

УДК 621.365.2:001.57

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-6-83-90

Прогнозирование энергопотребления в период плавки шихты в дуговых сталеплавильных печах

А.М. Кручинин, М.Я. Погребисский, Е.С. Рязанова, А.Ю. Чурсин

Предложено решение задачи выбора рабочего тока электрической дуги, обеспечивающего при заданных параметрах эквивалентной схемы дуговой сталеплавильной печи (ДСП) минимальный расход электроэнергии на плавление шихты на основе разработанных методов универсальных и структурных характеристик теплообменной модели дуги (ТОМЭД). При решении задачи учтены следующие факторы: условия теплообмена дуги в плавильном пространстве, влияния теплового режима электродов, длины дуги на структуру тепловых потоков при нагреве дугами, химического состава рабочей среды на теплофизические характеристики плазмы столба дуги.

Основная особенность нагрева дугами в плавильном пространстве ДСП — сложный характер нагрева шихты за счет излучения дуг и конвекции в результате движения плазмы в столбе дуг. Широкий диапазон изменения соотношения мощности излучения и мощности, передаваемой конвекцией, оказывает влияние на скорость плавления шихты и расход электроэнергии в период плавления. Интенсивность плавления шихты в значительной степени зависит от уровня мощности излучения дуг.

Расчет излучения дуг ДСП с учетом температурного профиля столба выполнен методом универсальных характеристик дуги на основе решения системы нелинейных алгебраических уравнений цилиндрической модели столба ТОМЭД. Расчет длины дуги основан на методе структурных характеристик ТОМЭД и заключается в сравнении значения напряжения дуги, рассчитанного с помощью уравнения эквивалентной схемы замещения печи, и напряжения дуги, рассчитанного на основе ТОМЭД. Зная длину дуги, можно сделать расчет мощности излучения дуг в плавильном пространстве ДСП.

После проведенного по предложенной методике расчета рабочей характеристики мощности излучения дуг и характеристики полезной мощности печи возможно прогнозирование расхода электроэнергии на расплавление твердой шихты и времени расплавления шихты под током. Расчетные значения времени расплавления твердой шихты под током для ДСП низкой и высокой мощности демонстрируют хорошее совпадение с опытными данными.

Предложенный метод прогнозирования удельного расхода электроэнергии на плавление твердой шихты в дуговых печах позволяет при наладке и разработке электрического режима ДСП выбрать рабочий ток дуг, обеспечивающий максимальную скорость плавки твердой шихты и, тем самым, обеспечить снижение расхода электроэнергии в рабочем цикле печи.

Ключевые слова: электрическая дуга, дуговая печь, теплообменная модель, энергопотребление.

Для цитирования: Кручинин А.М., Погребисский М.Я., Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю. Прогнозирование энергопотребления в период плавки шихты в дуговых сталеплавильных печах // Вестник МЭИ. 2019. № 6. С. 83—90. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-6-83-90.

Predicting the Power Consumption during Furnace Charge Melting in Steelmaking Electric Arc Furnaces

A.M. Kruchinin, M.Ya. Pogrebissky, E.S. Ryazanova, A.Yu. Chursin

A solution to the problem of selecting the operating arc current at which the minimum amount of electricity is consumed for melting the furnace charge with the specified parameters of the steelmaking electric arc furnace (EAF) equivalent circuit is proposed based on the developed methods of universal and structural characteristics of the arc heat-transfer model (ATHM) is proposed. In solving the problem, the following factors were taken in consideration: the arc heat-transfer conditions in the melting space, the influence of the electrode thermal operation conditions, the influence of arc length on the heat flux structure in heating the charge by arcs, and the effect the chemical composition of working medium has on the thermophysical characteristics of the arc column plasma.

The main specific feature of heating by arcs in the EAF melting space is a complex pattern of furnace charge heating due to radiation from arcs and convection as a result of plasma motion in the arc columns. The wide variation range of the ratio of the radiation power to the power transferred by convection has an effect on the furnace charge melting rate and on the amount of electricity consumed in the course of melting. The furnace charge melting intensity depends to a significant extent on the arc radiation power level.

The radiation from EAF arcs was numerically analyzed with due regard to the column temperature profile using the arc universal characteristics method by solving the system of nonlinear algebraic equations of the column cylindrical model (ATHM). The arc length is calculated using the

ATHM structural characteristics method and consists in comparing the arc voltage calculated from the furnace equivalent circuit equation with the arc voltage calculated using the ATHM. Knowing arc length, it is possible to calculate the arc radiation power in the EAF melting space.

After calculating the arc radiation power performance characteristic and the furnace useful power characteristic according to the proposed technique, it is possible to predict the amount of electricity consumed for melting the solid furnace charge and the time of its melting with the furnace being energized. The calculated values of the solid furnace charge melting time for small- and large-capacity EAFs during their energized operation show good agreement with the experimental data.

The proposed method for predicting the specific consumption of electricity for melting solid furnace charge in arc furnaces opens the possibility to select — in developing the EAC electric operation mode and in adjusting its operation—the arc operating current at which the maximum solid furnace charge melting rate is achieved and, thereby, to achieve a smaller consumption of electricity in the furnace operating cycle.

