,033$ мОм, $x_{кс}=3,146$ мОм

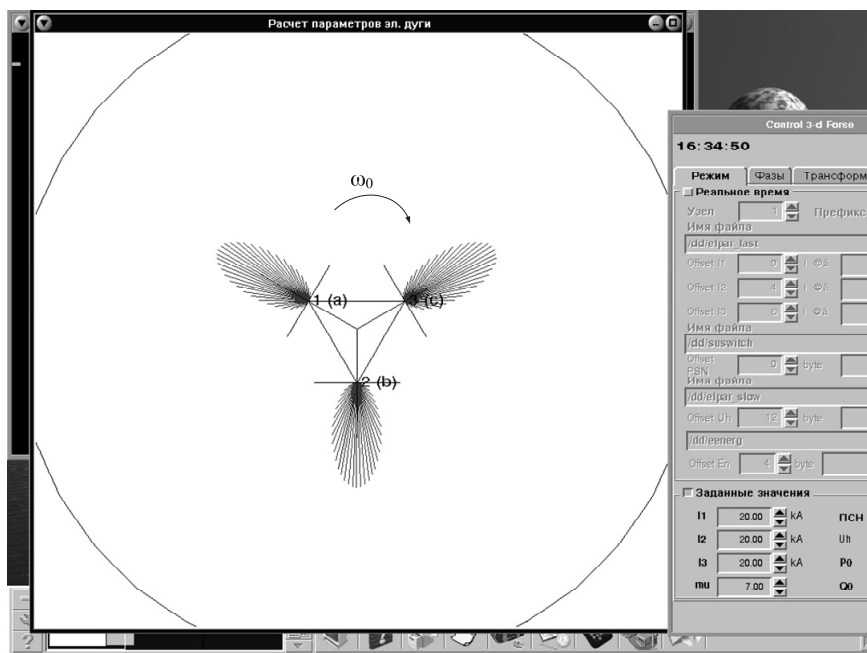


Рис. 3. Электродинамические силы (вид сверху) при $I=20$ кА, $P_0=8,2$ МВт, $Q_0=5$ МВАр

На рис. 4 изображены те же силы в изометрии. Показаны направление трёхфазного магнитного поля ω_0 , зеркало ванны и длина дуги, численно равная U_d (117 мм). Векторы мгновенных значений э.д.сил для каждой фазы лежат в одной плоскости, силы при заданных токах направлены вверх и в сторону стен печи. Под действием этих сил происходит выдувание ореола дуги вверх, в результате чего может гореть футеровка свода.

При увеличении тока до 35 кА (рис. 5) э.д.сил меняют направление, но угол ψ лишь незначительно больше 90° , поэтому силы направлены почти горизонтально в сторону стен печи, что может

способствовать прогоранию футеровки в области шлакового пояса.

Выводы

Использование вычислительной техники позволяет не только выполнять расчёты электродинамических сил, действующих на дуги в трёхфазной ДСП, но и получать изображение этих сил как в статике, так и на действующей печи в реальном масштабе времени. Исследование э.д.сил в разные периоды плавления дает возможность анализировать механизм их воздействия на электрическую дугу и параметры технологического процесса. В результате исследований установлено.

