

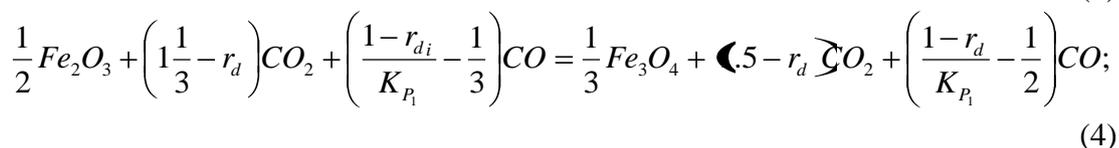
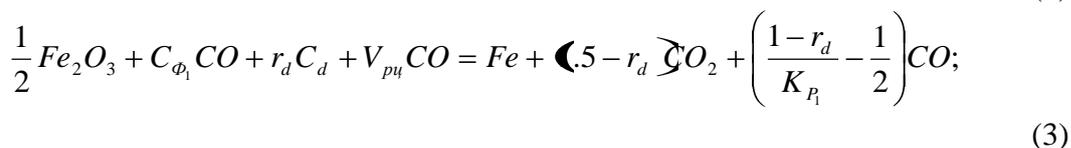
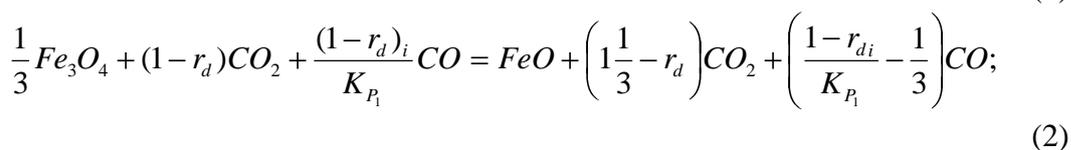
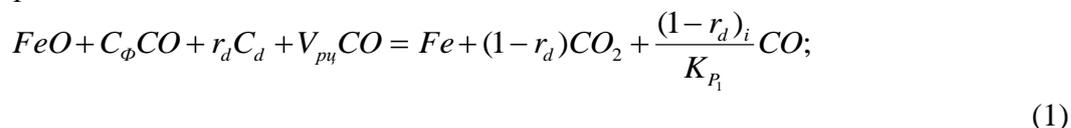
## КИСЛОРОДНАЯ ДОМЕННАЯ ПЕЧЬ

В настоящее время производство передельного чугуна является в значительной степени оптимизированным высокопроизводительным процессом, приближающимся к своим технически обусловленным пределам. Для того чтобы дополнительно снизить расход восстановителей ниже уже достигнутого уровня, необходим поиск новых путей и решений.

В данной работе предложено объединить преимущества варианта с отмывкой колошникового газа от  $\text{CO}_2$  с вариантом подачи горячих восстановительных газов по тракту горячего дутья с использованием в качестве дутья холодного технологического кислорода. Но при этом был сделан решительный шаг, отказавшись не только от воздухонагревателей, но и от нагрева рециркулируемого, предварительно отмывого от  $\text{CO}_2$ , колошникового газа. Несмотря на то, что при использовании кислорода вместо нагрева дутья, расход кокса практически не изменяется. Переход на новую технологию целесообразен, в связи со значительными размерами воздухонагревателей, достигающих по высоте 50–55 м и по наружному диаметру 9–11 м.

Расчет выполнен по методу ПДК с несколько идеализированными условиями плавки: состав чугуна:  $\text{Fe}_e = 0,95$  кг/кг,  $\text{C}_e = 0,05$  кг/кг; выход шлака:  $U = 250$  кг/т чугуна; температура чугуна ( $t_e$ ) и шлака ( $t_u$ ):  $t_e = 1500^\circ\text{C}$ ,  $t_u = 1550^\circ\text{C}$ ; содержание нелетучего углерода кокса:  $\text{C}_k^{\text{нел}} = 0,865$  кг; содержание кислорода в техническом кислороде: 100 %; температура вдуваемого кислорода и рециркулируемого колошникового газа:  $0^\circ\text{C}$ ; влажность технического кислорода и рециркулируемого колошникового газа:  $0,00\text{м}^3$ .