Key words: electric arc, arc furnace, heat-transfer model, power consumption.

For citation: Kruchinin A.M., Pogrebissky M.Ya., Ryazanova E.S., Chursin A.Yu. Predicting the Power Consumption during Furnace Charge Melting in Steelmaking Electric Arc Furnaces. Bulletin of MPEI. 2019;6:83—90. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-6-83-90.

Введение

За последние 15 — 20 лет просматривается отчетливое увеличение доли электростали в общем объеме производства, которая составляет в настоящее время около 40%, причем в ряде государств эта тенденция более значительная, так в США она превышает 45%, в Италии — 60%, в Испании — 72% [1, 2]. Это связано с современными требованиями к качеству конструкционных материалов, а также необходимостью утилизации стального лома.

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) — один из наиболее мощных потребителей электрической энергии [3 — 7], большая часть которой (до 60%) расходуется в начальный период металлургического процесса, когда происходит расплавление твердой шихты [3 — 5, 8].

Более четырех десятилетий назад по инициативе профессоров А.А. Федорова и М.Я. Смелянского в НИУ «МЭИ» были начаты работы по проблемам электроснабжения ДСП с вероятностной природой нагрузки:

- исследование влияния ДСП на системы электроснабжения;
- оптимизация графиков нагрузки (режимов работы);
- изучение условий работы печных трансформаторов и высоковольтных выключателей;
- повышение эффективности и надежности электроснабжения ДСП (разработка мер по снижению асимметрии, фликкер-эффекта, высших гармонических, повышению коэффициента мощности);
- анализ влияния рода тока (переменного и постоянного, токов сложной формы) на системы электроснабжения ДСП;
- разработка методов энергосбережения при работе ДСП и оптимизация электроснабжения путем компьютерного моделирования;
- создание регуляторов и систем автоматики.

Результаты исследований приведены в [4, 9 — 22].

Предложена методика прогнозирования удельного расхода электроэнергии на плавление твердой шихты в дуговых печах, позволяющая при наладке или разработке электрического режима ДСП выбрать рабочий ток дуг, обеспечивающий максимальную скорость плавки твердой шихты и, тем самым, обеспечить сни-

жение расхода электроэнергии в рабочем цикле печи. В настоящий момент решение данной задачи весьма затруднено вследствие ее многофакторности и сложности структуры теплообмена. Необходим учет следующих факторов:

- условий теплообмена дуги в плавильном пространстве;
- влияния теплового режима электродов;
- воздействия длины дуги на структуру тепловых потоков при нагреве дугами;
- влияния химического состава рабочей среды на теплофизические характеристики плазмы (ТФХ) столба дуги.

Получено решение данной задачи на основе разработанных методов универсальных и структурных характеристик теплообменной модели дуги (ТОМЭД) [23 — 25].

Влияние электрического режима на структуру нагрева шихты дугами

Основная особенность нагрева дугами в плавильном пространстве ДСП — сложный характер нагрева шихты за счет излучения дуг и конвекции в результате движения плазмы в столбе дуг.

На рисунке 1 показана зависимость от длины дуги долей мощности излучения дуг n_e и мощности, передаваемой конвекцией n_k , в общей полезной мощности печи при плавлении шихты в дуговой печи сверхвысокой мощности ДСП-100Иб.

Широкий диапазон изменения структуры нагрева шихты дугами (соотношения мощности излучения и мощности, передаваемой конвекцией) влияет на скорость плавления шихты и расход электроэнергии в период плавления. Интенсивность плавления шихты после завалки в значительной степени зависит от уровня мощности излучения дуг.

Согласно данным рис. 1, мощность излучения дуг существенно отличается от полезной мощности и в режиме коротких дуг может составлять не более 30% от нее [3, 4]. Излучение плазмы столба дуг носит объемный характер и требует для расчета знания температурного профиля дуги.

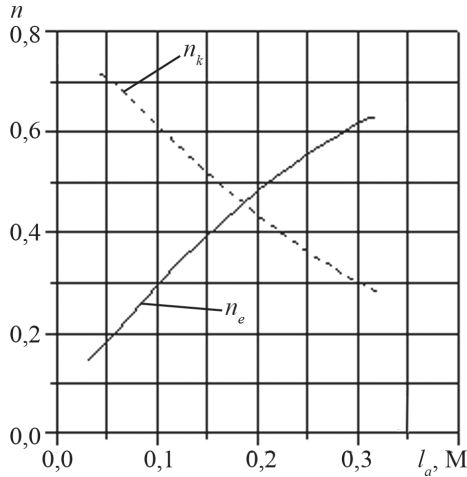


Рис. 1. Влияние длины дуги на структуру нагрева шихты дугами

Метод универсальных характеристик дуги

Расчет излучения дуг ДСП с учетом температурного профиля столба выполнен методом универсальных характеристик дуги на основе решения системы нелинейных алгебраических уравнений, описывающих цилиндрическую модель столба ТОМЭД [25].

