

Контроль конвертерного процесса*

Приведены модели, основанные на косвенных измерениях характера протекания продувки в конвертере, измерениях параметров отходящего газа в конвертере и газоходе, а также тепловой работы водоохлаждаемого оборудования. Определены характеристики точности контроля выходных параметров и величина запаздывания в получении результата. Проанализирована применимость отдельных моделей для контроля и управления процессом. Приведены результаты экспериментальной проверки моделей.

Ключевые слова: конвертер, контроль, продувка, скорость обезуглероживания

Введение. Среди косвенных измерений характера протекания продувки наиболее полно и всесторонне исследованы параметры отходящего газа [1], тепловой работы водоохлаждаемого оборудования [2], вибрационных и пульсационных характеристик объекта [3, 4]. В общем случае эти параметры являются функцией изменения химсостава ванны, шлака и температуры металла. Так, тепловые потоки на фурму и кессон, давление отходящего газа в переходном газоходе охладителя конвертерных газов (ОКГ) определяются выражениями:

$$q_{\phi} = \alpha_0 + \alpha_1 v_c + \alpha_2 t, \quad (1)$$

$$q_k = v_c (\alpha_3 + \alpha_4 v_c + \alpha_5 t), \quad (2)$$

$$p = \alpha_6 (t_r + 273) v_c / [m_c v_c (\alpha_7 - \alpha_8 \gamma_{CO}) + \alpha_9 \delta_p], \quad (3)$$

где q_{ϕ} , q_k – поверхностная плотность тепловых потоков на стенку фурмы и кессона соответственно, Вт/м²; v_c – скорость обезуглероживания ванны, %/мин; t , t_r – температура соответственно ванны и отходящего газа, °С; $\alpha_0 \dots \alpha_9$ – коэффициенты; p – давление отходящего газа в переходном газоходе, Па; m_c – масса чугуна, т; γ_{CO} – массовая доля углерода ванны, окисляющегося до СО в полости конвертера за счет кислорода дутья, численно совпадающая со значением объемной доли; δ_p – разрежение в нижней полости кессона, Па.

Проведены исследования по выявлению связей между выходными параметрами процесса и косвенными измерениями [5]. Так, по данным, полученным на ЕМЗ, сделан вывод, что температурный перепад охлаждающей воды на кессоне тесно связан со скоростью обезуглероживания, равно как и температурный перепад на фурму. При этом время чистого запаздывания составляет достаточно большую величину, с: для фурмы – 10, для кессона – 30 вследствие их заматалливания и ошлаковывания. Такие величины чистого запаздывания делают проблематичным как использование системы (1-3), так и результатов измерений отдельных косвенных параметров.

Работа выполнена в Национальном техническом университете Украины «Киевском политехническом институте» по теме «Математические модели и ал-

горитмы системы управления кислородным конвертером», Государственный регистрационный номер 0110U002880.

Постановка задачи. Целью исследований является контроль кислородно-конвертерного процесса в рамках системного подхода к проблеме, что позволит повысить точность и надежность управления.

Результаты исследований. Нами исследована связь между скоростью обезуглероживания ванны конвертера и давлением отходящего газа в переходном газоходе ОКГ (рис. 1).

Как видно из рисунка, изменение давления и скорости обезуглероживания сходны между собой. В начале продувки давление газа увеличивается с 10 до 70-80 Па. Затем наступает скачок в изменении давления, который связан с зажиганием плавки (переход к периоду активного обезуглероживания ванны конвертера). Далее давление монотонно увеличивается до 70-75 % продолжительности продувки, что соответствует массовой доле углерода, близкой к 1 %. Начиная с этого момента и до конца продувки, давление падает почти равномерно. На рис. 2 приведена корреляционная функция скорости обезуглероживания ванны конвертера R_{v_c} и взаимнокорреляционная функция скорости обезуглероживания и давления отходящего газа $R_{v_c, p}$. Давление газа отражает

