

Товаровский И.Г., Иванов А.П.

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Разработана методика и компьютерная программа прогнозной оценки показателей доменной плавки, опирающейся на данные базового периода. Разработанные инструменты могут быть использованы как в общем комплексе автоматизированной системы анализа реальной технологии, так и автономно.

Для расширения возможностей расчетного анализа реальной технологии доменной плавки потребовалось дополнить ранее разработанную методику [1] модулем прогноза показателей при изменениях параметров и условий плавки. С этой целью разработана методика и алгоритм прогнозной оценки, которые могут быть использованы как в общем комплексе автоматизированной системы анализа (АСА) реальной технологии, так и автономно. Прогнозный расчет состоит из двух частей:

А. Определение расходов компонентов железорудной шихты при заданных расходах кокса и дутьевых добавок.

Б. Определение расхода кокса при известных расходах компонентов железорудной шихты.

Согласование двух частей расчета производится с помощью итерационной процедуры с подстановкой расчетного расхода кокса (часть Б) в уравнения части А.

Для расчетов используется общая база исходных данных АСА. Из этой базы берутся составы сырья, кокса и дутьевых добавок, а также параметры режима плавки. Дополнительно в таблице состава сырья задаются доли компонентов шихты δ_i (кг/кг) в общем расходе (только для прогнозного варианта), потери от перехода в газ (δ_{SG} , δ_{KNa} , δ_{ASG}) и коэффициенты распределения элементов между чугуном и шлаком: L_{Si} , L_{Mn} , L_S , L_{Ti} , L_V , L_{Cr} , L_{As} (в таблице составов чугуна и шлака). При этом L_{Si} , L_{Mn} , L_S задают только, если не заданы [Si]; [Mn]; [S] в чугуне. Если последние заданы, то L_{Si} , L_{Mn} , L_S вычисляются. L_{Ti} , L_V , L_{Cr} , L_{As} в прогнозируемом варианте задают всегда, а содержание указанных компонентов в чугуне и шлаке вычисляют (см. ниже).

А. Определение расходов компонентов железорудной шихты при заданных расходах кокса и дутьевых добавок.

1. Уравнение баланса железа

$$R_{Fe} \cdot \sum \delta_i \cdot Fe_i + R_{Mn} \cdot \sum \delta_j \cdot Fe_{Mnj} + I_O \cdot Fe_{IO} + I_D \cdot Fe_{ID} + 0,01 \cdot K \cdot Z_K \cdot Fe_z + 0,01 \cdot Y \cdot Z_Y \cdot Fe_y = \\ 10^5 - 10^3 \cdot ([Si] + [Mn] + [S] + [P] + [C] + [Ti] + [V] + [Cr] + [As] + [Cu] + [Ni]) + \\ III \cdot (Fe_M) + 0,788 \cdot (FeO) + R_{скр} \cdot Fe_{скр};$$

$R_{Fe} = \sum R_i$ – сумма железосодержащих компонентов шихты (агломераты, окатыши, руды железные, конвертерный шлак, сварочный шлак, прочие добавки); III, (Fe_M) , (FeO) – количество шлака (кг/т) и содержание в нем

соответствующих компонентов, %; $R_{\text{скр}}$, $Fe_{\text{скр}}$ – то же для скрапа; K , Z_K , Y , Z_Y – расходы кокса и угля (кг/т) и содержания в них золы (%).

δ_i , Fe_i – доля i – го компонента (задается, кг/кг) в сумме R_{Fe} и содержание в нем железа (%); $R_{Mn} = \sum R_{Mnj}$ – сумма марганцевых руд и их заменителей; δ_j , Fe_j – доля j – го компонента (задается, кг/кг) в сумме R_{Mn} и содержание в нем железа (%); $И_О \cdot Fe_{И_О}$; $И_Д \cdot Fe_{И_Д}$ – известняк обычный и доломитизированный и содержание в них железа.

2. Уравнение баланса марганца

$$R_{Fe} \cdot \sum \delta_i \cdot Mn_i + R_{Mn} \cdot \sum \delta_j \cdot Mn_{Mnj} + И_О \cdot Mn_{И_О} + И_Д \cdot Mn_{И_Д} + 0,01 \cdot K \cdot Z_K \cdot Mn_z + 0,01 \cdot Y \cdot Z_Y \cdot Mn_y = [Mn] \cdot 10^3 + 55 \cdot Ш \cdot (MnO) / 71 + R_{\text{скр}} \cdot Mn_{\text{скр}}; \text{ (обозначения аналогичны)}$$

3. Уравнение баланса оксида магния

$$R_{Fe} \cdot \sum \delta_i \cdot MgO_i + R_{Mn} \cdot \sum \delta_j \cdot MgO_{Mnj} + И_О \cdot MgO_{И_О} + И_Д \cdot MgO_{И_Д} + 0,01 \cdot K \cdot Z_K \cdot MgO_z + 0,01 \cdot Y \cdot Z_Y \cdot MgO_y = Ш \cdot (MgO) + R_{\text{скр}} \cdot MgO_{\text{скр}}; \text{ (обозначения аналогичны)}$$

4. Уравнение количества шлака

Рассчитывается приход шлакообразующих компонентов:

$$\sum CaO = 0,01 \cdot (R_{Fe} \cdot \sum \delta_i \cdot CaO_i + R_{Mn} \cdot \sum \delta_j \cdot CaO_{Mnj} + И_О \cdot CaO_{И_О} + И_Д \cdot CaO_{И_Д} + 0,01 \cdot K \cdot Z_K \cdot CaO_z + 0,01 \cdot Y \cdot Z_Y \cdot CaO_y);$$

$$\sum SiO_2 = 0,01 \cdot (R_{Fe} \cdot \sum \delta_i \cdot SiO_{2i} + R_{Mn} \cdot \sum \delta_j \cdot SiO_{2Mnj} + И_О \cdot SiO_{2И_О} + И_Д \cdot SiO_{2И_Д} + 0,01 \cdot K \cdot Z_K \cdot SiO_{2z} + 0,01 \cdot Y \cdot Z_Y \cdot SiO_{2y});$$

$$\sum S = 0,01 \cdot (1 - \delta_{SG}) \cdot (R_{Fe} \cdot \sum \delta_i \cdot S_i + R_{Mn} \cdot \sum \delta_j \cdot S_{Mnj} + И_О \cdot S_{И_О} + И_Д \cdot S_{И_Д} + K \cdot S_K + Y \cdot S_Y + M \cdot S_M + \Gamma \cdot (S)^\Gamma); \text{ где } \delta_{SG} - \text{переход серы в газ (доли) - задается;}$$

Для остальных компонентов – аналогично.