Уравнение баланса энергии:

$$p_\lambda = \frac{I^2}{r_c^2 \tilde{g}(p_\lambda)} - r_c^2 \tilde{p}_e(p_\lambda), \quad (1)$$

где I — ток дуги; p_e — линейная плотность мощности излучения столба; p_λ — линейная плотность теплового потока на поверхности цилиндрической модели столба ТОМЭД; r_c — радиус цилиндрической модели столба; $\tilde{p}_e(p_\lambda)$, $\tilde{g}(p_\lambda)$ — универсальные характеристики излучения и проводимости дуги.

Радиус столба:

$$r_c^2 = \sqrt{0,25 \left[\frac{p_\lambda}{\tilde{p}_e(p_\lambda)} \right]^2 + \frac{I^2}{\tilde{p}_e(p_\lambda) \cdot 10^3 \tilde{g}(p_\lambda)} - 0,5 \frac{p_\lambda}{\tilde{p}_e(p_\lambda)}}. \quad (2)$$

Линейная плотность мощности излучения столба:

$$p_e = \tilde{p}_e(p_\lambda) r_c^2. \quad (3)$$

Мощность излучения дуги в плавильном пространстве ДСП:

$$P_e = p_e l_a = \tilde{p}_e(p_\lambda) r_c^2 l_a. \quad (4)$$

Метод расчета реализован в пакете прикладных программ «Tomed_dsp» [27], разработанном в НИУ «МЭИ». Для решения системы нелинейных уравнений использованы:

а) граничная функция теплопроводности плазмы цилиндрической модели столба ТОМЭД дуговой печи в зависимости от длины l_a и тока I дуги:

$$p_\lambda(I, l_a) = \left\{ a + b \exp \left[-0,5 \left(\left(\frac{I-c}{d} \right)^2 + \left(\frac{l_a-e}{f} \right)^2 \right) \right] \right\} k_{ff}, \quad (5)$$

где $a = 192,09$; $b = 166232,56$; $c = 176,45$; $e = -5,64$; $f = 1,65$; k_{ff} — показатель интенсивности теплообмена дуги в плавильном пространстве ДСП (для периода плавления шихты $k_{ff} = 2,4$);

б) универсальные характеристики излучения $\tilde{p}_e(p_\lambda)$ и проводимости $\tilde{g}(p_\lambda)$ дуги в углекислом газе:

для $p_\lambda \leq 100$ кВт/м:

$$\tilde{p}_e(p_\lambda) = \exp \left[(a + cp_\lambda) / (1 + bp_\lambda + dp_\lambda^2) \right], \quad (6)$$

где $a = 0,013$; $b = 0,0059$; $c = 0,29$; $d = 6,3 \cdot 10^{-5}$;

$$\tilde{g}(p_\lambda) = \exp \left[(a + cp_\lambda) / (1 + bp_\lambda + dp_\lambda^2) \right], \quad (7)$$

где $a = 0,067$; $b = 0,049$; $c = 0,60$; $d = -0,00069$; $e = -0,0069$;

для $p_\lambda > 100$ кВт/м:

$$\tilde{p}_e(p_\lambda) = 1 / (a + b/p_\lambda), \quad (8)$$

где $a = 4 \cdot 10^{-5}$; $b = 0,020$;

$$\tilde{g}(p_\lambda) = \frac{(a + c \ln(p_\lambda) + e \ln(p_\lambda)^2)}{(1 + b \ln(p_\lambda) + d \ln(p_\lambda)^2)}, \quad (9)$$

где $a = 3,6$; $b = -0,224$; $c = 15,3$; $d = 0,015$; $e = 64,1$.

Поиск значений коэффициентов аппроксимации функций описан в [23].

Для конкретизации решения уравнений (1) — (5) необходим расчет длины дуги в плавильном пространстве ДСП, зависящий от градиента напряжения, обусловленного параметрами эквивалентной электрической схемы замещения, рабочего тока и периода плавки печи. До настоящего времени известны только качественные (феноменологические) оценки градиента напряжения дуг ДСП [3], к сожалению, не отличающиеся необходимой для поиска рационального электрического режима при наладке ДСП достоверностью.

Расчет длины дуги, выполненный в пакете «Tomed_dsp» [27], основан на методе структурных характеристик ТОМЭД ДСП.

Метод структурных характеристик теплообменной модели дуги дуговой сталеплавильной печи

Расчет длины дуги в пакете компьютерных программ «Tomed_dsp» базируется на сравнении значений напряжений дуг, рассчитанных с помощью уравнений эквивалентной схемы замещения печи и ТОМЭД:

$$\sqrt{\left(\frac{U_{2l}}{\sqrt{3}} \right)^2 - (IX)^2} - IR - U_{AK} = E_c l_a + (Z_k(I) - 1) k_e r_{ck} E_{zk}(I) \left[1 - \exp \left(- \frac{l_a}{k_e r_{ck}(I)} \right) \right], \quad (10)$$

где E_c — средняя напряженность электрического поля цилиндрической модели столба ТОМЭД; E_k — напряженность электрического поля в начальном сечении ($z = 0$) столба реальной дуги; E_{zk} — напряженность электрического поля в начальном сечении ($z = 0$) столба цилиндрической модели столба ТОМЭД; r_{ck} — радиус цилиндрической модели столба ТОМЭД в начальном сечении ($z = 0$) вблизи катода; k_e — коэффициент затухания функции напряженности электрического поля столба, $k_e = 0,543$.