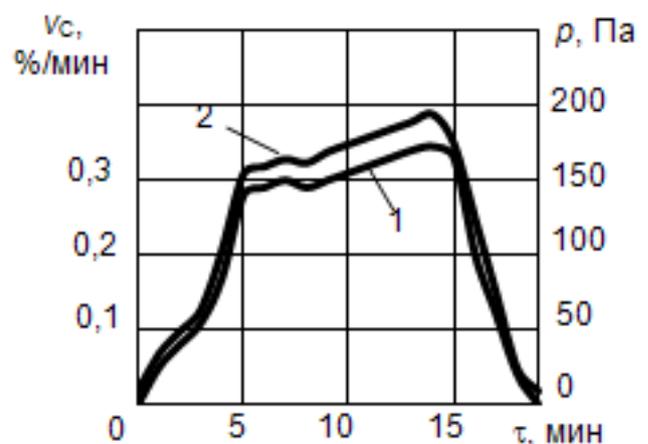


Рис. 1. Изменение скорости обезуглероживания ванны конвертера (1) и давления отходящего газа в переходном газоходе ОКГ (2) по ходу продувки

* По материалам X Международной специализированной выставки-конференции «Литье-2014» (27-29 мая, г. Запорожье)

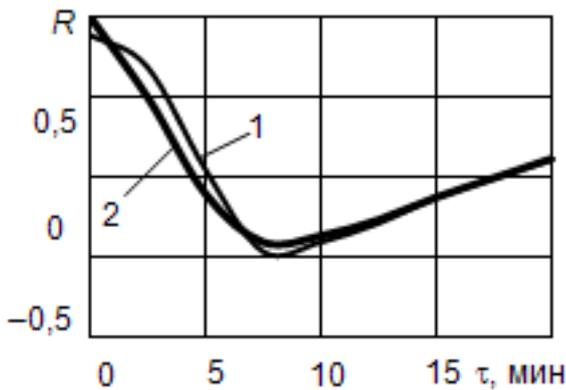


Рис. 2. Изменение параметров ванны в процессе продувки: корреляционная (1) и взаимокорреляционная (2) функции

изменение скорости обезуглероживания на всем протяжении продувки ($R_{y,p}|_{t=0} = 0,96$, время чистого запаздывания близко к нулю).

Высокая корреляционная связь получена при исследовании и других параметров отходящих газов: температуре факела при выходе из горловины конвертера, температуре отходящих газов в ОКГ. Получение таких обнадеживающих результатов связано, вероятно, со стабильным ходом процесса в исследованных плавках, в приближении условий протекания реакций к термодинамическим. На плавках с нарушением хода технологического процесса коэффициент корреляции рассмотренных зависимостей резко уменьшался, причем каждый косвенный параметр реагирует на это нарушение индивидуально. Возможны два подхода к определению выходных параметров: построение многоканальной системы распознавания технологических ситуаций [6] или составление системы уравнений контроля по ходу продувки с использованием нескольких параметров.

При использовании принципа двухуровневого распознавания, на нижнем уровне осуществляется распознавание ситуации отдельно по каждой измеряемой переменной, а окончательное решение формируется на втором этапе с учетом общего числа обрабатываемых косвенных параметров и информативности каждого из них. Повышение надежности достигается за счет структурной избыточности многоканальных систем контроля и независимости выборки индивидуальных решений по всем информационным каналам. При этом могут рассматриваться как некоторые расчетные величины (средние значения, дисперсии и т. д.), так и различного рода структурные признаки (координаты характерных точек и участков кривых). Общая постановка задачи двухуровневого распознавания соответствует модельной схеме теории группового выбора [7].