Далее суммируют шлакообразующие за вычетом переходящих в чугуна:

$$Ш = (\sum CaO + \sum MgO + \sum BaO + \sum Al_2O_3 + \sum SiO_2 - 21,4 \cdot [Si] + \sum MnO - 710 \cdot [Mn] / 55 + 0,5 \cdot (\sum S - 10 \cdot [S]) + \sum TiO_2 - 16,67 \cdot [Ti] + \sum V_2O_5 - 17,84 \cdot [V] + \sum Cr_2O_3 - 14,62 \cdot [Cr] + \sum K_2O + \sum Na_2O + \sum As_2O_5 - 15,33 \cdot [As]) / (1 - 0,01(FeO) - 0,01(Fe_m)); \text{ где: } (FeO), (Fe_m) - \text{содержание в шлаке компонентов железа, кг/кг (задается).}$$

При вычислении суммы шлакообразующих вместо содержания компонентов в чугуне $[Si]$, $[Mn]$, $[S]$, $[Ti]$, $[V]$, $[Cr]$, $[As]$ подставляются выражения для их определения:

$$[Si] = 46,67 \cdot \sum SiO_2 / (1000 + Ш \cdot L_{Si}); [Mn] = 77,46 \cdot \sum MnO / (1000 + Ш \cdot L_{Mn});$$

$$[S] = \sum S / (1000 + Ш \cdot L_S); [Ti] = 60 \cdot \sum TiO_2 / (1000 + Ш \cdot L_{Ti});$$

$$[V] = 56 \cdot \sum V_2O_5 / (1000 + Ш \cdot L_V); [Cr] = 68,42 \cdot \sum Cr_2O_3 / (1000 + Ш \cdot L_{Cr});$$

$$[As] = 65,22 \cdot \sum As_2O_5 / (1000 + Ш \cdot L_{As}).$$

Для $[Si]$, $[Mn]$, $[S]$ подстановка делается только, если эти значения не заданы; тогда заданы L_{Si} , L_{Mn} , L_S . В противном случае подставляются заданные значения $[Si]$, $[Mn]$, $[S]$.

5. Уравнение основности шлака

$$\sum CaO / (\sum SiO_2 - 21,4 \cdot [Si]) = V_{Ш}, \text{ причем величина } V_{Ш} \text{ задается.}$$

Выражения для суммы шлакообразующих компонентов $Ш$ и основности $V_{Ш}$ содержат искомую величину $Ш$. Для решения задачи её значение

(Ш) в первом шаге задают, а затем подставляют полученное значение в начало до получения заданной точности Ш.

Решение системы линейных уравнений с определением искоемых величин производят стандартным матричным методом, после чего выполняют расчет окончательного состава чугуна и шлака по выражениям :

Чугун: $[Si] = 46,67 \cdot \sum SiO_2 / (1000 + Ш \cdot L_{Si})$; $[Mn] = 77,46 \cdot \sum MnO / (1000 + Ш \cdot L_{Mn})$; $[S] = \sum S / (1000 + Ш \cdot L_S)$; $[Ti] = 60 \cdot \sum TiO_2 / (1000 + Ш \cdot L_{Ti})$; (если $[Si]$, $[Mn]$, $[S]$ заданы, то они не пересчитываются). Для остальных компонентов – аналогично.

Шлак: $(CaO) = 100 \cdot \sum CaO / Ш$; $(MgO) = 100 \cdot \sum MgO / Ш$; $(Al_2O_3) = 100 \cdot \sum Al_2O_3 / Ш$; $(SiO_2) = 100 \cdot (\sum SiO_2 - 21,4 \cdot [Si]) / Ш$. Для остальных компонентов – аналогично.

Для компонентов чугуна, содержания которых заданы заранее, определяют величины коэффициентов распределения:

$$L_S = (S)/[S]; L_{Si} = 0,4667 \cdot (SiO_2)/[Si]; L_{Mn} = 0,775 \cdot (MnO)/[Mn].$$

Дополнительный вариант расчета.

Вариантом предусматривается пересчет состава одного из агломератов по условиям получения заданных расходов I_O , I_D , R_{Mn} , например = 0.

С этой целью после определения указанных величин по изложенной схеме расчета определяют отклонения этих величин от заданных : $\Delta I_O = I_O - I_{O \text{ зад}}$; $\Delta I_D = I_D - I_{D \text{ зад}}$; $\Delta R_{Mn} = R_{Mn} - R_{Mn \text{ зад}}$. После этого новый состав агломерата определяют как средневзвешенный для суммы $R_A + \Delta I_O + \Delta I_D + \Delta R_{Mn}$.

Пересчет на потребное количество материалов и вынос пыли

Расчетные величины расходов по балансовым уравнениям соответствуют количествам компонентов, переходящим в чугун и шлак. Для пересчета на количества, потребные для загрузки в печь, их необходимо разделить (все, кроме кокса и угля) на $(1 - \delta_{BP}) \cdot (1 - \delta_{oc})$, а расход кокса – на $(1 - \delta_{BK}) \cdot (1 - \delta_{oc})$, где : δ_{BP} – вынос рудной части, δ_{BK} – вынос кокса, δ_{oc} – потери в окружающую среду, кг/кг. Величины выноса и потерь задаются.

Вынос колошн. пыли: $V_{КП} = (R_{Fe} + R_{Mn} + I_O + I_D) \cdot \delta_{BP} / (1 - \delta_{BP}) + K \cdot \delta_{BK} / (1 - \delta_{BK})$, кг/т. Содержание компонентов в колошниковой пыли определяется как средневзвешенное по массе.

Б. Определение расхода кокса при известных расходах компонентов железорудной шихты.

Исходные характеристики шихты

Восстановленное железо чугуна, шлака и скрапа, кг/т чугуна:

$Fe_{Re} = 1000 - 10 \cdot ([Si] + [Mn] + [S] + [P] + [C] + [Ti] + [V] + [Cr] + [As] + [Cu] + [Ni]) + 0,01 \cdot [Ш \cdot (Fe_M) + R_{скр} \cdot Fe_{скр} - R_{Fe} \cdot \sum \delta_i \cdot Fe_{Mi}]$; где: Fe_{Mi} – содержание металлического железа в i -м компоненте шихты, %.

Кислород оксидов, отнимаемый от шихты, кг/т чугуна:

$$O_{FeO} = 16 \cdot Fe_{Re} / 56 - 0,16 \cdot Ш \cdot (FeO) / 72;$$

$$O_{Fe_2O_3} = 0,001 \cdot (R_{Fe} \cdot \sum \delta_i \cdot Fe_2O_{3i} + R_{Mn} \cdot \sum \delta_j \cdot Fe_2O_{3j} + I_O \cdot Fe_2O_{3иO} + I_D \cdot Fe_2O_{3ид} +$$

$0,01 \cdot K \cdot Z_K \cdot Fe_2O_{3Z} + 0,01 \cdot Y \cdot Z_Y \cdot Fe_2O_{3Y}$); $O_L = 320 \cdot [Si]/28 + 160 \cdot [Mn]/55 + 800 \cdot [P]/62 + 320 \cdot [Ti]/48 + 480 \cdot [V]/102 + 480 \cdot [Cr]/104$;

$O_{SO_3} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot (R_{Fe} \cdot \sum \delta_i \cdot SO_{3i} + R_{Mn} \cdot \sum \delta_j \cdot SO_{3j} + I_O \cdot SO_{3IO} + I_{ИД} \cdot SO_{3ИД}) + 6 \cdot 10^{-5} \cdot (K \cdot Z_K \cdot SO_{3Z} + Y \cdot Z_Y \cdot SO_{3Y})$; $O_{SШ} = 0,5 \cdot (\sum S - 10 \cdot [S])$;

$O_{ЛВ} = 160 \cdot [Ni]/59 + 2,5 \cdot [Cu] + 32 \cdot \sum V_2O_5 / 182$; $O_{As} = 80 \cdot \sum As_2O_5 / 230$;

$O_{MnO_2} = 0,16 \cdot (R_{Fe} \cdot \sum \delta_i \cdot MnO_{2i} + R_{Mn} \cdot \sum \delta_j \cdot MnO_{2Mnj} + I_O \cdot MnO_{2IO} + I_{ИД} \cdot MnO_{2ИД}) + 0,01 \cdot K \cdot Z_K \cdot MnO_{2Z} + 0,01 \cdot Y \cdot Z_Y \cdot MnO_{2Y} / 87$; $O_{ЛЕТ} = 0,01 \cdot K \cdot O_K$.