В выражении (10) использована структурная характеристика неравномерности электрического поля столба ТОМЭД:

$$Z_k(I) = \frac{E_k(I)}{E_{zk}(I)}. \quad (11)$$

Вычислим структурные характеристики ТОМЭД, решив систему нелинейных уравнений:

$$p_{\lambda zk}(I) = (422,93 + 1,977I)k_{ff}; \quad (12)$$

$$r_{ck}^2(I) = \sqrt{0,25 \left[\frac{p_{\lambda zk}}{\tilde{p}_\varepsilon(p_{\lambda zk})} \right]^2 + \frac{I^2 \cdot 10^3}{\tilde{p}_\varepsilon(p_{\lambda zk}) \tilde{g}(p_{\lambda zk})}} - 0,5 \frac{p_{\lambda zk}}{\tilde{p}_\varepsilon(p_{\lambda zk})}; \quad (13)$$

$$E_{zk}(I) = \frac{I \cdot 10^3}{\tilde{g}(p_{\lambda zk}) r_{ck}^2(I)}; \quad (14)$$

$$E_c(I, l_a) = \frac{I \cdot 10^3}{\tilde{g}(p_\lambda(I, l_a)) r_c^2}; \quad (15)$$

где $p_{\lambda zk}$ — функция теплопроводности плазмы цилиндрической модели столба ТОМЭД в начальном сечении ($z = 0$) вблизи катода.

Получение структурной характеристики неравномерности электрического поля столба ТОМЭД дуговой печи

$$Z_k(I) = \frac{k_\sigma(I)}{Z_r(I)} \quad (16)$$

требует расчета двух других структурных характеристик ТОМЭД:

- геометрической неоднородности:

$$Z_r(I) = \frac{r_k^2(I)}{r_{ck}^2(I)} = \frac{j_{ck}(I)}{j_k(I)}, \quad (17)$$

где j_k, j_{ck} — средняя в сечении плотность тока в катодном пятне реальной дуги и средняя плотность тока в начальном сечении ($z = 0$) цилиндрической модели столба ТОМЭД; r_k — радиус катодного пятна реальной дуги).

• сопоставления электропроводности неравновесной плазмы в начальном сечении столба реальной дуги и рассчитанной электропроводности термической

плазмы в начальном сечении цилиндрической модели столба ТОМЭД:

$$k_\sigma = \frac{\sigma_k}{\sigma_{ck}} = \frac{E_k / j_k}{E_{zk} / j_{ck}}. \quad (18)$$

Структурную характеристику геометрической неоднородности (17) ТОМЭД дуговой печи представим в виде обобщенной формулы:

$$Z_r(I) = 0,1972 k_{ff}^{-0,5} \times \left[0,83245 + 0,229(I/I_n) - 0,073(I/I_n)^{1,5} \right] \times \left[\frac{0,0116}{\sqrt{(I/I_n)}} + \frac{1,354 \cdot 10^{-5}}{(I/I_n)^2} \right]. \quad (19)$$

Структурная характеристика неравновесия плазмы (18) ТОМЭД дуговой печи выглядит как:

$$k_\sigma(I/I_n) = 0,862 \times \exp \left[\frac{(2,4937 - 10,392464(I/I_n) + 7,7536(I/I_n)^2)}{(1 + 0,4397(I/I_n) + 10,877754(I/I_n)^2)} \right]. \quad (20)$$

В формулах структурных характеристик ТОМЭД дуговой печи номинальный ток электрода ДСП I_n рассчитан с учетом показателя интенсивности теплообмена дуги в плавильном пространстве ДСП:

$$I_n = \left[\frac{(2,025 \cdot 10^{-4} + 0,019 D_{el})}{(1 + 3,151 \cdot 10^{-3} D_{el} - 3,495 \cdot 10^{-6} D_{el}^2)} \right] k_{ff}^{0,15}, \quad (21)$$

где D_{el} — диаметр электрода, мм.

Таким образом, расчет длины дуги для заданных параметров электрического контура печи и заданного показателя интенсивности теплообмена дуги в плавильном пространстве ДСП в соответствующем периоде плавки выполняется итерационным путем в цикле длины дуги при совместном решении уравнений (10) — (16) с учетом (19) — (21).

Зная длину дуги с учетом (4), можно найти мощность излучения дуг в плавильном пространстве ДСП. Следует отметить, что вычисление мощности излучения дуг в плавильном пространстве печи включает в себя операцию интегрирования характеристики объемной плотности излучения $\sigma_\varepsilon(T)$ равновесной плазмы с учетом полученного температурного профиля цилиндрической модели столба ТОМЭД при формировании универсальной характеристики дуги (6), (8):

$$\tilde{p}_\varepsilon(p_\lambda) = 2\pi \int_0^1 \sigma_\varepsilon(T(\tilde{r})) \tilde{r} d\tilde{r}, \quad (22)$$

где $\tilde{r} = r/r_c$ — относительный радиус цилиндрической модели столба ТОМЭД.

