

DOI 10.23859/1994-0637-2017-5-80-5
УДК 669.187.66.045

© Степанов В.А., Меркер Э.Э., Ершов Е.В., Крахт Л.Н., 2017

Степанов Виктор Александрович

Инженер СТИ НИТУ «МИСиС»
(Старый Оскол, Россия)
E-mail: Viktor1990_31@mail.ru

Stepanov Viktor Aleksandrovich

Engineer of Research technological
University "MISiS"
(Stariy Oskol, Russia)
E-mail: Viktor1990_31@mail.ru

Меркер Эдуард Эдгарович

Доктор технических наук, профессор,
профессор СТИ НИТУ «МИСиС»
(Старый Оскол, Россия)
E-mail: merker@inbox.ru

Merker Eduard Edgarovich

Doctor of Technical Sciences, Professor
Research technological University "MISiS"
(Stariy Oskol, Russia)
E-mail: merker@inbox.ru

Ершов Евгений Валентинович

Доктор технических наук, профессор,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: eve@chsu.ru

Ershov Evgeniy Valentinovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: eve@chsu.ru

Крахт Людмила Николаевна

Кандидат технических наук, доцент,
СТИ НИТУ «МИСиС»
(Старый Оскол, Россия)
E-mail: lkrakht@mail.ru

Krakht Lyudmila Nikolaevna

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Research technological University "MISiS"
(Stariy Oskol, Russia)
E-mail: lkrakht@mail.ru

**МЕТОД И АЛГОРИТМЫ
ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
В СИСТЕМЕ ОЦЕНКИ
ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ В
ДУГОВОЙ ПЕЧИ**

**METHOD AND ALGORITHMS
OF INFORMATION PROCESSING
IN THE SYSTEM OF ESTIMATION
OF THE PARAMETERS OF
THE STEELMAKING OPERATIONS
IN THE ARC FURNACE**

Аннотация. В статье приведена схема обезуглероживания и дожигания, дается краткое описание основных процессов, происходящих в дуговой сталеплавильной печи. Разработан метод и алгоритм оптимизации энергоэффективности электроплавки стали с применением дожигания отходящих газов в дуговой сталеплавильной печи с помощью топливно-кислородных горелок и кислородной фурмы. Описывается алгоритм расчета режимов обезуглероживания и дожигания отходящих газов в дуговой печи.

Abstract. The article shows a diagram of decarburization and post-combustion. It also provides a brief description of the main processes in the electric arc furnace. The method and algorithm of optimization of energy saving while electrosmelting, using afterburners in an electric arc furnace with oxy-fuel burners and oxygen lances, are developed. An algorithm for calculating the mode of decarburization and post-combustion flue gas in an arc furnace is described.

Ключевые слова: электроплавка стали, дожигание, обезуглероживание, дуговая печь, шлак

Keywords: electrofusion steel, post-combustion, decarbonization, arc furnace, slag

Введение

В связи с постоянным требованием повышения эффективности процессов производства стали все более важное значение приобретает повышение производительности печи, совершенствование тепловой работы и технологии электроплавки, автоматизации процесса.

Продувка ванны кислородом в дуговых печах является наиболее существенным резервом повышения эффективности производства стали, так как при этом в значительной степени интенсифицируются тепломассообменные процессы, происходящие между металлом, шлаком и атмосферой рабочего пространства агрегата.

Цель работы состоит в разработке метода и алгоритма оптимизации электроплавки стали в дуговой сталеплавильной печи с применением режима дожигания отходящих газов при помощи топливно-кислородных горелок и кислородной фурмы.

Основная часть

На рис. 1 представлена упрощенная схема обезуглероживания и дожигания горючих газов в ДСП.