Отнимаемый от железа прямым путем:

$O_d = 0,01 \cdot r_d \cdot O_{FeO}$ (r_d задан в %); $C_d = 3 \cdot O_d / 4$; $C_L = 3 \cdot O_L / 4$.

Величина r_d в первом шаге задана в %, а затем вычисляется по специальным выражениям [2], опирающимся на данные базового периода, принятого в качестве реальной основы прогноза (см. ниже).

Отнимаемый от железа газом: $O_g = O_{FeO} + O_{Fe_2O_3} - O_d$.

Общий кислород шихты:

$O_{Ш} = O_{FeO} + O_{Fe_2O_3} + O_L + O_{SO_3} + O_{SШ} + O_{ЛВ} + O_{As} + O_{MnO_2} + O_{ЛЕТ}$

Диоксид углерода шихты, м³/т чугуна

$CO_{2CaO} = 0,01 \cdot (I_O \cdot 22,4 \cdot (CaO_{IO}/56 - SiO_{2IO}/60) + I_{ИД} \cdot 22,4 \cdot (CaO_{ИД}/56 - SiO_{2ИД}/60))$;

$CO_{2MgO} = 0,01 \cdot (I_O \cdot MgO_{IO} + I_{ИД} \cdot MgO_{ИД}) \cdot 22,4/40$;

$CO_{2FeO} = 0,224 \cdot R_{Fe} \cdot (\sum \delta_i \cdot CO_{2i}) / 44$; $CO_{2MnO} = 0,224 \cdot R_{Mn} \cdot (\sum \delta_j \cdot CO_{2j}) / 44$;

Общий диоксид углерода шихты: $CO_{2Ш} = CO_{2CaO} + CO_{2MgO} + CO_{2FeO} + CO_{2MnO}$.

Влага шихты, кг/т чугуна: $H_2O_{Ш} = 0,01 \cdot (R_{Fe} \cdot \sum \delta_i \cdot H_2O_i + R_{Mn} \cdot \sum \delta_j \cdot H_2O_{Mnj} + I_O \cdot H_2O_{IO} + I_{ИД} \cdot H_2O_{ИД} + K \cdot H_2O_K)$.

Масса загруженной шихты, кг/т чугуна

$R_{\Sigma} = 1000 + Ш + O_{Ш} + 1,96 \cdot CO_{2Ш} + H_2O_{Ш}$.

Дутьё

Расход сухого дутья: $v_d = 93,333 / (\omega + 0,5 \cdot \varphi\%)$, м³/кг С (здесь ω и $\varphi\%$ заданы в %); (пересчет из г/м³ в %: $\varphi\% = \varphi \cdot 22,4/180$). Теплоемкость дутья:

$d_d = 4,187 \cdot [(0,13 \cdot 10^{-5} \cdot t_d + 0,0182) \cdot 0,01 \cdot \omega + (6,5 \cdot 10^{-5} \cdot t_d + 0,3464) \cdot 0,001244 \cdot \varphi + 2,89 \cdot 10^{-5} \cdot t_d + 0,3039]$, кДж/м³ К.

Энтальпия дутья: $i_d = v_d \cdot (d_d \cdot t_d - 108,07 \cdot \varphi\%)$, кДж/кг С.

Теплоемкость и унос теплоты в колошник фурменным газом, кДж/кг С:

$d_{CO_k} = 1,29 + 0,1089 \cdot t_k \cdot 10^{-3}$; $d_{N_k} = 1,29 + 0,0837 \cdot t_k \cdot 10^{-3}$; $d_{H_k} = 1,285 + 0,0335 \cdot t_k \cdot 10^{-3}$;

$q_{фг} = (1,8667 \cdot d_{CO_k} + v_d \cdot 0,01 \cdot \varphi\% \cdot d_{H_k} + v_d \cdot (1 - 0,01 \cdot \omega) \cdot d_{N_k}) \cdot t_k$.

Теплоотдача углерода кокса, сжигаемого у фурм, кДж/кг С:

$w_c = 10400 + 1200 \cdot \delta_{гp} + i_d$; $q_c = w_c \cdot (1 - q_{охл}) - q_{фг}$, где:

$\delta_{гp}$ – степень графитизации углерода, кг/кг (0,4–0,6),

$q_{охл}$ – общие потери на охлаждение, кДж/кДж (0,10–0,20).

Твердая (жидкая) дутьевая добавка (уголь, мазут).

Расход М и У задается в кг/т чугуна, состав – из исходных данных, в том числе H_2O_y , H_2O_M (кг/кг, ккал/кг); температура t_y , t_M .

Дутье на сжигание добавки, м³/кг:

$$v_y = v_d \cdot (C_y - 0,75 \cdot O_y - 0,667 \cdot H_2O_y); v_m = v_d \cdot (C_m - 0,75 \cdot O_m - 0,667 \cdot H_2O_m).$$

Теплота сжигания у фурм, кДж/кг:

$$\text{Заданная (если задана)} q_{y3} = 4,187 \cdot q_y; q_{m3} = 4,187 \cdot q_m.$$

$$\text{Расчетная (если не задана)} q_{yp} = 10400 \cdot (C_y - 0,75 \cdot O_y - 0,667 \cdot H_2O_y) - 13440 \cdot H_2O_y; q_{mp} = 10400 \cdot (C_m - 0,75 \cdot O_m - 0,667 \cdot H_2O_m) - 13440 \cdot H_2O_m.$$

Общая выделенная теплота добавок у фурм, кДж/кг:

$$\Sigma q_y = q_{yp} + t_y \cdot (d_y + z_y \cdot t_y) + v_y \cdot d_d \cdot t_d - 108,07 \cdot v_y \cdot \varphi\% - 0,01 \cdot Z_y \cdot [1770 + 1,67 \cdot (t_{ш} - 1450)];$$

$$\Sigma q_m = q_{mp} + t_m \cdot (d_m + z_m \cdot t_m) + v_m \cdot d_d \cdot t_d - 108,07 \cdot v_m \cdot \varphi\%.$$

Если заданы q_y , q_m , то в выражения ставятся q_{y3} и q_{m3} вместо q_{yp} и q_{mp} .