В «Tomed_dsp» [27] предусмотрена процедура расчета температурного профиля цилиндрической модели столба ТОМЭД с учетом нелинейности ТФХ плазмы. Физические условия цилиндрической модели столба,

как установлено фундаментальными исследованиями [26, 29], идентичны условиям в области столба в отдалении от физического катода реальной электрической дуги атмосферного давления.

На рисунке 2 приведен рассчитанный температурный профиль цилиндрической модели столба ТОМЭД переменного тока сверхмощной печи ДСП-100И6 для периода плавления твердой шихты. Для сравнения вычисления выполнены с помощью принятого в настоящее время метода линеаризации ТФХ и предложенного метода с учетом нелинейности ТФХ плазмы, химический состав которой представляет собой смесь оксидов углерода.

Прогнозирование удельного расхода электроэнергии на плавление твердой шихты для заданного типа конструкции дуговой сталеплавильной печи при наладке энергосберегающего электрического режима

После проведенного анализа рабочей характеристики мощности излучения дуг $P_{\epsilon}(I)$ и характеристики полезной мощности печи $P_{пол}(I)$ возможно прогнозирование удельного расхода электроэнергии на расплавление твердой шихты. Для этого воспользуемся выражением

$$p_{уд}(I) = \left\{ 274,39 + \frac{189,025}{\left[1 + (G_p/29,65)^{0,6} \right]} \right\} \times \left(\frac{(K_{pl})_b (0,85 + 0,15n_{pm})}{\left(\frac{P_{пол}}{G_p} \right) \left(\frac{P_{\epsilon}(I)}{(P_{\epsilon})_{max}} \right)^{0,5} \left(\frac{P_{пол}(I)}{(P_{пол})_{max}} \right)} \right), \quad (23)$$

где G_p — емкость печи, т; $P_{пол}$ — полезная мощность печи; n_{pm} — показатель типа конструкции печи.

Для печей низкой мощности $n_{pm} = 1$, средней мощности — $n_{pm} = 2$, для мощных печей — $n_{pm} = 3$, для печей высокой мощности — $n_{pm} = 4$, для печей сверхвысокой мощности — $n_{pm} = 5$.

Рассчитаем базовый показатель интенсивности плавки шихты печей низкой мощности ($n_{pm} = 1$):

$$(K_{pl})_b = \frac{529,5}{\left[1 + \left((G_p + 144,74) / 181,485 \right)^2 \right]}. \quad (24)$$

Время расплавления твердой шихты в промышленных ДСП

G_p , т	Номер ДСП	S_p , кВа	U_{21} , В	$I_{раб}$, кА	$P_{уд}$, кВт·ч/т (расчет)	$\tau_{пл}$, мин (расчет)	$\tau_{пл}$, мин (опыт)
5	1	1746	200	6,3	396,4	71	74
10	2	4020	200	10,4	489,1	103	98
20	3	9000	270	19,25	371,7	63	55
200	4	40000	591,5	39	419,7	204	186
200	5	60200	695	50	344,5	123	140

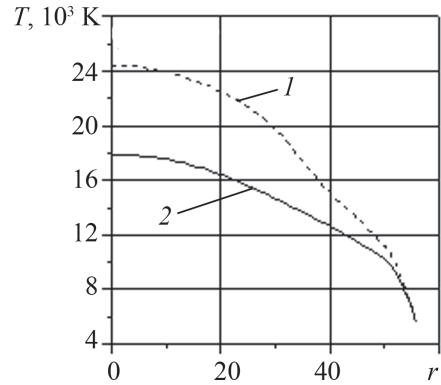


Рис. 2. Температурный профиль цилиндрической модели столба ТОМЭД сверхмощной печи ДСП-100И6 в период плавления шихты:

1 — линеаризованные ТФХ; 2 — нелинейные ТФХ

Время плавления шихты под током с учетом (23), (24) определим как:

$$\tau_{пл} = \frac{G_p p_{уд}}{P_{пол}}. \quad (25)$$

В таблице приведены результаты расчета удельного расхода электроэнергии на расплавление шихты после завалки и подвалки по (23) и времени плавления шихты под током (25) для известных в промышленности ДСП [10, 28]. Расхождение данных не превышает 12%, из чего можно заключить, что совпадение хорошее.

Так, известное из [21] значение удельного расхода электроэнергии на расплавление шихты для ДСП № 4 — 400 кВт·ч/т хорошо согласуется с расчетным значением. Таким образом, обобщенная формула (23) позволяет с высокой степенью достоверности выполнить прогнозирование расхода электроэнергии на плавление твердой шихты при наладке и разработке энергосберегающего электрического режима активного периода плавки шихты в ДСП.