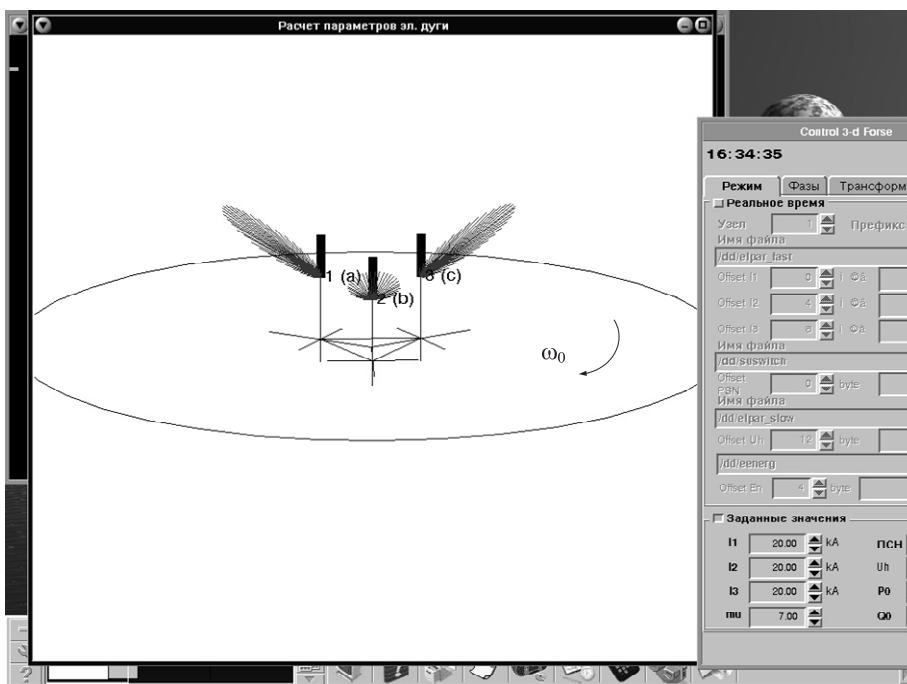


Рис. 4. Электродинамические силы в изометрии при $I=20$ кА, $P_0=8,2$ МВт, $Q_0=5$ МВАр

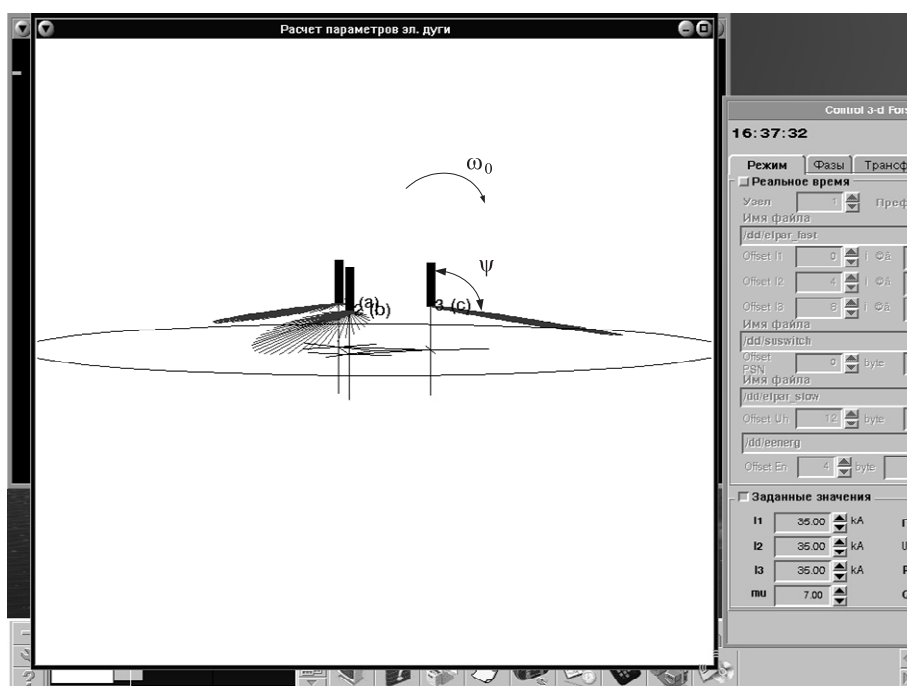


Рис. 5. Электродинамические силы при $I=35$ кА, $P_0=13,8$ МВт, $Q_0=12,4$ МВАр

1. Вращающийся вектор э.д.сил для каждой фазы направлен вверх или вниз (в зависимости от величины тока) и в сторону стен печи.

2. Вектор э.д.сил вращается навстречу магнитному полю дуговой печи.

3. Э.д.силы резко возрастают при наличии в печи холодной шихты ($\mu \gg 1$) и выдувают вверх и в сторону стен печи не только ореол, но и столб

дуги, что способствует интенсивному плавлению металла.