Водород, образованный при горении добавок, м³/кг:

$$\Sigma H_y = 11,2 \cdot H_y + 1,244 \cdot H_2O_y + v_y \cdot 0,01 \cdot \varphi\%;$$

$$\Sigma H_m = 11,2 \cdot H_m + 1,244 \cdot H_2O_m + v_m \cdot 0,01 \cdot \varphi\%.$$

Азот, образованный при горении добавок, м³/кг:

$$\Sigma N_y = 22,4 \cdot N_y / 28 + v_y \cdot (1 - 0,01 \cdot \omega); \Sigma N_m = 22,4 \cdot N_m / 28 + v_m \cdot (1 - 0,01 \cdot \omega).$$

Теплота добавок, уносимая в колошник:

$$q_{yк} = (1,8667 \cdot C_y \cdot d_{COк} + \Sigma H_y \cdot d_{Hк} + \Sigma N_y \cdot d_{Nк}) \cdot t_k;$$

$$q_{mк} = (1,8667 \cdot C_m \cdot d_{COк} + \Sigma H_m \cdot d_{Hк} + \Sigma N_m \cdot d_{Nк}) \cdot t_k.$$

Теплоотдача добавок, кДж/кг: $w_y = (1 - q_{охл}) \cdot \Sigma q_y - q_{yк};$

$$w_m = (1 - q_{охл}) \cdot \Sigma q_m - q_{mк}.$$

Газообразная дутьевая добавка (природный, коксовый газ и др.)

Расход газообразных добавок (Γ) дается в м³/т чугуна. В исходных данных состав задан следующими параметрами, которые могут использоваться для прогнозного расчета: содержания углерода (кг/м³) – $C_{ПГ}$, $C_{КГ}$; водорода (м³/м³) – $H_{ПГ}$, $H_{КГ}$; азота (м³/м³) – $N_{ПГ}$, $N_{КГ}$; кислорода (м³/м³) – $O_{ПГ}$, $O_{КГ}$; серы (кг/м³) – $S_{ПГ}$, $S_{КГ}$; теплотворность полная (ккал/м³) – $Q_{ПГ}$, $Q_{КГ}$, у фурм (ккал/м³) – $q_{ПГ}$, $q_{КГ}$; температура, °С – $t_{ПГ}$, $t_{КГ}$.

Кроме этого состав может быть задан исходными компонентами, на основе которых пересчитывают заданные (по запросу или если заданных нет). Исходные компоненты следующие (м³/м³): (CO)^Г, (CO₂)^Г, (H₂)^Г, (H₂O)^Г, (N₂)^Г, (O₂)^Г, (CH₄)^Г, (C₂H₆)^Г, (C₃H₈)^Г, (C₄H₁₀)^Г, (C₅H₁₂)^Г, (C₂H₄)^Г, (C₂H₂)^Г; (кг/м³): (S)^Г, (C_{ТВ})^Г. По этому составу определяются общие содержания углерода (кг/м³) – (C)^Г, кислорода (м³/м³) – (O_Σ)^Г, водорода (м³/м³) – (H_Σ)^Г, азота (м³/м³) – (N_Σ)^Г. Далее рассчитывают:

$$\text{Расход дутья (м³/м³): } v^Г = v_d \cdot [(C)^Г - 1,0714 \cdot (O_Σ)^Г].$$

Теплота горения у фурм (кДж/м³): $q^Г = 1595 \cdot (CH_4)^Г + 6070 \cdot (C_2H_6)^Г + 10132 \cdot (C_3H_8)^Г + 13817 \cdot (C_4H_{10})^Г + 18000 \cdot (C_5H_{12})^Г + 12142 \cdot (C_2H_4)^Г + 20014 \cdot (C_2H_2)^Г - 12645 \cdot CO_2 - 10800 \cdot H_2O$; (соответствует $q_{ПГ}$, $q_{КГ}$ и др.).

При заданной теплоемкости $d^Г$ определяется общая выделенная теплота газообразных добавок у фурм, кДж/м³: $\Sigma q^Г = d^Г \cdot t^Г + q^Г + v^Г \cdot d_d \cdot t_d - 108,07 \cdot v^Г \cdot \varphi\%.$

Уносимая в колошник теплота, кДж/м³:

$$q^{\Gamma K} = [1,8667 \cdot (C)^{\Gamma} \cdot d_{COK} + ((H_{\Sigma})^{\Gamma} + 0,01 \cdot v^{\Gamma} \cdot \varphi_{\%}) \cdot d_{HK} + ((N_{\Sigma})^{\Gamma} + v^{\Gamma} \cdot (1 - 0,01 \cdot \omega) \cdot d_{Nk}) \cdot t_k.$$

$$\text{Теплоотдача добавок, кДж/м}^3: w^{\Gamma} = (1 - q_{охл}) \cdot \Sigma q^{\Gamma} - q^{\Gamma K}.$$

Теплопотребность процессов

Восстановление $Fe_2O_3 - FeO$ и косвенное (газовое) $FeO - Fe$ (выделение):

$$q_{Fe} = Fe_{Re} \cdot (1 - 0,01 \cdot r_d) \cdot (236 + 736 \cdot \delta_{H_2O}) + (75 - 2575 \cdot \delta_{H_2O}) \cdot O_{Fe_2O_3}, \text{ кДж/т.}$$

(δ_{H_2O} – вычисляется далее, а в первом шаге задается)

Прямое восстановление железа (поглощение теплоты), кДж/т :

$$q_{rd} = 27,2 \cdot r_d \cdot Fe_{Re}.$$

Прямое восстановление трудновосстановимых элементов и перевод серы в шлак (поглощение теплоты): $q_L = (1000 + 0,01 \cdot (\text{Ш} \cdot (Fe_M) + R_{крп} \cdot Fe_{крп}) \cdot (260 \cdot [Si] + 52,5 \cdot [Mn] + 233 \cdot [P] + 148 \cdot [Ti] + 88 \cdot [V] + 81 \cdot [Cr]) + 5728 \cdot (\Sigma S - 10 \cdot [S]))$, кДж/т

Восстановление легковосстановимых элементов (выделение теплоты), кДж/т :

$$q_{ЛВ} = (1000 + 0,01 \cdot (\text{Ш} \cdot (Fe_M) + R_{крп} \cdot Fe_{крп})) \cdot ([Ni] \cdot (7,3 - 7 \cdot \delta_{H_2O}) + [Cu] \cdot (20,3 - 6,5 \cdot \delta_{H_2O})) + (\Sigma V_2O_5) \cdot (1330 - 450 \cdot \delta_{H_2O});$$

$$q_{As} = (1000 + 0,01 \cdot (\text{Ш} \cdot (Fe_M) + R_{крп} \cdot Fe_{крп})) \cdot ([As] \cdot (33,4 - 13,73 \cdot \delta_{H_2O}));$$

$$q_{MnO_2} = (R_{Fe} \cdot \Sigma \delta_i \cdot MnO_{2i} + R_{Mn} \cdot \Sigma \delta_j \cdot MnO_{2Mnj} + I_O \cdot MnO_{2IO} + I_{д} \cdot MnO_{2Ид} + 0,01 \cdot K \cdot Z_K \cdot MnO_{2Z} + 0,01 \cdot Y \cdot Z_Y \cdot MnO_{2Y}) \cdot (1700 - 475 \cdot \delta_{H_2O}).$$

Разложение карбонатов и взаимодействие (0,6) CO_{2CaO} с углеродом (поглощение теплоты), кДж/т : $q_{CaCO_3} = 12500 \cdot CO_{2CaO}$; $q_{MgCO_3} = 6350 \cdot CO_{2MgO}$; $q_{FeCO_3} = 4800 \cdot CO_{2FeO}$; $q_{MnCO_3} = 6625 \cdot CO_{2MnO}$.