В качестве примера для сверхмощной промышленной печи ДСП-100И6 рассчитана характеристика зависимости удельного расхода электроэнергии при плавлении шихты от рабочего тока дуги (рис. 3). Как следует из данных рис. 3, рабочий ток дуги действующей печи 58 кА находится вблизи диапазона тока 45...50 кА, при котором расход электроэнергии имеет

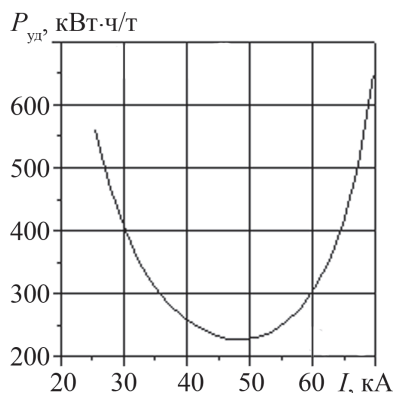


Рис. 3. Зависимость расхода электроэнергии на плавление шихты в ДСП-100И от рабочего тока дуги

наименьшие значения. Повышение полного сопротивления (импеданса) печи за счет снижения тока с 58 до 50 кА обеспечит снижение удельного расхода электро-

Литература

1. Лопухов Г.А. Ближайшие перспективы развития мировой черной металлургии // *Электromеталлургия*. 2001. № 1. С. 7—31.
2. Еланский Д.Г. Тенденции развития электросталеплавильного производства // *Электromеталлургия*. 2001. № 5. С. 3—18.
3. Алиферов А.И., Бикеев Р.А., Горева Л.П., Луи С., Форсан М., Барглик Д. Дуговые печи. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016.
4. Свенчанский А.Д. и др. Электрические промышленные печи: дуговые печи и установки специального нагрева. М.: Энергоатомиздат, 1981.
5. Рябов А.В., Чумаков И.В., Шишимиров М.В. Современные способы выправки стали в дуговых печах. М.: Теплотехник, 2007.
6. Тулуевский Ю.Н., Зинуров И.Ю., Попов А.Н., Галян В.С. Экономика электроэнергетики в дуговых сталеплавильных печах. М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Смоляренко В.Д. Высокомощные дуговые сталеплавильные печи. М.: Энергия, 1976.
8. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов У.Б. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2006.
9. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения. М.: Энергия, 1975.
10. Минеев Р.В., Михеев А.П., Рыжнев Ю.Л. Графики нагрузок дуговых электропечей. М.: Энергия, 1977.
11. Минеев Р.В., Михеев А.П., Новиков В.Т., Попов А.Н. Условия работы трансформаторов для дуговых электропечей. М.: Информэлектро, 1976.
12. Минеев Р.В., Михеев А.П., Рыжнев Ю.Л. Повышение эффективности электроснабжения электропечей. М.: Энергоатомиздат, 1986.

энергии на плавление шихты примерно на 25 кВт·ч/т (7,5%).

Заключение

Предложенный метод прогнозирования удельного расхода электроэнергии на плавление твердой шихты в дуговых печах позволяет при наладке и разработке электрического режима выбрать рабочий ток дуг, обеспечивающий максимальную скорость плавки твердой шихты после завалки или подвалки и, тем самым, добиться снижения расхода электроэнергии в рабочем цикле печи.

Метод выглядит в виде пакета программ для компьютера, разрабатывался для стадии расплавления твердой шихты и не претендует на анализ общего энергетического баланса и потребления электроэнергии в целом для всего технологического цикла в ДСП.

References

1. Lopukhov G.A. Blizhayshie Perspektivy Razvitiya Mirovoy Chernoy Metallurgii. *Elektrometallurgiya*. 2001; 1:7—31. (in Russian).
2. Elanskiy D.G. Tendentsii Razvitiya Elektrostaleplavil'nogo Proizvodstva. *Elektrometallurgiya*. 2001;5:3—18. (in Russian).
3. Aliferov A.I., Bikeev R.A., Goreva L.P., Lupi S., Fortsan M., Barglik D. Dugovye Pechi. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2016. (in Russian).
4. Svenchanskiy A.D. i dr. Elektricheskie Promyshlennye Pechi: Dugovye Pechi i Ustanovki Spetsial'nogo Nagreva. M.: Energoatomizdat, 1981. (in Russian).
5. Ryabov A.V., Chumakov I.V., Shishimirov M.V. Sovremennye Sposoby Vypravki Stali v Dugovykh Pechakh. M.: Teplotekhnika, 2007. (in Russian).
6. Tuluevskiy Yu.N., Zinurov I.Yu., Popov A.N., Galyan V.S. Ekonomika Elektroenergetiki v Dugovykh Staleplavil'nykh Pechakh. M.: Energoatomizdat, 1987. (in Russian).
7. Smolyarenko V.D. Vysokomoshchnye Dugovye Staleplavil'nye Pechi. M.: Energiya, 1976. (in Russian).
8. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov U.B. Optimizatsiya Upravleniya Tekhnologicheskimi Protsessami v Metallurgii. Magnitogorsk: Izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2006. (in Russian).
9. Vliyanie Dugovykh Elektropечей na Sistemy Elektrosnabzheniya. M.: Energiya, 1975. (in Russian).
10. Mineev R.V., Mikheev A.P., Ryzhnev Yu.L. Grafiki Nagruzok Dugovykh Elektropечей. M.: Energiya, 1977. (in Russian).
11. Mineev R.V., Mikheev A.P., Novikov V.T., Popov A.N. Usloviya Raboty Transformatorov Dlya Dugovykh Elektropечей. M.: Informelektro, 1976. (in Russian).
12. Mineev R.V., Mikheev A.P., Ryzhnev Yu.L. Povyshenie Effektivnosti Elektrosnabzheniya Elektropечей. M.: Energoatomizdat, 1986. (in Russian).