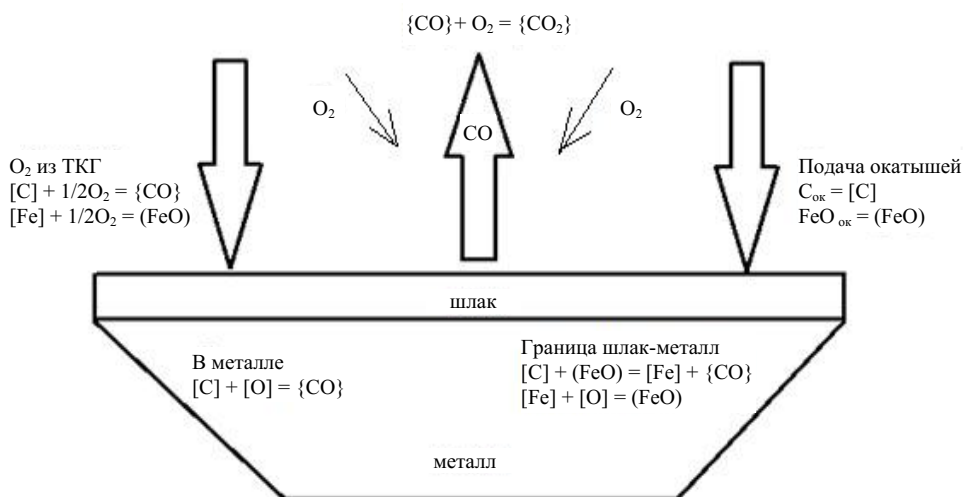


Рис. 1. Упрощенная схема обезуглероживания и дожигания горючих газов в ДСП

Процесс обезуглероживания может быть представлен обобщенным уравнением:

$$-d[C](\tau)/d\tau = -v_C, \quad (1)$$

где $v_C = v_{C,1} + v_{C,2} + v_{C,3} - v_{C,4}$, $\%[C]/\text{мин}$; v_C — обобщенная скорость окисления углерода в ванне дуговой сталеплавильной печи при электроплавке окатышей; $v_{C,1}$ — скорость окисления углерода в объеме металла на поверхности пузырьков CO ; $v_{C,2}$ — скорость окисления углерода на границе раздела шлак-металл; $v_{C,3}$ — скорость окисления углерода кислородом дутья от топливно-кислородных горелок; $v_{C,4}$ — скорость поступления углерода (науглероживателя) металла за счет подачи ЖМО в ванну печи.

Подставляя в уравнение (1) значения составляющих скоростей обезуглероживания, получим [1]:

$$v_c = -12/16\beta_0([O]-[O]_{p.c.})\frac{60S_{пуз.}}{V_{Me}d} - 12/16\beta_0([O]_{p.ш.}-[O])\frac{60S_{ш.м.}}{V_{Me}d} - \rho_{O_2}a_{O_2}x_{O_2}I_{O_2}\eta_C \cdot 100/M_{Me} + v_{ок}([C]_{ок}-[C]_{реакц})/M_{Me},$$

где V_{Me} – объем металла в печи, м³; M_{Me} – масса металла в печи, кг; β_0 – коэффициент массопереноса кислорода, равный $10^{-3} \div 10^{-5}$ м/с; $S_{пуз.}$ и $S_{ш.м.}$ – площади поверхностей пузырьков СО и поверхности шлак-металл, м²; $[O]$, $[O]_{p.c.}$ и $[O]_{p.ш.}$ – содержание кислорода в металле, равновесное с углеродом металла и равновесное со шлаком, %; η_C – часть кислорода, идущая на окисление углерода; a_{O_2} – коэффициент усвоения кислорода ванной (для ДСП-150 $a_{O_2} = 0,8$); I_{O_2} – интенсивность подвода технического кислорода, м³/мин; ρ_{O_2} – плотность кислорода, равная $1,42 \cdot 10^{-3}$ кг/м³; x_{O_2} – доля кислорода в дутье (для технического кислорода равна 0,995); $v_{ок}$ – скорость подачи окатышей в печь, кг/мин; $[C]_{ок}$ и $[C]_{реакц} = 12/16[O]_{ок}$ – содержание углерода в окатышах и углерод окатышей, идущий на довосстановление оксидов железа (FeO), содержащихся в них, %; d – коэффициент, учитывающий накопление кислорода в металле:

$$d = 1 + 0,75 \frac{p_{CO} \cdot 10^{-5}}{K_{[C]}[C]^2} \left(1 + \frac{0,22M_{шл}}{\gamma_{(FeO)}L_0M_{Me}} \right).$$

Скорость образования (FeO) в шлаке за счет продувки газообразным кислородом находится по формуле:

$$v_{(FeO),1} = \frac{72}{16} \rho_{O_2} a_{O_2} x_{O_2} I_{O_2} \eta_{Fe}, \text{ кг/мин},$$

где η_{Fe} – доля кислорода, идущая на окисление железа.