Шлакообразование (выделение теплоты), кДж/т :

$$q_{ШО} = 1130 \cdot [I_O \cdot (CaO_{IO} + MgO_{IO} - SiO_{2IO}) + I_{д} \cdot (CaO_{Ид} + MgO_{Ид} - SiO_{2Ид})].$$

Средняя температура шихты при загрузке, $^{\circ}C$:

$$t_{3AG} = (R_{Fe} \cdot \Sigma \delta_i \cdot t_i + R_{Mn} \cdot \Sigma \delta_j \cdot t_j + I_O \cdot t_{IO} + I_{д} \cdot t_{Ид} + K \cdot t_K) / (R_{Fe} + I_O + I_{д} + R_{Mn} + K).$$

Энтальпия шихты при загрузке (приход тепла), кДж/т :

$$q_{3AG} = (1000 + 0,01 \cdot (\text{Ш} \cdot (Fe_M) + R_{крп} \cdot Fe_{крп})) \cdot (0,5 + 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot t_{3AG}) \cdot t_{3AG} + \text{Ш} \cdot (0,8 + 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot t_{3AG}) \cdot t_{3AG} + K \cdot (1 - 0,01 \cdot Z_K - 0,01 \cdot S_K) \cdot (1,05 + 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot t_{3AG}) \cdot t_{3AG} + O_{Ш} \cdot (0,95 + 0,636 \cdot 10^{-3} \cdot t_{3AG}) \cdot t_{3AG} + CO_{2Ш} \cdot (1,633 + 0,63 \cdot 10^{-3} \cdot t_{3AG}) \cdot t_{3AG} + 1,2444 \cdot H_2O_{Ш} \cdot (1,486 + 0,2177 \cdot 10^{-3} \cdot t_{3AG}) \cdot t_{3AG}.$$

Испарение влаги шихты (поглощение), кДж/т: $q_{H_2O} = 2261 \cdot H_2O_{Ш}$.

Энтальпия газифицированных компонентов шихты, уносимых в ко-лошник, кДж/т :

$$q_{ГК} = [(O_d + O_g + O_L + O_{SO_3} + O_{ЛВ} + O_{MnO_2} + O_{As} + \delta_{SG} \cdot \Sigma S + 0,01 \cdot K \cdot O_K) \cdot (0,95 + 0,636 \cdot 10^{-3} \cdot t_k) + (C_d + C_L + 0,01 \cdot K \cdot C_{ЛЕТ} + 7,2 \cdot CO_{2CaO} / 22,4) \cdot (1,05 + 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot t_k) + (1,633 + 0,63 \cdot 10^{-3} \cdot t_k) \cdot 1,96 \cdot CO_{2Ш} + 0,008 \cdot K \cdot N_K \cdot (1,29 + 0,09 \cdot 10^{-3} \cdot t_k) + K \cdot H_K \cdot 0,112 \cdot (1,285 + 0,0335 \cdot 10^{-3} \cdot t_k) + 1,2444 \cdot H_2O_{Ш} \cdot (1,486 + 0,2177 \cdot 10^{-3} \cdot t_k)] \cdot t_k.$$

Энтальпия чугуна и шлака (поглощение), кДж/т:

$$q_{чуг} = (1000 + 0,01 \cdot (\text{Ш} \cdot (Fe_M) + R_{крп} \cdot Fe_{крп})) \cdot (146,55 + 0,755 \cdot t_{чуг});$$

$$q_{\text{шл}} = \text{Ш} \cdot (1770 + 1,67 \cdot (t_{\text{ш}} - 1450)).$$

Расход кокса

Суммарная теплопотребность шихты, кДж/т: $q_{\Sigma} = q_{\text{чуг}} + q_{\text{шл}} + q_{\text{rd}} + q_{\text{L}} + q_{\text{CaCO}_3} + q_{\text{MgCO}_3} + q_{\text{FeCO}_3} + q_{\text{MnCO}_3} + q_{\text{H}_2\text{O}} + q_{\text{Гк}} - q_{\text{Fe}} - q_{\text{ЛВ}} - q_{\text{As}} - q_{\text{MnO}_2} - q_{\text{Zn}} - q_{\text{шО}}$.

Потребность углерода кокса у фурм, кг/т:

$$C_{\text{Ф}} = (q_{\Sigma} - Y \cdot w_{\text{Y}} - M \cdot w_{\text{M}} - \Gamma \cdot w_{\text{Г}}) / q_{\text{C}}.$$

Общая потребность нелетучего углерода кокса, кг/т:

$$C_{\Sigma} = C_{\text{Ф}} + C_{\text{d}} + C_{\text{L}} + (1000 + 0,01 \cdot (\text{Ш} \cdot (\text{Fe}_{\text{M}}) + R_{\text{скр}} \cdot \text{Fe}_{\text{скр}})) \cdot 0,01 \cdot [\text{C}] - C_{\text{R}},$$

где: $C_{\text{R}} = 0,01 \cdot (R_{\text{Fe}} \cdot \sum \delta_i \cdot C_i + R_{\text{Mn}} \cdot \sum \delta_j \cdot C_{\text{Mnj}})$.

Потребность кокса в печи (сухого), кг/т:

$$K = 100 \cdot C_{\Sigma} / (100 - Z_{\text{K}} - S_{\text{K}} - H_{\text{K}} - N_{\text{K}} - O_{\text{K}} - C_{\text{ЛЕТ}}).$$

Количество и состав газов

Общий расход дутья, м³/т: $V_{\text{д}\Sigma} = v_{\text{д}} \cdot C_{\text{Ф}} + v_{\text{Y}} \cdot Y + v_{\text{M}} \cdot M + v_{\text{Г}} \cdot \Gamma.$

Энтальпия дутья, кДж/т: $Q_{\text{д}} = V_{\text{д}\Sigma} \cdot (d_{\text{д}} \cdot t_{\text{д}} - 108,07 \cdot \varphi\%).$