Пусть имеется множество A подлежащих распознаванию ситуаций a_j ($j = 1 \dots m$) и множество B признаков z_i ($i = 1 \dots p$), позволяющих осуществить выбор на множестве A . Каждому признаку z_i ставится в соответствие некоторое отношение индивидуального предпочтения $R_i = R_i(z_i)$ на множестве A^m . Отношение R_i может представлять собой, например, множество парных сравнений типа $a_j > a_l$ ($j \neq l$), тогда

$$R_i \subseteq A \times A + m^2 \quad (4)$$

или выбор одной предпочтительной по сравнению со всеми остальными ситуации a_j , тогда

$$R_i \subseteq A' \quad (5)$$

или упорядоченную по предпочтению последовательность a_j , тогда

$$R_i \subseteq A^m \quad (6)$$

Требуется указать групповое отношение R , в некотором смысле согласованное с R_i , то есть задать правило согласования отношений $R = F(R_1 \dots R_p)$ и осуществить на нем окончательный групповой выбор предпочтительной ситуации.

Поставленная проблема группового выбора требует решения следующих задач:

- определение способа вычисления признаков z_i на основании текущей информации об измеренных переменных x_k ($k = 1 \dots n$) анализируемого технологического процесса;

- выбор вида индивидуальных отношений R_i на одном из множеств A^d , $1 \leq d \leq m$, а также однозначное определение алгоритма перехода от z_i к R_i ;

- задание правила согласования отношений $R = F(R_1 \dots R_p)$. Функция F обычно выбирается в соответствии с наиболее распространенным принципом согласования – правилом большинства. Этому принципу удовлетворяет, например, операция усреднения взвешенных индивидуальных отношений R_i ;

- выбор алгоритма окончательного группового распознавания технологической ситуации a_j .

Рассмотрим вначале случай сравнения двух ситуаций a_1 и a_2 . Без потери общности предположим, что общее число признаков z_i соответствует числу измеряемых переменных x_k ($p = n$). По результатам анализа признаков z_i формируются отношения индивидуальных предпочтений, в соответствии с которыми осуществляется переход к бинарной переменной:

$$y_i = \{1, -1\} \quad (7)$$

причем $y_i = 1$, если по z_i справедлив вывод о предпочтении $a_1 > a_2$ и делается выбор a_1 или $y_i = -1$, если выбирается a_2 .

Для принятия решения обращаются к средневзвешенной величине

$$y = \sum_{i=1}^p w_i y_i = \sum_{i \in P_1} w_i - \sum_{i \in P_2} w_i \quad (8)$$

где p_1, p_2 – количество членов, для которых соответственно $y_i = 1$ и $y_i = -1$; w_i – весовые коэффициенты, которые можно интерпретировать как коэффициент информативности.

Первый подход был применен нами для определения момента перехода к периоду обезуглероживания ниже критических массовых долей, при которых остаточная доля углерода пропорциональна скорости его окисления. В качестве признаков z_i ($i = 1 \dots 4$) использовали кривую изменения скорости

обезуглероживания, определенную по анализу отходящего газа, поверхностные плотности теплового потока на фурму и кессон, давление отходящего газа в переходном газоходе. В качестве ситуаций a_j ($j = 1, 2$) приняли наличие перехода к периоду обезуглероживания ниже критических массовых долей. Этот подход позволил повысить точность контроля массовой доли углерода в металле в диапазоне его содержания 0,20-0,45 % на 0,015 %.

Реализация второго подхода осуществлена при определении динамических параметров плавки. Система уравнений включает четыре уравнения, составленных на основе баланса кислорода и тепловых балансов в ванне конвертера, газов на выходе из горловины конвертера и для участка переходного газохода ОКГ. Решая ее, определим скорость изменения температуры ванны, скорости обезуглероживания металла и выгорания железа и коэффициент, характеризующий степень дожига CO в CO₂ [8]:

$$\begin{aligned}
 & -0,02m_c v_c + 0,01m_c v_{CO} - 0,214v_{Fe} + \\
 & + 1,06 \cdot 10^{-3} v \gamma_1 - 0,347 \cdot 10^{-2} m_c \cdot \exp(-\tau / 2,59Si_c) - \\
 & - 0,112 \cdot 10^{-2} m_c \exp[-\tau / 2,05(Mn_c - 0,9Mn_m)] - \\
 & - 0,204 \cdot 10^{-3} m_c \exp[-\tau / 50(P_c - 0,9P_m)] = 0; \\
 & - 0,88m_c v_t + 252m_c v_c - 146,5m_c v_{CO} + \\
 & + 4490v_{Fe} + 100m_c \exp(-\tau / 2,59Si_c) + \\
 & + 35,3m_c \exp\{-\tau / 2,05(Mn_c - 0,9Mn_m)\} + \\
 & + 3,95m_c \exp\{-\tau / [50(P_c - 0,9P_m)]\} - \\
 & - 1440[1 - \beta(\psi)] / \Delta\tau_y(\psi) \exp\{-\tau / \{\Delta\tau_y(\psi)m_y[1 - \beta(\psi)]\}\} - \\
 & - \sum_{j=1}^l 5770 \exp[-(\tau - \tau_{ij}) / (0,88m_{inj})] - \\
 & - \sum_{j=1}^m 5770 \exp[-(\tau - \tau_{ij}) / (0,459m_{ij})] - \\
 & - \sum_{j=1}^q 5800 \exp[-(\tau - \tau_{uj}) / (0,423m_{uj})] - \\
 & 0,12\lambda_\phi \Delta t \cdot |_{x=0} \times \sqrt{2\pi^3 / (60a_\phi \bar{\tau}_{пл})} \times \\
 & \times R_\phi L \cos[2\pi(0,5\bar{\tau}_{пл} + \tau) / \bar{\tau}_{пл}] = 0; \\
 & 0,0442m_c (t_{фак} - t_r) v_c - 0,0322m_c (t_{фак} - t_r) v_{CO} + \\
 & + 1,56 \cdot 10^{-3} K_2 \delta_p (t_{фак} - t_r) - 0,251(1 + v_2) \times \\
 & \times v_{H_2O} \Delta t_k - 0,06(1 + v_2) K_1 \Delta l = 0; \\
 & m_c [1,866 \cdot 10^{-2} p - 0,933 \cdot 10^{-2} p v_{CO} - \\
 & - 10,8(t_r + 273)] v_c + 10^{-3} p K_2 \delta_p = 0,
 \end{aligned} \tag{9}$$

где m_l – масса лома на плавку, т; v_{Fe} – массовая скорость окисления железа ванны, т/мин; v – расход дутья, м³/мин; γ_1 – коэффициент, характеризующий чистоту дутья; τ – продолжительность продувки, мин; Si_c, Mn_c, P_c – соответственно содержание кремния, мар-

ганца и фосфора в чугуне, %, Mn_m, P_m – конечное содержание марганца и фосфора в металле, %; v_t – скорость изменения температуры ванны, °С/мин; $\beta(y)$ – массовая доля лома вида y , расплавившегося при заливке чугуна в конвертер; $\Delta t_y(y)$ – удельное значение постоянной времени переходного процесса проплавления лома, мин/т; m_{ij}, m_{inj}, m_{uj} – масса соответственно j -й добавки извести, известняка и плавикового шпата, т; $\tau_{ij}, \tau_{inj}, \tau_{uj}$ – время от начала плавки до ввода j -й добавки соответственно извести, известняка и плавикового шпата, мин; m, l, q – количество добавок извести, известняка и плавикового шпата; λ_ϕ – теплопроводность футеровки, Вт/(м·К); a_ϕ – температуропроводность футеровки, м²/с; $\Delta t_{x=0}$ – амплитуда колебаний температуры на огневой поверхности футеровки, °С; $\bar{\tau}_{пл}$ – средняя продолжительность плавки, мин; L – длина эквивалентной цилиндрической футеровки конвертера, м; R_ϕ – текущий внутренний радиус футеровки, м; $t_{фак}$ – температура факела пламени в подъемном газоходе ОКГ, °С; t_r – температура газа в переходном газоходе, °С; K_1, K_2, γ_2 – коэффициенты; v_{H_2O} – расход воды на охлаждение кессона, м³/ч; Dt_k – перепад температуры воды на входе и выходе кессона, °С; Δl – температурное линейное расширение экранных труб подъемного газохода, мм.