Скорость образования (FeO) в шлаке за счет окисления углерода:

$$v_{(FeO),2} = -72/12v_C M_{Me} / 100, \text{ кг/мин}.$$

При электроплавке металлизированных окатышей происходит довосстановление оксидов железа, содержащихся в самих окатышах. При ($[C]_{ок} < [C]_{реакц}$) часть оксида железа из окатышей переходит в шлак. Скорость поступления оксида железа в шлак за счет загрузки окатышей можно представить выражением:

$$v_{(FeO),3} = v_{ок} 72/16([O]_{ок} - 16/12[C]_{ок})/100, \text{ кг/мин}.$$

Общая скорость образования (FeO) в шлаке:

$$v_{(FeO)} = v_{(FeO),1} + v_{(FeO),2} + v_{(FeO),3}.$$

Если скорость подачи окатышей и шлакообразующих известна, то с учетом образования FeO можно рассчитать текущую массу шлака ($M_{\text{шл}}$, кг):

$$M_{\text{шл}} = M_{\text{шл},0} + (v_{\text{ок}} B / 100 + v_{(\text{FeO})} + v_{\text{изв}})(\tau - \tau_0),$$

где B – содержание пустой породы в окатышах (CaO и SiO_2), %; $v_{\text{изв}}$ – скорость подачи извести в дуговую сталеплавильную печь, кг/мин.

Текущая масса металла ($M_{\text{ме}}$, кг) с учетом подачи окатышей, образующегося FeO и скорости обезуглероживания рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{ме}} = M_{\text{ме},0} + (v_{\text{ок}} \text{Fe}_{\text{ок}}^{\text{мет}} / 100 - 56 / 72 v_{(\text{FeO})} - v_{\text{с}} M_{\text{ме,нач}} / 100)(\tau - \tau_0).$$

Текущее содержание (FeO) в шлаке рассчитывается по формуле:

$$(\text{FeO}) = ((\text{FeO})_{\text{нач}} M_{\text{шл}} / 100 + v_{(\text{FeO})}(\tau - \tau_0)) 100 / M_{\text{шл},0},$$

где $(\text{FeO})_{\text{нач}}$ – начальное содержание (FeO) в шлаке, %.

Согласно закону сохранения масс можно записать $([\text{O}]_{\text{р.с.}} - [\text{O}])(S_{\text{пуз}} + S_{\text{ш.м.}}) + [\text{O}]_{\text{ш.м.}} S_{\text{ш.м.}} = 0$, откуда получим:

$$[\text{O}] = \frac{[\text{O}]_{\text{р.с.}}(S_{\text{пуз}} + S_{\text{ш.м.}}) + [\text{O}]_{\text{ш.м.}} S_{\text{ш.м.}}}{S_{\text{пуз}} + 2S_{\text{ш.м.}}}.$$

Одной из причин вспенивания шлака является выделение пузырьков CO. Объем образующегося CO равен:

$$V_{\text{CO}} = \frac{28 / 12 ((v_{\text{C},1} + v_{\text{C},2} + v_{\text{C},3}) M_{\text{ме}} + v_{\text{ок}} [C]_{\text{реакц}})}{60 \cdot 100 \rho_{\text{CO}}},$$

где ρ_{CO} – плотность газа пузырей, кг/м³.