Фурменный газ, м³/т:

$$\text{CO}_{\text{Ф}} = 1,8667 \cdot (C_{\text{Ф}} + \Gamma \cdot (\text{C})^{\Gamma} + Y \cdot C_{\text{Y}} + M \cdot C_{\text{M}});$$

$$H_{\text{Ф}} = 0,01 \cdot V_{\text{д}\Sigma} \cdot \varphi\% + Y \cdot (11,2 \cdot H_{\text{Y}} + 1,244 \cdot H_{2\text{O}_{\text{Y}}}) +$$

$$M \cdot (11,2 \cdot H_{\text{M}} + 1,244 \cdot H_{2\text{O}_{\text{M}}}) + \Gamma \cdot (H_{\Sigma})^{\Gamma};$$

$$N_{\text{Ф}} = V_{\text{д}\Sigma} \cdot (1 - 0,01 \cdot \omega) + Y \cdot 22,4 \cdot N_{\text{Y}} / 28 + M \cdot 22,4 \cdot N_{\text{M}} / 28 + \Gamma \cdot (N_{\Sigma})^{\Gamma};$$

$$V_{\text{Ф}} = \text{CO}_{\text{Ф}} + H_{\text{Ф}} + N_{\text{Ф}}.$$

Шахтный газ, м³/т:

$$\text{CO}_{\text{ШХ}} = \text{CO}_{\text{Ф}} + 1,4 \cdot (O_{\text{d}} + O_{\text{L}}) + 0,018667 \cdot K \cdot C_{\text{ЛЕТ}} + 1,2 \cdot \text{CO}_{2\text{CaO}};$$

$$\text{CO}_{2\text{КАР}} = 0,4 \cdot \text{CO}_{2\text{CaO}} + \text{CO}_{2\text{MgO}} + \text{CO}_{2\text{MnO}} + \text{CO}_{2\text{FeO}};$$

$$H_{\text{ШХ}} = H_{\text{Ф}} + 0,01 \cdot K \cdot H_{\text{K}}; \quad N_{\text{ШХ}} = N_{\text{Ф}} + 0,01 \cdot K \cdot N_{\text{K}}; \quad V_{\text{ШХ}} =$$

$$\text{CO}_{\text{ШХ}} + \text{CO}_{2\text{КАР}} + H_{\text{ШХ}} + N_{\text{ШХ}}.$$

Диоксид углерода и влага восстановления оксидов ($\text{CO}_{2\text{В}}$, $\text{H}_2\text{O}_{\text{В}}$) определяются при заданном значении $\eta_{\text{H/C}} = (0,9 - 1,1)$:

$$\text{CO}_{2\text{В}} = 1,4 \cdot (O_{\text{g}} + O_{\text{SO}_3} + O_{\text{ЛВ}} + O_{\text{MnO}_2} + O_{\text{As}}) / (1 + H_{\text{ШХ}} \cdot \eta_{\text{H/C}} / \text{CO}_{\text{ШХ}}), \text{ м}^3/\text{т};$$

$$\text{H}_2\text{O}_{\text{В}} = 1,4 \cdot (O_{\text{g}} + O_{\text{SO}_3} + O_{\text{ЛВ}} + O_{\text{MnO}_2} + O_{\text{As}}) / (1 + \text{CO}_{\text{ШХ}} / (H_{\text{ШХ}} \cdot \eta_{\text{H/C}})), \text{ м}^3/\text{т}.$$

Доля влаги восстановления ($\delta_{\text{H}_2\text{O}}$) и общая доля водорода (δ_{H_2})

(для подстановки в ранее приведенные формулы):

$$\delta_{\text{H}_2\text{O}} = \text{H}_2\text{O}_{\text{В}} / (\text{H}_2\text{O}_{\text{В}} + \text{CO}_{2\text{В}}); \quad \delta_{\text{H}_2} = H_{\text{Ш}} / (H_{\text{Ш}} + \text{CO}_{\text{Ш}}).$$

Колошниковый газ, м³/т:

$$\text{CO}_{2\text{КГ}} = \text{CO}_{2\text{В}} + \text{CO}_{2\text{КАР}}; \quad \text{CO}_{\text{КГ}} = \text{CO}_{\text{ШХ}} - \text{CO}_{2\text{В}}; \quad \text{H}_{2\text{КГ}} = H_{\text{ШХ}} - \text{H}_2\text{O}_{\text{В}};$$

$$\text{H}_2\text{O}_{\text{КГ}} = \text{H}_2\text{O}_{\text{В}} + 1,2444 \cdot \text{H}_2\text{O}_{\text{Ш}}; \quad N_{\text{КГ}} = N_{\text{ШХ}}.$$

Объем сухого газа: $V_{\text{КГ}} = \text{CO}_{2\text{КГ}} + \text{CO}_{\text{КГ}} + \text{H}_{2\text{КГ}} + N_{\text{КГ}}.$

Состав сухого газа в %:

$$\% \text{CO}_{2\text{КГ}} = 100 \cdot \text{CO}_{2\text{КГ}} / V_{\text{КГ}}; \quad \% \text{CO}_{\text{КГ}} = 100 \cdot \text{CO}_{\text{КГ}} / V_{\text{КГ}};$$

$$\% \text{H}_{2\text{КГ}} = 100 \cdot \text{H}_{2\text{КГ}} / V_{\text{КГ}}; \quad \% \text{N}_{\text{КГ}} = 100 \cdot N_{\text{КГ}} / V_{\text{КГ}}$$

Объем влажного газа: $BV_{\text{КГ}} = \text{CO}_{2\text{КГ}} + \text{CO}_{\text{КГ}} + \text{H}_{2\text{КГ}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{КГ}} + N_{\text{КГ}}.$

Состав влажного газа в %:

$$\%CO_{2КГ} = 100 \cdot CO_{2КГ} / BV_{КГ}; \%CO_{КГ} = 100 \cdot CO_{КГ} / BV_{КГ};$$

$$\%H_{2КГ} = 100 \cdot H_{2КГ} / BV_{КГ}; \%H_2O_{КГ} = 100 \cdot H_2O_{КГ} / BV_{КГ};$$

$$\%N_{КГ} = 100 \cdot N_{КГ} / BV_{КГ}.$$

Теоретическая температура горения

Выделение теплоты у фурм, кДж/т:

$$Q_{\Phi} = (w_c + 2500) \cdot C_{\Phi} + \Gamma \cdot \Sigma q^{\Gamma} + Y \cdot \Sigma q_y + M \cdot \Sigma q_M.$$

Приближенное значение температуры, $^{\circ}C$: $T_X = Q_{\Phi} / (1,5 \cdot V_{\Phi} - 0,092 \cdot H_{\Phi})$.

Теплоемкость газа, кДж/($m^3 \cdot K$): $d_{\Phi} = (0,0126 \cdot (T_X - 1500) \cdot 10^{-3} - 0,10) \cdot H_{\Phi} / V_{\Phi} + (1,465 + 0,067 \cdot (T_X - 1500) \cdot 10^{-3})$.

Температура горения, $^{\circ}C$: $T_{\Gamma} = Q_{\Phi} / (V_{\Phi} \cdot d_{\Phi})$.

В последующих шагах вместо T_X подставляют T_{Γ} из предыдущего шага до получения $\Delta T_{\Gamma} < 0,1$.