Система уравнений решалась на ПЭВМ с дискретностью 10 с.

На рис. 3 приведены результаты решения системы на одной из плавков в 160-тонном конвертере**. Как видно из рисунка (кривая γ_{CO}), степень окисления углерода до CO в первые минуты продувки низка (0,4-0,7). Это можно объяснить низкой температурой заливаемого чугуна (1250 °С) и отражением кислородной струи от ванны, которая представляет собой в данный момент концентрированную металлическую фазу с четко выраженной поверхностью (продувка происходит по режиму «незаглубленной струи»). Возможно, также частичное отражение струи от кусков лома и извести. По мере

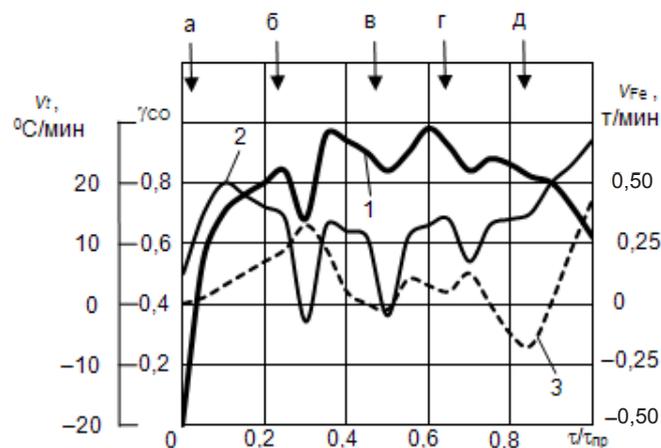


Рис. 3. Изменение доли углерода, окисляющегося до CO в полости конвертера (1), скоростей изменения температуры (2) и угара железа (3) ванны по ходу продувки, стрелки – моменты ввода добавок, т: извести – 4 (а); 2 (б); 1,5 (в); известняка – 0,75 (г, д)

**В уравнения системы (9) входят абсолютное значение и скорость изменения температуры ванны. В первом цикле решения системы температуру ванны вычисляли как разность между температурой чугуна и величиной температурной компенсации тепловых потерь конвертера путем излучения через горловину во время простоя. При расчете следующего цикла подставляли значение температуры ванны в предыдущем цикле, увеличенное на изменение температуры ванны за цикл

увеличения скорости обезуглероживания продувка переходит в режим «заглубленной струи», степень окисления углерода до СО возрастает и находится на уровне 0,80-0,95. В конце, когда скорость окисления углерода понижается и ванна оседает, продувка идет по режиму «незаглубленной струи», усиливаются отражение кислородной струи от поверхности ванны и инжекция монооксида углерода кислородной струей. Это приводит к понижению γ_{CO} до уровня 0,6-0,7. При добавке больших порций охлаждающих и шлакообразующих материалов в первые минуты продувки резко ухудшается поглощение кислорода ванной вследствие понижения температуры металла, вызванного охлаждающим действием добавок и снижением уровня расплава. По мере растворения добавки усвоение кислорода ванной повышается. Добавки в середине и в конце продувки на степень окисления углерода до СО почти не влияют. Скорость изменения температуры ванны в начале продувки достигает 20 °С/мин (рис. 3, кривая 2), затем несколько снижается из-за уменьшения скорости окисления кремния и марганца по мере их выгорания и достигает значения 13-15 °С/мин. В конце продувки скорость изменения температуры возрастает, что связано с увеличением скорости угара железа и степени дожига СО в СО₂. Добавки охлаждающих и шлакообразующих материалов приводят к снижению скорости изменения температуры ванны. Лишь на первых минутах продувки большие порции сыпучих приводят к снижению температуры ванны.