Объем CO в ванне определим по выражению:

$$V_{\text{CO},\text{в}} = V_{\text{CO}} \tau_{\text{под}} = V_{\text{CO}} H / w_{\text{CO}}.$$

Тепло, полученное в ходе реакций, рассчитывается по формуле:

$$q_c = (q_{\text{C},1} v_{\text{C},1} + q_{\text{C},2} v_{\text{C},2} + q_{\text{C},3} v_{\text{C},3} + q_{\text{C},4} v_{\text{C},4}) M_{\text{ме}} / 100, \\ q_{(\text{FeO})} = q_{(\text{FeO}),1} v_{(\text{FeO}),1} + q_{(\text{FeO}),2} v_{(\text{FeO}),2},$$

где q – теплоты реакций соответственно:

$q_{\text{C},1} = 23,4$ кДж/моль, для $[\text{C}] + [\text{O}] \rightarrow \{\text{CO}\}$; $q_{\text{C},2} = -98,6$ кДж/моль, для $[\text{C}] + (\text{FeO}) \rightarrow [\text{Fe}] + \{\text{CO}\}$; $q_{\text{C},3} = 140,6$ кДж/моль, для $[\text{C}] + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \{\text{CO}\}$; $q_{\text{C},4} = -22,6$ кДж/моль, $q_{(\text{FeO}),1}$: $[\text{Fe}] + 1/2\text{O}_2 \rightarrow (\text{FeO})$; $q_{(\text{FeO}),2}$: $[\text{Fe}] + [\text{O}] \rightarrow (\text{FeO})$.

Главными параметрами зоны продувки при подаче кислорода в ванну печи являются: диаметр реакционной зоны ($D_{p.z.}$, м), площадь поверхности реакционной зоны ($S_{p.z.}$, м²) и глубина внедрения кислородных струй дутья (h_m , м) в металл.

Известно, что зона продувки состоит из двух реакционных зон: первичной зоны с радиусом (R_x , м) и вторичной зоны с радиусом $R_{осн} = R_x + r_m$. Исходя из этой предпосылки, диаметр зоны продувки:

$$D_{p.z.} = 2 \cdot R_{осн} = 2 \cdot (R_x + r_m) = D_x + d_x,$$

где D_x и d_x – диаметры первичной реакционной зоны и струй кислорода при внедрении в металл, м.

Из этого следует, что суммарную поверхность реакционной зоны продувки ($S_{p.z.}$, м²) можно определить по формуле:

$$S_{p.z.} = \pi \cdot D_{p.z.}^2 / 4 = 0,785 \cdot D_{p.z.}^2.$$

Определяем диаметр реакционной зоны ($D_{p.z.}$, м) при продувке с помощью топливно-кислородных горелок и кислородной фурмы ванны кислородом:

$$D_{p.z.} = 0,785 \cdot \sqrt{0,805 \cdot m \cdot r_m^2 \cdot Ar_x^{0,6} \cdot (Ar_x^{-0,672} + 0,417)}, \quad (2)$$

где m – число струй кислорода из ТКГ и фурмы, а $r_m = d_x / 2$. Причем $d_x = 3,44 \times \times (0,14 \cdot l_x / d_0 + 0,29) \cdot d_0$.

Длину струи кислорода до поверхности металла (l_x , м) и радиус (R_x , м) находим, зная угол наклона сопел (α , град) и высоту фурмы (H_ϕ , м) из следующих выражений:

$$l_x = H_\phi / \cos \alpha; \quad R_x = H_\phi / \operatorname{tg} \alpha. \quad (3)$$

Скорость кислородных струй на выходе из сопел ТКГ и кислородной фурмы диаметром (d_0 , м) равна:

$$u_0 = \sqrt{(2 \cdot k / (k - 1)) \cdot R \cdot T_0 \cdot (1 - P_\infty / P_{O_2})^{\frac{k-1}{k}}},$$

где P_∞ и P_{O_2} – давление окружающей среды и кислорода ($k = 1,4$ для O_2); R – газовая постоянная, кДж/(моль · К); T_0 – начальная температура продувки, К.