В отдельных вариантах значение теоретической температуры задается $T_{ГЗ\Delta Д}$. При этом не задается один из параметров t_d , $\Phi\%$, ω , Γ , Y , M . В этом случае организуется внутренний итерационный цикл:

$$t_d - T_{\Gamma} \text{ или } \Phi\% - T_{\Gamma} \text{ или } \omega - T_{\Gamma} \text{ или } \Gamma - T_{\Gamma} \text{ или } Y - T_{\Gamma} \text{ или } M - T_{\Gamma}.$$

В результате итераций выбирается величина параметра, соответствующего $T_{ГЗ\Delta Д}$ путем минимизации отклонения от него $\Delta T_{n-1} = T_{ГЗ\Delta Д} - T_{\Gamma}$. При этом первые два значения параметра задаются следующими: $t_d - 800$ и 1200 ; $\Phi\% - 1$ и 5 ; $\omega - 21$ и 30 ; Γ , Y , $M - 10$ и 100 . Поиск начинают с третьего шага. Искомая величина параметра (t_d или $\Phi\%$ или ω или Γ или Y или M) определяется по рекуррентному выражению ($n -$ номер шага):

$$P_n = P_{n-1} - \Delta T_{n-1} \cdot (P_{n-2} - P_{n-1}) / (\Delta T_{n-2} - \Delta T_{n-1}).$$

Газодинамические характеристики (для анализируемого периода).

Заданы, $кг/м^3$: $\gamma_R = 1700$; $\gamma_K = 450$; $(\gamma_R) = 3000$; $(\gamma_K) = 1000$ – плотности соответственно массовые и насыпные,

в т.ч. для нижней зоны: $(\gamma_R)^H = 2 \cdot (\gamma_R) / (1,9 - t_M \cdot 10^{-3})$;

для верхней зоны: $(\gamma_R)^B = (2,9 - t_M \cdot 10^{-3}) \cdot (\gamma_R) / (3,8 - 2 \cdot t_M \cdot 10^{-3})$;

для печи в целом: $(\gamma_R)^{\Sigma} = (6,9 - t_M \cdot 10^{-3}) \cdot (\gamma_R) / (7,6 - 4 \cdot t_M \cdot 10^{-3})$.

В этих формулах: 1) в первом шаге $t_M = 900$, далее в итерациях – из предыдущего шага; 2) если $t_M < 900$, то $t_M = 900$.

Вычисляются:

Суммарный расход рудно-флюсовой части шихты:

$$R_{\Sigma} = R_{Fe} + R_{Mn} + I_O + I_d, \text{ кг/т.}$$

Объем массы рудно-флюсовой части шихты и кокса:

$$VR = R_{\Sigma} / \gamma_R; VK = K / \gamma_K;$$

Насыпной объем: $(VR) = R_{\Sigma} / (\gamma_R)$; $(VK) = K / (\gamma_K)$; $m^3/т$ чуг., в т. числе

для нижней зоны: $(VR)^H = R_{\Sigma} / (\gamma_R)^H$;

для верхней зоны: $(VR)^B = R_{\Sigma} / (\gamma_R)^B$;

для печи в целом: $(VR)^{\Sigma} = R_{\Sigma} / (\gamma_R)^{\Sigma}$

Порозность столба (свободный объем) в базовом периоде, m^3/m^3 :

$$\varepsilon = [(VR) + (VK) - VR - VK] / [(VR) + (VK)].$$

Поверхность кусков слоя в базовом периоде, $S, \text{ м}^2/\text{м}^3$ и газопроницаемость G_{Σ} : $S = [6 \cdot VR/f_R + 7 \cdot VK/f_K]/(VR + VK)$. $G_{\Sigma} = G_{B\Sigma} \cdot (\epsilon / \epsilon_B)^3 \cdot (\bar{S}_B / \bar{S})^{1,2}$.
Интенсивность по газу $\text{м}^3/\text{час}$:

$$I_{\Gamma} = (I_{\Gamma} / W_{CP}^0)_B \cdot [G_{B\Sigma} \cdot (2 \cdot p_K + \Delta p + 2) \cdot \Delta p \cdot 1000 / (H - \Delta H_3) \cdot (T_{\Gamma} + t_K + 546) \cdot (\gamma_{CP})^{0,8}]_{0,555}$$

Здесь параметр $(I_{\Gamma} / W_{CP}^0)_B$ рассчитывается по данным базового периода.

Производительность: $\Pi_{СУТ} = 24 \cdot I_{\Gamma} / BV_{КГ}$, т/сутки.

Интенсивность по коксу: $\Pi_{СУТ} \cdot K / V_{\Pi}$, кг/сутки на м^3 объема.

Скорость газов на колошнике, м/сек:

$$W_{К}^0 = BV_{КГ} \cdot \frac{1}{60 \cdot 1131 d_K^2} \cdot \Pi_{СУТ}; \quad W_{К} = W_{К}^0 \cdot \frac{t_K + 273}{(p_K + 1)273};$$

Скорость газов в шахте, м/сек:

$$W_{H}^0 = V_{ШХ} \cdot \frac{\Pi_{СУТ}}{60 \cdot 1131 d_{\Gamma}^2}; \quad W_{H} = W_{H}^0 \cdot \frac{T + 1446}{(p_D + p_K + \Delta p_B + 2) \cdot 273}; \quad \text{причем } p_D =$$

$p_K + \Delta p$.

Средняя скорость газов: $W_{CP}^0 = 0,65 \cdot W_{H}^0 + 0,35 \cdot 0,5(W_{H}^0 + W_{К}^0)$.

Плотность: $\gamma_{\Phi} = 1,25 - 0,357 \frac{H_{\Phi}}{V_{\Phi}}$; $\gamma_K = (1,25 + 0,0071 \cdot \%CO_{2КГ} - 0,01161 \cdot \%H_{2КГ} + 0,008 \cdot \%H_{2O_{КГ}}) / (1 + 0,01 \cdot \%H_{2O_{КГ}})$; $\gamma_{CP} = 0,5(\gamma_{\Phi} + \gamma_K)$.

Газопроницаемость: ($T = T_{\Gamma}$, H – высота печи, ΔH – уровень засыпи, м)

$$\text{общая} - G_{\Sigma} = \frac{W_{CP}^0 \cdot (\gamma_{\Phi} + \gamma_K)^{0,8} \cdot (T + t_K + 546)}{(p_D - p_K) \cdot (p_D + p_K + 2)} \cdot \frac{H - \Delta H_3}{10^3};$$

$$\text{верхняя} - G_B = \frac{[0,5(W_{К}^0 + W_{H}^0)]^{1,8} \cdot (t_K + 1446) \cdot (\gamma_{CP} + \gamma_K)^{0,8}}{\Delta p_B (2p_K + \Delta p_B + 2)} \cdot \frac{H - \Delta H_3}{10^3} \cdot 0,35;$$

$$\text{низа} - G_H = \frac{W_H^0 \cdot (T + 1446)(\gamma_{\Phi} + 0,5(\gamma_{\Phi} + \gamma_{CP}))^{0,8}}{(p_D - p_K - \Delta p_B)(p_D + p_K + \Delta p_B + 2)} \cdot \frac{H - \Delta H_3}{10^3} \cdot 0,65.$$

Время пребывания материалов в печи, час.:

$$\tau_{\Sigma} = 24 \cdot V_{\Pi} / [\Pi_{СУТ} \cdot (VR)^2 + (VK)].$$

Степень прямого восстановления [2] (для анализируемого периода)

$V_A = (CO_{ШХ} + H_{ШХ}) \cdot (CO_{ШХ} + 2 \cdot H_{ШХ}) \cdot \tau_{\Pi} / (V_{КГ} \cdot C_{\Sigma})$; τ_{Σ} – время пребывания материалов в печи, час.; $V_R = CO_{2КГ} + CO_{КГ} + H_{2КГ} + H_{2O_{КГ}}$; $O_{\Sigma R} = [1,4 \cdot (O_{Fe2O3} + O_{SO3} + O_{ЛВ} + O_{As} + O_{MnO2} + O_{ЛЕТ}) + CO_{2Ш} - 0,6 \cdot CO_{2CaO} + 1,2444 \cdot H_2O_{Ш}] / V_R$;
 $r_d = [1 - (0,718 - 0,117 \cdot \delta_{H2} - O_{\Sigma R}) / (B_B / V_A + 0,13 + 0,145 \cdot \delta_{H2} + 1,4 \cdot O_{FeO} / V_R)] \cdot 100$.

