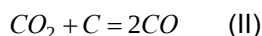
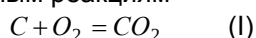


ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАГРАНОЧНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ДУТЬЯ КИСЛОРОДОМ

И.Ф.Селянин, В.А.Балыко, М.В.Иванов, В.А.Скударьев, И.Н.Гавронин

В работе [1] приведены результаты промышленного освоения по обогащению дутья кислородом ваграночной плавки. В данном сообщении предлагается математическая модель, которая включает все основные входные и выходные параметры рассматриваемого процесса.

Горение топлива в вагранке идет по двум основным реакциям



В кислородной зоне идет реакция (I), реакция (II) развивается в восстановительной зоне.

Система уравнений, описывающая процесс расходования кислорода (O_2) и диоксида углерода (CO_2) по высоте кислородной и восстановительной зон, имеет аналогичный вид [2]

$$\frac{dC}{dZ} = -\varphi \cdot F \cdot C \cdot \frac{1}{1 + S_m} \cdot \frac{T_C}{T_\Gamma} \quad (1)$$

где $\varphi = 0,28 \cdot Re^{-0,17}$ - функция переноса;

$Re = V_0 \cdot D_K / (\varepsilon_K \cdot \nu)$ - критерий Рейнольдса;

V_0, ν - скорость воздуха в пустой шахте и кинематическая вязкость газа;

D_K, ε_K - средний размер куса и порозность слоя кокса;

C - концентрация реагирующего газа;

$F = 6 \cdot (1 - \varepsilon_K) / D_K$ - удельная поверхность реагирования;

$S_m = V / K_P$ - критерий Семенова;

V - скорость газа по каналам коксовой насадки;

K_P - константа скорости реакции;

T_C - температура поверхности кокса.

Уравнение (1) при реализации на ЭВМ решалось численным методом Эйлера на каждом элементе длины ($\Delta Z = 10^{-2} \text{ м}$) по высоте печи

$$\Delta C = -\varphi \cdot F \cdot C \cdot \frac{1}{1 + S_m} \cdot \frac{T_C}{T_\Gamma} \cdot \Delta Z.$$

Граничные условия задачи

в кислородной зоне $C = O_2^0$ при $Z = 0$;

в восстановительной зоне $C = CO_{2K}$ при $Z = Z_K$,

где Z_K - высота кислородной зоны;

CO_{2K} - максимальное содержание CO_2 в конце кислородной зоны.

Температура поверхности кокса T_C изменяется по высоте кислородной и восстановительной зон в соответствии с выражениями [3]

$$T_C(Z) = T_K + (T_O - T_K) \cdot \exp\left(-3,2 \cdot \frac{Z}{D_K}\right)^{1/2} \quad (2)$$

$$T_C(Z) = T_\epsilon + (T_\epsilon - T_{CK}) \cdot \exp\left(-3,2 \cdot \frac{Z}{D_K}\right)^{1/2} \quad (3)$$

где T_K, T_ϵ - приведенная температура в кислородной и восстановительной зонах;

T_O, T_{CK} - температура кокса начальная и в конце кислородной зоны.

Температура газа в кислородной $T_{ГK}$ и восстановительной зонах $T_{ГB}$ соответственно равны

$$T_{ГK} = T_O + (O_2^0 - O_2) / O_2^0 \cdot (T_K - T_O) \quad (4)$$

$$T_{ГB} = T_\Gamma + [(O_2^0 - O_{2K} - CO_2) / O_2^0] \cdot (T_\epsilon - T_K) \quad (5)$$

где O_2, CO_2 - текущее значение компонент газа;

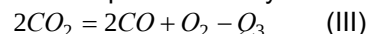
O_{2K} - содержание O_2 в конце кислородной зоны;

$$T_\Gamma = T_{ГK} + (O_{2K} - O_{2\epsilon}) / O_2^0 \cdot (T_{ГK} - T_{Г\epsilon}),$$

где $T_{ГK}$ - конечная температура газа в кислородной зоне;

$O_{2\epsilon}$ - текущее значение кислорода в восстановительной зоне.

При температуре поверхности кокса в кислородной зоне $T_C > 2000 \text{ K}$ развивается реакция термического разложения углекислоты



Константа равновесия этой реакции (K_3) имеет зависимость от температуры [4]

$$\lg K_3 = \frac{29530}{T} - 2,77 \cdot \lg T + 1,22 \cdot 10^{-3} \cdot T - 1,36 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 2,15 \quad (6)$$

Следовательно, с увеличением температуры T_C в конце кислородной зоны доля разложившегося диоксида углерода увеличи-

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАГРАНОЧНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ДУТЬЯ КИСЛОРОДОМ

вается, в отходящих газах растёт содержание СО.