Зная число сопел ТКГ и фурмы (m) и их диаметр (d_0 , м), можно определить расход дутья для данных конструкций горелок и фурмы [2]:

$$I_{O_2} = (\pi \cdot d_0^2 / 4) \cdot m \cdot u_0 = ,785 \cdot d_0^2 \cdot m \cdot u_0, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Таким образом, для соответствующих параметров конструкции продувочных устройств (α , d_0 , m) и дутьевого режима (u_0 , H_ϕ , Ar_x , I_{O_2}) определяем значения l_x , R_x , u_m , r_m , а затем $S_{p.z.}$ и $D_{p.z.}$ (2).

Из выражения (3) следует, что при подъеме фурмы над ванной ($H_\phi \rightarrow \max$) возрастают величины l_x и R_x , т.е. повышаются диаметр $D_{p.z.}$ и h_m .

Уравнения решались численно на ЭВМ с помощью компьютерной программы. На основе рассмотренных положений разработан алгоритм расчета режимов обезуглероживания и дожигания отходящих газов [3], [4] в дуговой сталеплавильной печи. Схема данного алгоритма показана на рис. 2.

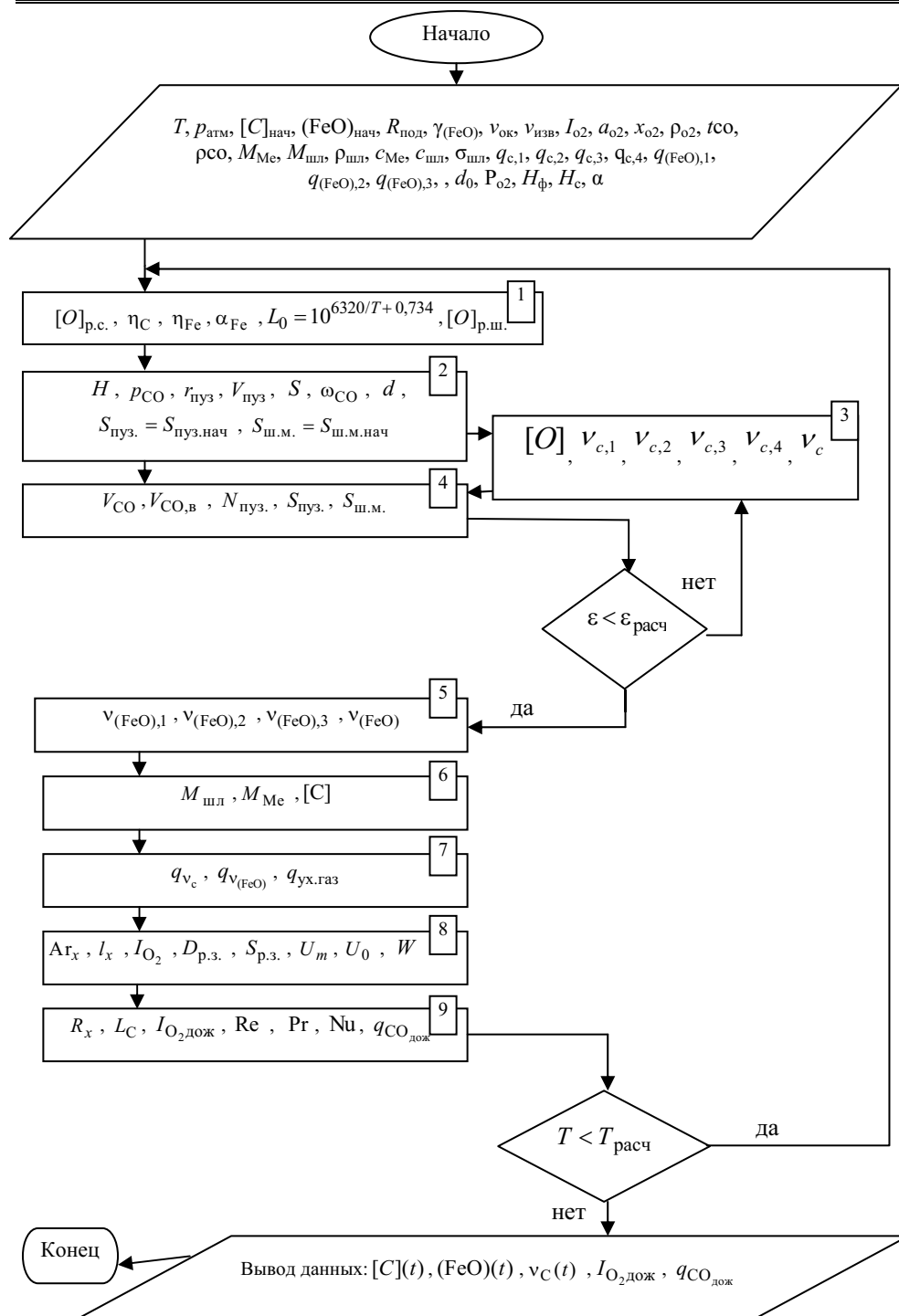


Рис. 2. Алгоритм расчета режимов обезуглероживания и дожигания отходящих газов в дуговой сталеплавильной печи

В начале расчета задаются исходные данные: температура, масса и состав металла и шлака, состав окатышей, скорости подачи окатышей и извести, кислорода дутья и теплофизические параметры и теплоты рассчитываемых реакций [5].

Для текущей температуры определяем константы реакций и коэффициент распределения кислорода между металлом и шлаком (блок 1). Полученные данные используем для расчета равновесных содержаний кислорода в металле. По размерам ванны печи, количеству шлака и металла определяем высоту слоя металла (H_{Me} , м), высоту шлака ($H_{шл}$, м), расчетное давление на пузырьки СО в металле и рассчитываем их параметры в ванне (блок 2). Также задаем первое приближение величин поверхностей «шлак – металл» и «газ – металл» для пузырей в ванне [6].

Исходя из равновесных содержаний кислорода и реакционных поверхностей, рассчитываем составляющие скоростей обезуглероживания и суммарную скорость изменения содержания углерода в металле (блок 3). Согласно скорости процесса обезуглероживания определяем объем выделившегося из ванны газа и величины поверхностей «шлак – металл» и «газ – металл» для пузырей в