13. **Минеев Р.В., Игнатов И.А., Дмитриев И.Ю.** Эффективность и надежность энергоснабжения (опыт работы малого предприятия промышленной энергетики). Ч. I. М.: Спутник+, 2003.
14. **Минеев Р.В., Дмитриев И.Ю., Игнатов И.А.** Компьютерно-ориентированные высокие технологии для ресурсо- и энергосбережения (опыт работы малого предприятия промышленной энергетики). Ч. II. М.: Спутник+, 2004.
15. **Минеев Р.В. и др.** Оптимизация электроснабжения дуговых сталеплавильных печей // Электрификация металлургических предприятий Сибири. 2007. Вып. 13. С. 72—78.
16. **Миронов Ю.М.** Электротехника электрометаллургических печей дугового, резистивного и смешанного нагрева. М.: ИНФРА-М, 2018.
17. **Ануфриев А.В. и др.** Повышение эффективности работ сверхмощных дуговых сталеплавильных печей за счет использования систем диагностики стадий плавки по высшим гармоникам токов дуг // Технические науки — от теории к практике: Материалы XXVII Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: Изд-во СибАК, 2013.
18. **Белковский А.Г., Кац Я.Л., Краснянский М.В.** Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкций // Черная металлургия. 2013. № 3. С. 72—88.
19. **Черненко А.Н., Вахнин В.В.** Влияние режимов работы дуговой сталеплавильной печи 6ДСП-40 на уровень гармонических составляющих напряжения в точке подключения к электрической сети // Вектор науки Тольяттинского гос. ун-та. 2015. № 1 (31). С. 46—50.
20. **Николаев А.А., Руссо Ж.Ж., Сцымански В., Тулупов П.Г.** Экспериментальное исследование гармонического состав токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 3. С. 106—121.
21. **Чередниченко В.С. и др.** Акустические характеристики дуговых сталеплавильных электропечей // Электрометаллургия. 2015. № 10. С. 2—12.
22. **Чередниченко Б.С., Бикеев Р.А., Чередниченко М.В.** Исследование переноса мощности между фазами токоподвода в дуговых электропечах с использованием математических моделей // Электрометаллургия. 2016. № 6. С. 31—40.
23. **Кручинин А.М., Рязанова Е.С., Фоменко О.Я.** К теории динамической дуги в электротехнологических установках. Тверь, 1995. С. 28—32.
24. **Krouchinin A.M., Sawicki A.** A Method of Modelling Heat Transfer and Gasodynamic Processes in Arc Plasma Generators // High Temperature Material Proc. 2003. V. 7. Iss. 4. Pp. 501—524.
25. **Кручинин А.М.** Физические основы теплообменной модели электрической дуги в электротехнологии // Сб. докладов науч.-техн. семинара, посвящен-
13. **Mineev R.V., Ignatov I.A., Dmitriev I.Yu.** Effektivnost' i Nadezhnost' Energosnabzheniya (Opyt Raboty Malogo Predpriyatiya Promyshlennoy Energetiki). Ch. I. M.: Sputnik+, 2003. (in Russian).
14. **Mineev R.V., Dmitriev I.Yu., Ignatov I.A.** Komp'yuterno-orientirovannyye Vysokie Tekhnologii dlya Resurso-i Energoberezheniya (Opyt Raboty Malogo Predpriyatiya Promyshlennoy Energetiki). Ch. II. M.: Sputnik+, 2004. (in Russian).
15. **Mineev R.V. i dr.** Optimizatsiya Elektrosnabzheniya Dugovykh Staleplavil'nykh Pechey. Elektrifikatsiya Metallurgicheskikh Predpriyatiy Sibiri. 2007;13:72—78. (in Russian).
16. **Mironov Yu.M.** Elektrotekhnika Elektrometallurgicheskikh Pechey Dugovogo, Rezistivnogo i Smeshannogo Nagreva. M.: INFRA-M, 2018. (in Russian).
17. **Anufriev A.V. i dr.** Povyshenie Effektivnosti Rabot Sverkhmoshchnykh Dugovykh Staleplavil'nykh Pechey za Schet Ispol'zovaniya Sistem Diagnostiki Stadiy Plavki po Vysshim Garmonikam Tokov Dug. Tekhnicheskije Nauki — ot Teorii k Praktike: Materialy Khkhvii Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. Novosibirsk: Izd-vo SibAK, 2013. (in Russian).
18. **Belkovskiy A.G., Kats Ya.L., Krasnyanskiy M.V.** Sovremennoe Sostoyanie i Tendentsii Razvitiya Tekhnologii Proizvodstva Stali v DSP i Ikh Konstruktsiy. Chernaya metallurgiya. 2013;3:72—88. (in Russian).
19. **Chernenko A.N., Vakhnin V.V.** Vliyaniye rezhimov Raboty Dugovoy Staleplavil'noy Pechi 6DSP-40 na Uroven' Garmonicheskikh Sostavlyayushchikh Napryazheniya v Tochke Podklyucheniya k Elektricheskoy Seti. Vektor Nauki Tol'yatinskogo Gos. Un-ta. 2015;1 (31):46—50. (in Russian).
20. **Nikolaev A.A., Russo Zh.Zh., Stsymanski V., Tulupov P.G.** Eksperimental'noe Issledovanie Garmonicheskogo Sostav Tokov Dug dlya Dugovykh Staleplavil'nykh Pechey Razlichnoy Moshchnosti. Vestnik MG TU im. G.I. Nosova. 2016;14;3:106—121. (in Russian).
21. **Cherednichenko V.S. i dr.** Akusticheskie Kharakteristiki Dugovykh Staleplavil'nykh Elektropечей. Elektrometallurgiya. 2015;10:2—12. (in Russian).
22. **Cherednichenko B.S., Bikeev R.A., Cherednichenko M.V.** Issledovanie Perenosa Moshchnosti Mezhdru Fazami Tokopodvoda v Dugovykh Elektropечях s Ispol'zovaniem Matematicheskikh Modeley. Elektrometallurgiya. 2016;6:31—40. (in Russian).
23. **Kruchinin A.M., Ryazanova E.S., Fomenko O.Ya.** K Teorii Dinamicheskoy Dugi v Elektrotekhnologicheskikh Ustanovkakh. Tver', 1995:28—32. (in Russian).
24. **Krouchinin A.M., Sawicki A.** A Method of Modelling Heat Transfer and Gasodynamic Processes in Arc Plasma Generators. High Temperature Material Proc. 2003;7;4:501—524.
25. **Kruchinin A.M.** Fizicheskie Osnovy Teploobmennoy Modeli Elektricheskoy Dugi v Elektrotekhnologii. Sb. Dokladov Nauch.-tekhn. Seminara, Posvyashchennogo