Обозначим через α долю разложившейся углекислоты, тогда

$$K_3 = \frac{\alpha^3}{(2 + \alpha) \cdot (1 - \alpha)} \quad (7)$$

Применяя два балансовых соотношения

$$CO_2 = O_2^0 \cdot (1 - \alpha) \quad (8)$$

$$O_2 = O_2^0 - CO_2 - CO \cdot (50 + 0,5 \cdot O_2^0) / 100 \quad (9)$$

и уравнения для определения калориметрической температуры (T_K) в конце зоны

$$T_K = T_O + \frac{Q_1 \cdot CO_2 + (Q_1 - Q_2) \cdot (CO - O_2)}{0,0224 \cdot C_T \cdot 100} \quad (10)$$

где C_T - теплоемкость газа,

из (6-10) находим содержание CO_2, O_2, CO и T_K в конце кислородной зоны.

Для одномерной модели при нагреве материала в противопотоке температура металла T_M'' и температура газа T_T'' на выходе из зоны теплообмена определяется по известным формулам [6]

$$T_M'' = T_M' + (T_T' - T_M') \cdot \frac{W_1}{W_2} \cdot Z_T$$

$$Z_T = \frac{1 - \exp\left[-\left(1 - \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \left(\alpha_F \cdot \frac{F}{W_1}\right)\right]}{1 - \left(\frac{W_1}{W_2}\right) \exp\left[-\left(1 - \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \left(\alpha_F \cdot \frac{F}{W_1}\right)\right]} \quad (11)$$

$$T_T'' = T_T' + (T_T' - T_M') \cdot \frac{W_1}{W_2} \cdot Z_T \quad (12)$$

где W_1, W_2 - теплоемкость потоков газа и шихты;

T_M, T_T - температура металла и газа на выходе в зону теплообмена;

F - поверхность теплообмена.

Коэффициент теплообмена α_F между газом, жидкими каплями металла и шлака или кусками шихты равен

$$\alpha_F = 7,5 \cdot \alpha_V \cdot \frac{D_2}{1 - \varepsilon_2}, \quad \alpha_V = 0,5 \cdot V_0^{0,65} \cdot T_T' \cdot D_2^{-1} \quad (13)$$

$$\alpha_V = 186 \cdot V_0^{0,9} \cdot T_T'^{0,3} \cdot D_M^{-0,75} \cdot M \quad (\text{Вт/м}^3 \cdot \text{град})$$

где α_V - объемный коэффициент теплообмена;

D_2 - средний размер капель жидкого чугуна и шлака или кусков шихты;

ε_2 - порозность потоков жидкого металла и шлака или движущихся слоев шихты;

M - доля мелочи в шихте.

Теплопотери через стенки шахты и в горне вагранки рассчитывались по критериальным уравнениям

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Gr^m$$

где Nu, Re, Gr - критерии Нуссельта, Рейнольдса, Грасгофа;

A - коэффициент пропорциональности;

n, m - эмпирические показатели степени.

При численном решении уравнений теплообмена

$$W_M \cdot \Delta T_{Mi} = \alpha_F \cdot F \cdot (T_T - T_M) \cdot \Delta Z_i$$

$$W_M \cdot \Delta T_{Mi} = W_T \cdot \Delta T_{Ti}$$

с граничными условиями

$$Z = 0, \quad T_T = T_T', \quad T_M = T_M''$$

$$Z = Z_0, \quad T_T = T_T'', \quad T_M' = T_{nl}$$

итерационным методом для рассчитанной температурной кривой газа $T_T(Z)$ по уравнениям (4,5) с шагом ΔZ необходимо произвольно задать температуру металла T_M'' , прогнать решение по всей сетке до уровня холостой колоши Z_0 , сравнить полученное значение температуры металла с температурой плавления $(T_M - T_{nl}) \leq \delta$, и если эта разность превышает заданную величину, то нужно снова задать T_M'' в зависимости от знака величины $\Delta T = T_M' - T_{nl}$.

По аналогичному алгоритму рассчитывался теплообмен в зоне нагрева шихты. Высота холостой колоши задавалась с шагом $\Delta Z = 0,001$ м. Итерационная процедура заканчивалась, когда температура металла металла на выходе из зоны подогрева шихты на выходе из зоны подогрева шихты в пределах 10°C совпадала с температурой жидкого металла на входе в зону перегрева для заданного уровня холостой колоши.

По такому алгоритму была составлена программа на языке Q-Basic и реализована на ЭВМ АТ/РС 586.

Для расчёта были взяты базовые данные: высота вагранки $HO = 4$ м; внутренний диаметр вагранки $D_1 = 1$ м; расход кокса $K = 14\%$; начальная температура дутья $TO = 300^\circ\text{K}$; размер куса шихты $DM = 0,1$ м; размер куса кокса $DK = 0,065$ м; скорость дутья в пустой шахте $VO = 1,75$ м/с.