ванне (блок 4). Если разница заданных и рассчитанных площадей поверхностей больше заданной погрешности, то расчет обезуглероживания повторяем. Когда погрешность не превосходит заданного значения, то сначала рассчитываем скорости поступления (FeO) в шлак (блок 5), а затем массы шлака и металла, содержание (FeO) и [C] для следующего периода времени (блок 6) и скорость нагрева шлако-металлического расплава от обезуглероживания металла в ДСП (блок 7).

Далее осуществляется расчет основных характеристик зоны продувки: газовой нагрузки, поверхности реакционной зоны (блок 8) для определения теплового эффекта при дожигании и интенсивности продувки при дожигании, которые представлены в блоке 9. Далее проводим проверку: если текущее время t меньше времени расчета $t_{расч}$, то переходим к расчету следующего промежутка времени, иначе – выводим конечные данные.

Выводы

Рассмотренный метод и алгоритм оптимизации энергоэффективности электроплавки стали в ДСП с использованием дожигания отходящих газов в атмосфере печи позволил определить характер изменения основных параметров тепловой работы дуговой сталеплавильной печи при увеличении интенсивности продувки ванны кислородом.

Установлено, что увеличение интенсивности продувки ванны кислородом сопровождается изменением не только тепловой нагрузки печи, но и таких важных технологических параметров электроплавки, как скорость обезуглероживания ванны (v_c , кг/мин) и окисленность шлака $\Sigma(FeO)$. При повышении скорости окисления углерода по мере роста интенсивности продувки наблюдается уменьшение окисленности шлака. Увеличение скорости обезуглероживания сопровождается усилением интенсивности перемешивания ванны, что увеличивает передачу тепла от факела к ванне и приход кислорода из атмосферы печи.

Литература

1. Гришин А.А. Особенности обезуглероживания металла при непрерывной подаче металлизированных окатышей в ванну дуговой печи // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2006. №11. С. 21–23.
2. Кочнов М.Ю., Шульц Л.А., Кочнов Ю.М. Повышение эффективности дожигания и oxidation технологических газов крупнотоннажных дуговых сталеплавильных печей // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2009. №11. С. 49–55.