Ниже представлены реакции смешанного восстановления вюстита (в данном случае  $\text{FeO}$ ) в условиях потоколимитируемого режима косвенного восстановления и последующие реакции косвенного восстановления высших оксидов железа:



где  $C_\phi$  – количество сгорающего на фурмах углерода кокса, моль/моль Fe;  $r_d$  – степень прямого восстановления железа по Павлову ( $r_d = \text{Fe}_d^{2+} / \text{Fe}_e$ );  $V_{\text{пу}}$  – количество рециркулирующего в печи количества углерода колошникового газа, очищенного от  $\text{CO}_2$ , моль/моль Fe;  $K_p$  – константа равновесия реакции  $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ .

Из уравнения (4) вытекает, что

$$V_{\text{пу}} = ((1 - r_d) / K_p - 0,5), \text{ моль/моль Fe}, \quad (5)$$

$$C_\phi = (1,5 - 2r_d), \text{ моль/моль Fe}, \quad (6)$$

В расчетах используется следующая зависимость  $K_p = \text{CO}_2 / \text{CO}$  от температуры:

$$\lg K_p = 949 / T - 1,134; \quad K_p^{1173} = 0,47. \quad (7)$$

Определив  $V_{\text{пц}}$  в расчете на 1 моль (г-атом)  $C_{\text{ф}}$ :

$$V_{\text{пц}} = \frac{1 - r_d - 0.5K^{1173}_{\text{р}}}{K^{1173}_{\text{р}}(1.5 - 2r_d)} = \frac{0.765 - r_d}{0.705 - 0.94r_d}, \quad (8)$$

можно записать реакцию неполного сгорания  $C_{\text{ф}}$  с учетом рециркулируемого потока  $CO$ :

$$C_{\text{ф}} + 1/2O_2 + \frac{0.765 - r_d}{0.705 - 0.94r_d} CO = \frac{1.47 - 138.4r_d}{1.47 - 1.94r_d}. \quad (9)$$

Далее определяется теплосодержание фурменных газов:

$$J_{\text{ф}} = \frac{W_c + J_c^{1500}}{V_{\text{Г}}} = \frac{103,8 - 138,4r_d}{1.47 - 1.94r_d}, \text{ кДж/моль } C_{\text{ф}}, \quad (10)$$

и теоретическая температура горения  $C_{\text{ф}}(t_{\text{T}})$ , которая слабо зависит от  $r_d$ .

Расчет минимально возможной степени прямого восстановления ( $r_{\text{dmin}}$ ) и минимально возможного расхода кокса ( $K_{\text{min}}$ ) производится по балансу двух функций газифицируемого углерода: как источника тепла ( $C_{\text{к}}^{\text{T}}$ ) и как источника восстановителя ( $C_{\text{к}}^{\text{B}}$ ).

Расход углерода кокса как источника восстановителя:

$$C_{\text{к}}^{\text{B}} = C_{\text{к}}^{\text{T}} = C_{\text{ф}} + r_d = (1,5 - r_d), \text{ моль/моль Fe}. \quad (11)$$

Расход углерода кокса как источника тепла:

$$C_{\text{к}}^{\text{T}} = C_{\text{ид}} + (\Delta H_{\text{T}} / Q_{\text{Сф}} + 1) r_d, \quad (12)$$