В начале продувки скорость угара железа непрерывно увеличивается, достигая значения 0,25 т/мин. Это связано со снижением скоростей выгорания кремния и марганца, а также низкой скоростью обезуглероживания. По мере увеличения скорости выгорания углерода угар железа уменьшается и в дальнейшем определяется процессом обезуглероживания. При значительных скоростях обезуглероживания ванны и высокой температуре наблюдается отрицательная скорость угара железа, т. е. восстанавливаются оксиды железа шлака. Присадки охлаждающих и шлакообразующих материалов повышают скорость окисления железа, что связано с уменьшением температуры и снижением уровня ванны.

Изменение температуры ванны также достаточно точно отражается системой уравнений (9). Взаимокорреляционная функция указывает на отсутствие запаздывания в определении температуры ванны при достаточно высоком коэффициенте корреляции ($R = 0,78$). Остаточное среднеквадратичное отклонение в определении температуры ванны составляет 10,6 °С.

Ввиду отсутствия непрерывного контроля степени дожига СО в СО₂ в полости конвертера и изменения массовой доли ΣFeO в шлаке, правильность определения этих корней системы проверяли на плавках с повалками. Для каждой плавки вычисляли массу шлака по балансу марганца и среднее значение степени окисления углерода до СО по балансу кислорода. При определении доли Fe в шлаке получили $R = 0,770$, остаточное среднеквадратичное отклонение $\sigma = 0,82$ %, достоверность коэффициента

корреляции $P > 0,950$. Сравнение среднего значения γ_{CO} , определенного по системе (9) и балансу кислорода, также показывает достаточно хорошее совпадение ($R = 0,783$, $\sigma = 0,026$, $P > 0,950$).

Таким образом, экспериментальная проверка динамической модели показала удовлетворительное отражение системой процессов, происходящих в ванне конвертера. Модель позволяет непрерывно по ходу продувки определять скорости обезуглероживания, изменения температуры и окисления железа ванны, а также степень дожига СО в СО₂ в полости конвертера.

Непрерывное определение выходных параметров плавки позволяет организовать оптимальное управление последней, ибо изменение управляющих параметров может приводить к совершенно различным изменениям выходных параметров процесса.

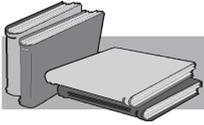
Так в нашей работе [9] приведен характер изменения оксидов железа в шлаке в зависимости от интенсивности подачи дутья. Установлено, что увеличение интенсивности подачи дутья может привести как к увеличению содержания (Fe O) в шлаке, так и к уменьшению, в зависимости от ее величины в момент изменения. В работе [10] получены аналогичные результаты по интенсивности дутья, а также проведены исследования по влиянию на характер изменения оксидов железа расстояния фурмы от уровня спокойного металла. Эти исследования показали наличие экстремального характера зависимостей.

Если учесть, что состояние шлако-металлической эмульсии, являющейся важнейшим параметром процесса, определяется не только долями оксидов железа в шлаке, но и скоростью окисления углерода, вязкостью шлака, коэффициентом поверхностного и межфазного натяжения и т. п., то нетрудно представить сложность разработки оптимальной программы изменения расхода дутья и положения фурмы в процессе продувки. С этой точки зрения предпочтительнее предварительное определение скоростей узловых точек, вычисление выходных параметров процесса по комплексным параметрам плавки и ведение управления в экстремальном режиме.

Выводы

Возможны два подхода к определению выходных параметров конвертерного процесса: построение многоканальной системы распознавания технологических ситуаций или составление системы уравнений контроля по ходу продувки с использованием нескольких параметров. При необходимости контроля одного выходного параметра, например, температуры ванны или скорости обезуглероживания, предпочтение следует отдавать многоканальной системе распознавания технологических ситуаций, при построении модели управления лучшие следует применять системы балансово-статистических уравнений.