3. Лисиенко В.И., Засухин А.Л. Способ дожигания и обеспыливания отходящих газов электродуговых сталеплавильных печей. Патент РФ на изобретение №2451092 от 01.09.2010 кл. C21C005/52.

4. Нейгебауэр Г.О., Дмитриенко В.И., Борщевская Г.Л., Музалев Д.В. Состав газовой фазы в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи // Сталь. 1987. №5. С. 38–41.

5. Стомахин А.Я., Арутюнов В.А. Дожигание отходящих газов и донная продувка кислородом в период расплавления в 100-т дуговой печи // Сталь. 1999. №2. С. 27–30.

6. Меркер Э.Э., Черменев Е.А., Степанов В.А. Исследование кинетических закономерностей обезуглероживания металла при электроплавке окатышей в дуговой печи // Вестник Череповецкого государственного университета. 2013. №3. С. 21–26.

References

1. Grishin A.A. Osobennosti obezuglerozhivaniia metalla pri nepreryvnoi podache metallizovannykh okatyshei v vannu dugovoi pechi [Features of metal decarburization with continuous feeding of metallized pellets into a bath of an arc furnace]. *Izvestiia VUZov. Chernaia metallurgii* [Izvestiya VUZov. Ferrous metallurgy], 2006, no. 11, pp. 21–23.

2. Kochnov M.Y., Schultz L.A., Kochnov Y.M. Povyshenie effektivnosti dozhiganiia i ohlazhdeniia tekhnologicheskikh gazov krupnotonnazhnykh dugovykh staleplavil'nykh pechei [Increase of efficiency of afterburning and cooling of technological gases of large-capacity arc steel-smelting furnaces]. *Izvestiia VUZov. Chernaia metallurgii* [Izvestiya VUZ. Ferrous metallurgy], 2009, no. 11, pp. 49–55.

3. Lisienko V.I., Zasukhin A.L. *Sposob dozhiganiia i obespylivaniia othodiashchih gazov ehlektrodugovykh staleplavil'nykh pechei. Patent RF na izobretenie №2451092 ot 01.09.2010 kl. C21C005/52.* [Method of afterburning and dedusting of waste gases from electric arc steel furnaces. The patent of the Russian Federation for the invention № 2451092 from 01.09.2010 cl. C21C005 / 52]

4. Neugebauer G.O., Dmitrienko V.I., Borshevskaya G.L., Muzalev D.V. Sostav gazovoi fazy v rabochem prostranstve dugovoi staleplavil'noi pechi [Composition of the gas phase in the working space of an arc steel-making furnace]. *Stal'* [Steel], 1987, no. 5, pp. 38–41.

5. Stomakhin A.J., Arutyunov V.A. Dozhiganie othodiashchih gazov i donnaia produvka kislorodom v period rasplavleniia v 100-t dugovoi pechi [Afterburning of off-gases and bottom blowing by oxygen during the melting in a 100-ton arc furnace]. *Stal'* [Steel], 1999, no. 2, pp. 27–30.

6. Merker E.E., Chermenev E.A., Stepanov V.A. Issledovanie kineticheskikh zakononomernostei obezuglerozhivaniia metalla pri ehlektroplavke okatyshei v dugovoi pechi [Investigation of kinetic regularities of metal decarburization during electric melting of pellets in an arc furnace]. *Vestnik CHGU* [Bulletin of Cherepovets State University], 2013, no. 3, pp. 21–26.

Степанов В.А., Меркер Э.Э., Еришов Е.В., Крахт Л.Н. Метод и алгоритмы обработки информации в системе оценки параметров технологии производства стали в дуговой печи // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. №5(80). С. 45–52.

For citation: Stepanov V.A., Merker E.E., Ershov E.V., Krakht L.N. Method and algorithms of information processing in the system of estimation of the parameters of the steelmaking operations in the arc furnace. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2017, no. 5 (80), pp. 45–52.