ного 100-летию профессора М.Я. Смелянского. М.: Издат. дом МЭИ, 2013. С. 55—77.

26. **Runstadler P.W.** Laminar and Turbulent Flow of an Argon Arc Plasma // Harvard Univ. Eng. Sci. Lab. Techn. Rep. 1965. No. 22.

27. **Свид-во № 2017619675** о гос. регистрации программы для ЭВМ. Программа поиска рациональных электрических режимов работы действующих дуговых сталеплавильных печей / А.М. Кручинин, Е.С. Рязанова, А.Ю. Чурсин.

28. **Короткие** сети и электрические параметры дуговых электропечей. М.: Металлургия. 1987.

29. **Кручинин А.М.** Дуга в потоке газа как объект регулирования замкнутой автоматической системы // Доклады науч.-техн. конф. по итогам науч.-исслед. работ за 1964 — 1965 гг. М.: МЭИ, 1965. С. 75—95.

100-letiyu Professora M.Ya. Smelyanskogo. M.: Izdat. Dom MEI, 2013:55—77. (in Russian).

26. **Runstadler P.W.** Laminar and Turbulent Flow of an Argon Arc Plasma. Harvard Univ. Eng. Sci. Lab. Techn. Rep. 1965;22.

27. **Svid-vo № 2017619675** o Gos. Registratsii Programmy dlya EVM. Programma Poiska Ratsional'nykh Elektricheskikh Rezhimov Raboty Deystvuyushchikh Dugovykh Staleplavil'nykh Pechey / A.M. Kruchinin, E.S. Ryazanova, A.Yu. Chursin. (in Russian).

28. **Korotkie Seti i Elektricheskie Parametry Dugovykh Elektropechey.** M.: Metallurgiya. 1987. (in Russian).

29. **Kruchinin A.M.** Duga v Potoke Gaza kak Ob'ekt Regulirovaniya Zamknutoy Avtomaticheskoy Sistemy. Doklady Nauch.-tekh. Konf. po Itogam Nauch.-Issled. Rabot za 1964 — 1965 gg. M.: MEI, 1965:75—95. (in Russian).

Сведения об авторах:

Кручинин Анатолий Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: ancruhinin@yandex.ru

Погребисский Михаил Яковлевич — кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: PogrebisskiyMY@mpei.ru

Рязанова Елена Сергеевна — ведущий инженер кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: RiazanovaYS@mpei.ru

Чурсин Андрей Юлианович — заведующий учебной лабораторией кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: ChursinAY@mpei.ru

Information about authors:

Kruchinin Anatoliy M. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: ancruhinin@yandex.ru

Pogrebissky Mikhail Ya. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: PogrebisskiyMY@mpei.ru

Ryazanova Elena S. — Leading Engineer of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: RiazanovaYS@mpei.ru

Chursin Andrey Yu. — Head of Educational Laboratory of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: ChursinAY@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 20.02.2019

The article received to the editor: 20.02.2019