Экспериментальная проверка динамической модели показала удовлетворительное отражение системой процессов, происходящих в ванне конвертера. Модель позволяет непрерывно по ходу продувки определять скорости обезуглероживания, изменения температуры и окисления железа ванны, а также степень дожига СО в СО₂ в полости конвертера.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Богушевский В. С., Жук С. В., Абрамова О. С.* Параметры работы водоохлаждаемого оборудования как индикаторы массо- и теплообменных процессов в ванне конвертера / Сб. науч. трудов "Актуальные проблемы современной металлургии". – Мариуполь. – 2012. – С. 126-134.
2. *Мелихов В. Г., Белин Ф. Т., Борисенко А. Н.* Тепловые нагрузки экранов охладителя конвертерных газов конвертеров емкостью 130 т // Промышленная энергетика. – 1973. – № 8. – С. 45-47.
3. *Банденхойер Ф., Оберхойзер П. Г.* Контроль процесса шлакообразования в кислородном конвертере по интенсивности вибраций и звука // Черные металлы. – 1970. – № 15. – С. 3-10.
4. *Величко А. Г., Антонец В. Д.* Пульсирующий характер обезуглероживания и его оценка на основе вибрационных параметров сталеплавильных процессов // Теория и практика металлургии. – 1997. – № 1. – С. 24-28.
5. *Богушевський В. С., Сухенко В. Ю.* Система прийняття рішень у керуванні режимом дуття конвертерної плавки // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2013. – № 2. – С. 69-80.
6. О построении многоканальной системы распознавания технологических ситуаций / С. П. Паринов, С. А. Дубровский, В. А. Щепов и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 1980. – № 12. – С. 105-109.
7. Математическая модель АСУ конвертерной плавкой / В.С.Богушевский, Ю. В. Оробцев, Н. А. Рюмшин, Н. А. Сорочкин. – К.: НПК «Киевский институт автоматики», 1996. – 212 с.
8. *Богушевський В. С., Єгоров К. В.* Контроль динаміки ванни по ходу продувки як складова системи керування конвертерною плавкою // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2013. – № 1. – С. 51-56.
9. *Богушевский В. С.* О возможности представления процесса выгорания углерода линейной моделью // Комплексная автоматизация сталеплавильного производства. – К.: Техніка, 1973. – С. 5-7.
10. *Шакиров К. М.* Физико-химические предпосылки управления дутьевым режимом кислородно-конвертерного процесса // Известия вузов. Черная металлургия. – 1993. – № 2. – С. 1-6.

Анотація

Богушевський В. С., Єгоров К. В., Сухенко В. Ю.
Контроль конвертерного процесу

Наведено моделі, що засновані на непрямих вимірюваннях характеру продувки у конвертері, вимірюваннях параметрів газів, що відходять у конвертері і газоході, а також теплової роботи водоохолоджувального обладнання. Визначені характеристики точності контролю вихідних параметрів і величина запізнення в отриманні результату. Проаналізовано застосування окремих моделей для контролю та керування процесом. Наведено результати експериментальної перевірки моделей.

Ключові слова

конвертер, контроль, продувка, швидкість зневуглицювання

Summary

Bogushevskiy V. S., Yegorov K. V., Sukhenko V. Yu.
BOF process control

Models based on indirect measurements of nature of flow blowing in the BOF, measurements of the parameters of the exhaust gas in the vessel and the duct, as well as a water-cooled equipment heat work were presented. Features of precision control output parameters and the magnitude of the delay in obtaining results were determined. Applicability of individual models for process control was analyzed. Experimental results validate the models were presented.

Keywords

BOF, control, blowing, rate of carbon burning

Поступила 03.04.14