Величина B_B берется из базового периода, где она рассчитывается по данным этого периода (при известном значении r_d) по выражениям :

$$\eta_P = 0,718 - 0,117 \cdot \delta_{H2} - (1 - 0,01 \cdot r_d) \cdot (0,13 + 0,145 \cdot \delta_{H2});$$

$$\eta_D = [1,4 \cdot O_{FeO} \cdot (1 - 0,01 \cdot r_d) + 1,4 \cdot (O_{Fe2O3} + O_{SO3} + O_{ЛВ} + O_{As} + O_{MnO2} + O_{ЛЕТ}) + CO_{2Ш} - 0,6 \cdot CO_{2CaO} + 1,2444 \cdot H_2O_{Ш}] / V_R;$$

$$B_B = (CO_{ШХ} + H_{ШХ}) \cdot (CO_{ШХ} + 2 \cdot H_{ШХ}) \cdot \tau_{\Pi} \cdot (\eta_P - \eta_D) / ((1 - 0,01 \cdot r_d) \cdot V_{КГ} \cdot C_{\Sigma}).$$

Характеристики теплопередачи [2] (для анализируемого периода)

$$t_{\text{ПП}} = (1000 \cdot t_{\text{чгр}} + \text{Ш} \cdot t_{\text{Ш}}) / (1000 + \text{Ш});$$

$$X = V_{\text{ШХ}} \cdot (T_{\Gamma} - \Delta t) + t_{\text{ПП}} \cdot (V_{\text{ШХ}} - 1,2 \cdot (R_{\Sigma} + K));$$

$$Y = (4 \cdot V_{\text{ШХ}} - 2,4 \cdot (R_{\Sigma} + K)) \cdot [V_{\text{ШХ}} \cdot (T_{\Gamma} - \Delta t) \cdot t_{3\text{AG}} + (t_{\text{ПП}})^2 \cdot (V_{\text{ШХ}} - 0,6 \cdot (R_{\Sigma} + K)) - V_{\text{ШХ}} \cdot t_{\text{ПП}} \cdot t_{3\text{AG}}].$$

В первом шаге $\Delta t = 50$, затем подставляется полученное значение (далее).

Температуры материалов и газов на границе зон, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_{\text{M}} = [X + (X^2 - Y)^{0,5}] / (2 \cdot V_{\text{ШХ}} - 1,2 \cdot (R_{\Sigma} + K));$$

$$t_{\Gamma} = t_{\text{M}} + \Delta t \text{ (предварительно, далее считается).}$$

Теплоемкость материалов в нижней зоне, ккал/(т·К):

$$E_{\text{H}} = 0,35 \cdot (T_{\Gamma} - t_{\text{M}} - \Delta t) \cdot V_{\text{ШХ}} / (t_{\text{ПП}} - t_{\text{M}}).$$

Теплоемкость материалов в верхней зоне, ккал/(т·К):

$$E_{\text{B}} = 0,21 \cdot (R_{\Sigma} + K) + 0,5 \cdot (E_{\text{H}} - 0,21 \cdot (R_{\Sigma} + K)) \cdot (t_{\text{M}} - t_{3\text{AG}}) / (t_{\text{ПП}} - t_{3\text{AG}}).$$

Отношение теплоемкостей шихты и газа:

$$m_{\text{H}} = E_{\text{H}} / (0,35 \cdot V_{\text{ШХ}}); \quad m_{\text{B}} = E_{\text{B}} / (0,35 \cdot V_{\text{ШХ}}).$$

Константы теплопередачи, ккал/(м³· $^{\circ}\text{C}$ ·сек):

$$\alpha_{\text{B}} = (t_{\Gamma} + t_{\text{K}}) / 4000; \quad \alpha_{\text{H}} = (T_{\Gamma} + t_{\Gamma}) / 8000.$$

Время пребывания материалов в нижней зоне, сек.:

$$\tau_{\text{H}} = E_{\text{H}} \cdot \ln(\Delta t / (T_{\Gamma} - t_{\text{ПП}})) / [\alpha_{\text{H}} \cdot (1 - m_{\text{H}}) \cdot ((VR)^{\text{H}} + (VK))].$$

Время пребывания материалов в верхней зоне, сек.: $\tau_{\text{B}} = 3600 \cdot \tau_{\Sigma} - \tau_{\text{H}}$.

Разность температур газа и шихты в пограничной зоне:

$$\Delta t = (1 - m_{\text{B}}) \cdot (t_{\text{M}} - t_{3\text{AG}}) / \{ \exp [\alpha_{\text{B}} \cdot (1 - m_{\text{B}}) \cdot ((VR)^{\text{B}} + (VK)) \cdot \tau_{\text{B}} / E_{\text{B}}] - 1 \}.$$

Температура газа в пограничной зоне, $^{\circ}\text{C}$: $t_{\Gamma} = t_{\text{M}} + \Delta t$.

Температура колошникового газа, $^{\circ}\text{C}$: $t_{\text{K}} = t_{\Gamma} - (t_{\text{M}} - t_{3\text{AG}}) \cdot m_{\text{B}}$.

Итерационная процедура выполняется для модуля (Б) путем задания всех исходных данных, включая начальные значения (первый шаг) r_{d} , Δt , t_{M} и др. Затем расчет повторяется с последующей подстановкой полученных результатов вместо заданных r_{d} , Δt , t_{M} . Повторение производится до получения разницы Δt в предыдущем и следующем шагах менее 0,1. После отладки программы указанный итерационный процесс соединяется с процессом часть А – часть Б. Окончание процесса – по тому же критерию Δt .

Методика реализована в визуальной среде программирования Delphi для операционной системы Windows. Исходные данные хранятся в базе данных, а расчеты и анализ результатов производятся в MS Excel. Разработанная система может использоваться для многовариантных расчетов с целью анализа и прогноза показателей доменной плавки в различных условиях.

1. *Товаровский И.Г.* Проблемы расчетного анализа реальной технологии доменной плавки//Черные металлы (перевод Stahl und Eisen), окт. 2003.–С.16–23.
2. *Товаровский И.Г.* Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. – Днепропетровск: «Пороги». – 2003. – 596 с.

Статья рекомендована к печати к.т.н. Н.Г.Можаренко