4. При достижении критического значения тока, соответствующего началу экстремального участка зависимости активной мощности дуги от тока, сечение дуги S_d лавинообразно растёт, растекаясь по всему торцу электрода, а результирующая электродинамическая сила меняет направление (сверху вниз).

5. Графическое изображение э.д.сил, выведенное на пульт сталевара, позволяет выбрать значение тока, оптимального для каждого периода плавки.

Литература

1. *Определение электродинамических усилий, действующих на электрические дуги и электроды в ДСП* / Н.В. Евсеева, И.В. Гончаренко, В.И. Смирнов и др. // *Инжиниринг, инновации, инвестиции: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЧНЦ РАЕН, 2006. – Вып. 8. – С. 83–98.*
2. *Аксиальные электродинамические силы, действующие на дугу в электродуговой печи* / Н.В. Евсеева, И.В. Гончаренко, В.И. Смирнов и др. // *Инжиниринг, инновации, инвестиции: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЧНЦ РАЕН, 2006. – Вып. 8. – С. 76–82.*
3. *Мгновенные электродинамические силы, действующие на дугу в трёхфазной дуговой сталеплавильной печи* / Н.В. Евсеева, И.В. Гончаренко, В.И. Смирнов и др. // *Современные технологии и бизнес: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЧНЦ РАЕН, 2006. – Вып. 1. – С. 81–95.*
4. *Анализ характера вращения электродинамических сил* / Н.В. Евсеева, И.В. Гончаренко, В.И. Смирнов и др. // *Наука и производство: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЧНЦ РАЕН, 2007. – С. 172–180.*
5. *Сисоян, Г.А. Электрическая дуга в электрической печи* / Г.А. Сисоян. – М.: *Металлургия*, 1974.
6. *Арцимович, Л. Плазменные ускорители* / Л. Арцимович. – М., 1973. – С. 158.
7. *Холявский, Г.Б. Расчёт электродинамических усилий в электрических аппаратах* / Г.Б. Холявский. – М.; Л.: *Госэнергоиздат*, 1962.
8. *Анализ электрических параметров дуги переменного тока в дуговой сталеплавильной печи* // Н.В. Евсеева, И.В. Гончаренко, В.И. Смирнов и др. // *Интеллектика, логистика, системология: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЧНЦ РАЕН, 2005. – Вып. 15. – С. 44–51.*
9. *Спелицин, Р.И. Влияние электрических режимов работы высокоомощных ДСП на заглубление дуги в жидкую ванну* / Р.И. Спелицин, Н.А. Пирогов, В.Д. Смоляренко // *Производство электро-стали: темат. сб. – М.: *Металлургия*, 1977. – № 6. – С. 46–50.*

Поступила в редакцию 02.03.2011 г.

Евсеева Нина Васильевна – инженер, ОАО «Челябинский металлургический комбинат». Контактный телефон: (351) 725-41-71.

Yevseyeva Nina Vasilievna – an engineer of Joint Stock Company “Chelyabinsk Metallurgical Plant”. Tel.: (351)725-41-71.

Лазуко Леонид Анатольевич – начальник участка, ОАО «Челябинский металлургический комбинат». Контактный телефон: (351) 725-41-71.

Lazuko Leonid Anatolievich is the head of the workshop of Joint Stock Company “Chelyabinsk Metallurgical Plant”. Tel.: (351) 725-41-71

Черкасова Юлия Борисовна – ведущий программист, ОАО «Челябинский металлургический комбинат». Контактный телефон: (351) 725-36-89.

Cherkasova Yulia Borisovna – a senior programmer of Joint Stock Company “Chelyabinsk Metallurgical Plant”. Tel.: (351) 725-36-89.

Хасанов Сабиржан Урунбасарович – ведущий математик, ОАО «Челябинский металлургический комбинат». Контактный телефон: (351) 725-36-89.

Khasanov Sabirzhan Urubasarovich – a senior mathematician of Joint Stock Company “Chelyabinsk Metallurgical Plant”. Tel.: (351) 725-36-89.