где  $\Delta H_{\text{T}}$  – энтальпия реакции  $FeO + C = Fe + CO$  при  $T = 1173 \text{ K}$ , кДж/моль Fe;  $C_{\text{ид}}$  – расход кокса как источника тепла при  $r_d=0$ , моль/моль, определяемый по формуле:

$$C_{\text{ид}} = \frac{M_{\text{Fe}}}{M_{\text{c}} Fe_{\text{c}}} \left( \frac{\Delta i_{\text{t}} + u \Delta i_{\text{u}} - Q_{\text{Fe-c}} * \frac{C_{\text{e}}}{M_{\text{c}}}}{q_{\text{Сф}}} \right), \quad (13)$$

где  $q_{\text{Сф}}$  – теплоотдача  $C_{\text{ф}}$  в нижней ступени теплообмена при температуре газов на выходе из нее и температуре материалов на входе в нее  $900^\circ \text{C}$ , кДж/кг:

$$q_{\text{Сф}} = (1 - z)(w_{\text{c}} + i_{\text{c}}^{900}) - v_{\text{Г}} i_{\text{Г}}^{900}; \quad (14)$$

$\Delta i_{\text{e}}$ ,  $\Delta i_{\text{u}}$  – перегрев железа и шлака от  $900^\circ \text{C}$  до температур выпуска, кДж/кг;  $Q_{\text{Fe-c}}$  – теплота растворения углерода в железе, Дж/моль;  $z$  – потери тепла через кладку в долях от теплоты окисления  $C_{\text{ф}}$  до  $CO$ .

Решая равенство  $C_{\text{к}}^{\text{B}} = C_{\text{к}}^{\text{T}}$  относительно  $r_{\text{dmin}}$ ,

$$r_{\text{dmin}} = \frac{1 - \eta_{\text{CO}} C_{\text{ид}}}{1 + \eta_{\text{СГ}} \left( \frac{\Delta H_{\text{T}}}{Q_{\text{Сф}}} + 1 \right)}, \quad (15)$$

где  $\eta_{\text{CO}} = K_{\text{р}}^{1173} / (K_{\text{р}}^{1173} + 1)$ ;  $Q_{\text{Сф}} = M_{\text{c}} * q_{\text{Сф}}$ , находят  $r_{\text{dmin}} = 0,104$  (здесь использован прием итерации, так как  $q_{\text{Сф}}$ , в свою очередь зависит от  $r_{\text{dmin}}$  через  $v_{\text{Г}}$ ) и  $C_{\text{мин}}^{\text{T}} = 1.396$  моль  $C$ /моль  $Fe$ , а также минимально возможный расход кокса  $K_{\text{min}} = (C_{\text{мин}}^{\text{T}} * M_{\text{c}} / M_{\text{Fe}} * Fe + C_{\text{e}}) / C_{\text{к}}^{\text{непл}} = 0,3863$  кг/кг чугуна.

Далее, суммируя составляющие в приходной и расходной частях баланса, мы убеждаемся, что они практически сходятся. Расчет подтверждает реальность проекта доменной печи без воздухо- и газонагревателей, работающей на холодном кислородном дутье с рециркуляцией предварительно отмытых от  $CO_2$  колошниковых газов, который вдуваются в горн печи также в холодном состоянии. Сравнительно низкий расход сухого кокса (386,3 кг/т чугуна) и технического кислорода (350,7 кг/т чугуна или  $245,5 \text{ м}^3 O_2$ , что только на 100 – 120  $\text{м}^3$  выше, чем на печах предприятий РФ, работающих на обогащенном технологическим кислородом комбинированном дутье), отказ от внешних источников тепла (нагрев дутья или газа) и восстановителя (на доменных печах РФ вдувают в горн более 100  $\text{м}^3$  природного газа на тонну чугуна) позволят заметно снизить себестоимость перedelного чугуна и повысить конкурентоспособность доменного пердела. Безусловно,

негативным фактором обсуждаемого проекта является дефицит тепла в шахте. Этот вопрос решается загрузкой в печь нагретых до 350°С привозных окатышей. Это, безусловно, не лучший вариант, но реальный.