Расчетные данные представлены на рисунке 1. Они показали, что максимальная температура металла при расходе кокса $K = 14\%$ достигается при $19-20\% O_2^0$, при дальнейшем обогащении дутья кислородом температура металла прогрессивно падает,

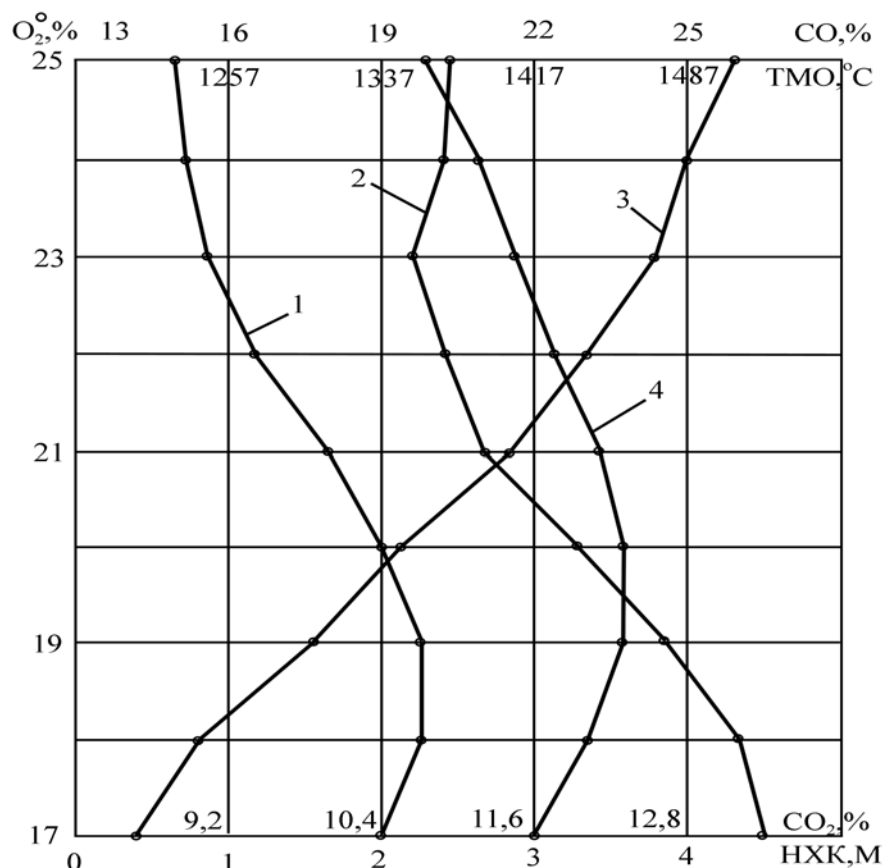


Рисунок 1 - Изменение основных параметров (НХК, CO_2 , CO , ТМО) ваграночной плавки при обогащении дутья кислородом.

1 – высота холостой колоши НХК, м;
2 – содержание CO_2 в отходящих газах, %;
3 – содержание CO в отходящих газах, %;
4 – температура металла на выпуске – ТМО, $^{\circ}\text{C}$.

что соответствует нашим экспериментальным данным [1].

Японские исследователи показали [6], что температура металла на выпуске повышается на $15\text{--}20^{\circ}\text{C}$, если вдуваемый воздух разбавлять колошниковыми газами или азотом до содержания до содержания кислорода в дутье $18,5\text{--}19,5\%$ O_2^O .

Высота холостой колоши также достигает максимума при $18\text{--}19\%$ O_2^O в дутье. Дальнейшее ее понижение связано с увеличением скорости выгорания топлива при росте концентрации кислорода в подаваемом дутье. Высота кислородной зоны, как показал расчет, практически не зависит от величины O_2^O и составляет $0,45\text{--}0,47\text{м}$, но наблюдается рост предельной температуры газа и поверхности кокса ($T_{\text{ПР}}$) в конце кислородной зоны:

$T_{\text{ПР}} = 2396\text{K}$ при $\text{O}_2^O = 21\%$, $T_{\text{ПР}} = 2633\text{K}$ при $\text{O}_2^O = 25\%$.

Повышение предельных температур в конце кислородной зоны приводит к увеличению доли разложившейся углекислоты (α) по реакции III с $\alpha = 0,1262(\text{O}_2^O = 21\%)$ до

$\alpha = 0,377(\text{O}_2^O = 25\%)$. Поведение расчетных кривых $\text{CO} = f(\text{O}_2^O)$ и $\text{CO}_2 = f(\text{O}_2^O)$ соответствует известным экспериментальным данным [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селянин И.Ф., Балыко В.А., М.В.Иванов, Федотов В.М./ Опыт применения кислорода в ваграночном процессе в литейном цехе ОАО "КМК".// Изв вузов. Черная металлургия, 2003, №6.
2. Чуханов З.Ф. Некоторые проблемы топлива и энергетики. М.: АН СССР, 1961-478с
3. Селянин И.Ф., Маркс Г.Л., Вальдман Л.М. Аналитическое и экспериментальное определение температуры поверхности кокса в кислородной зоне шахтной печи // Изв вузов. Черная металлургия, 1991, №4, с.71-73.
4. Лавров Н.В. Физико-химические основы горения и газификации топлива.-М.: ГНТИ, 1957-285с.
5. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Энергия, 1977.-344с.
6. Грачев В.А., Черный А.А. Современные методы плавки чугуна. Саратов, 1973.342с.
7. Леви Л.И. Кислород в процессах получения чугуна литья.- М.:Машгиз,1955,- 275.