

УДК 669.162.263.23.004.67

Семакова В.Б.¹, Семаков В.В.²

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ
РАСХОДА КОКСА ПРИ УЛУЧШЕНИИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ
ГАЗОВОГО ПОТОКА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

В статье рассмотрена упрощенная математическая модель для расчета минимального расхода кокса. Определено изменение расхода кокса по мере достижения печными газами равновесного состава.

Ключевые слова: расход кокса, степень использования газа, степень прямого восстановления, критерий полноты косвенного восстановления.

Семакова В.Б., Семаков В.В. Аналітичне дослідження можливості зниження витрати коксу при поліпшенні відновної роботи газового потоку в доменній печі. У статті розглянуто спрощена математична модель, щодо розрахунку мінімальної витрати коксу. Визначено зміна витрати коксу в міру досягнення пічними газами рівноважного складу.

Ключові слова: витрата коксу, ступінь використання газу, ступінь прямого відновлення, критерій повноти непрямого відновлення.

V.B. Semakova, V.V. Semakov. Analytical research of decrease coke consumption possibility at improvement of gas stream reduction work in the blast furnaces. In the article the simplified mathematical model for the evaluation of minimum coke consumption is considered. Difference of coke consumption was determined after the stove gases had reached balance composition.

Key words: coke consumption, degree of the gas use, degree of direct reduction, criterion of indirect reduction plenitude.

Постановка проблемы. Восстановительная работа газового потока в печи является одним из факторов, определяющих удельный расход кокса доменной плавки. Минимальный теоретически возможный расход кокса K_{min} соответствует максимальной равновесной степени использования газового потока η_{wmax} в печи. Определение K_{min} и η_{wmax} является сложной вычислительной задачей, решаемой при помощи ЭВМ и требующей разработки математической модели, позволяющей прогнозировать изменение показателей доменной плавки по мере приближения состава печных газов к равновесному.

Анализ последних исследований и публикаций. В конце 19 столетия акад. М.А. Павлов показал, что расход кокса в доменной плавке определяется не только затратами его на покрытие тепловых потребностей процесса, но и на образование восстановительного газа СО, следовательно минимальный расход кокса будет достигаться при некотором соотношении реакций косвенного и прямого восстановления в печи. Расчет минимально возможного расхода кокса на доменную плавку, основанный на идее акад. М.А. Павлова о дифференциации функций углеорода кокса как источника тепла и восстановителя, проводился многими учеными: А.Н. Раммом, А. Ристом, А.П. Любаном, В.Н. Андроновым, И.Г. Товаровским и др. [1–5], которые внесли в него дополнения: условия равновесия химических реакций, применение зональных тепловых балансов и т. д. Проведение корректного расчета K_{min} затруднено неизбежными допущениями при учете множества факторов и многообразием функций кокса в доменной печи. Полученные разными авторами значения минимального расхода кокса в различных условиях плавки изменяются в широких пределах 200–500 кг/т чугуна.

Цель статьи – разработка упрощенной математической модели доменной плавки, позволяющей прогнозировать изменение показателей работы доменных печей в конкретных технологических условиях по мере достижения печным газом равновесного состава, для определения резервов снижения удельного расхода кокса.

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² магистрант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

Изложение основного материала. Упрощенная математическая модель определения показателей доменной плавки основана на решении системы двух уравнений: расхода «кокса-источника тепла» K_m и «кокса-источника восстановителя» K_g . Потребность в «коксе-источнике тепла» рассчитывалась по уравнению теплового баланса [1, 6, 7]. Приход тепла учитывался по следующим статьям:

- 1) тепло доокисления монооксида углерода в диоксид углерода

$$q_{CO_2} = 12690V_{CO_2}, \text{ кДж}, \quad (1)$$

где 12690 – тепло, выделяющееся при горении CO в CO_2 , кДж/м³;

$V_{CO_2} = V_i^\Sigma - V_i^H$ – объём CO_2 , образовавшегося в результате реакций косвенного восстановления, м³/т чугуна;;

$V_i^\Sigma = O_{ш}^{Fe_2O_3} + r_i O_{ш}^{FeO}$ – суммарный объём продуктов реакций косвенного восстановления Fe_2O_3 и FeO железорудной части шихты, м³/т чугуна;

r_i – степень косвенного восстановления по М.А. Павлову, д. ед.;

$O_{ш}^{Fe_2O_3}$ – объём атомарного кислорода, отнимаемого от Fe_2O_3 шихты при восстановлении до FeO , м³/т чугуна:

$$O_{ш}^{Fe_2O_3} = 22,4P_{ру} \frac{C_{Fe_2O_3}}{160}, \quad (2)$$

$P_{ру}$ – расход железорудной шихты, кг/т чугуна;

$C_{Fe_2O_3}$ и C_{FeO} – содержание Fe_2O_3 и FeO в железорудной шихте, д. ед.;

$O_{ш}^{FeO}$ – объём атомарного кислорода FeO шихты, в том числе полученного при восстановлении высших оксидов, м³/т чугуна:

$$O_{ш}^{FeO} = 22,4P_{ру} \left(\frac{2C_{Fe_2O_3}}{160} + \frac{C_{FeO}}{72} \right), \quad (3)$$

где $V_i^H = 2\eta_H S_{nz}$ – объём H_2O , образовавшегося в результате реакций косвенного восстановления, м³ (поступление водорода с коксом и влагой дутья не учитывалось);

η_H – степень использования H_2 в реакциях косвенного восстановления, д. ед.;

S_{nz} – расход природного газа, м³/т чугуна;

- 2) тепло окисления углерода кокса до CO:

$$q_{CO} = 5250 \frac{22,4}{12} V_{C_k}, \text{ кДж}, \quad (4)$$

где 5250 – тепло, выделяющееся при окислении C в CO, кДж/м³;

V_{C_k} – объём газифицированного кислородом углерода кокса, м³/т чугуна:

$$V_{C_k} = \frac{22,4}{12} (C_k K - 1000 C_u); \quad (5)$$

C_k и C_u – содержание углерода в коксе и чугуне соответственно, д. ед.;

K – удельный расход кокса, кг/т чугуна;

- 3) тепло окисления водорода в реакциях косвенного восстановления железа

$$q_H = 10806 \cdot V_i^H, \text{ кДж}, \quad (6)$$

где 10806 кДж/м³ – тепло, выделяющееся при горении 1 м³ H_2 ;

- 4) тепло сгорания природного газа с образованием CO и H_2 при условии, что природный газ состоит исключительно из CH_4 : $q_{nz} = 1590 \cdot S_{nz}, \text{ кДж}; \quad (7)$

где 1590 кДж/м³ – тепло, выделяющееся при горении 1 м³ CH_4 до CO и H_2 ;

- 5) тепло, вносимое дутьем:

$$q_{\delta} = c_{\delta} T_{\delta} V_{\delta}, \text{ кДж}, \quad (8)$$

где c_{δ} и T_{δ} – теплоемкость, кДж/(м³·К), и температура дутья, °С;

$$V_{\delta} - \text{объём дутья, м}^3/\text{т чугуна}; \quad V_{\delta} = \frac{V_{C_{\phi}}}{2\omega}, \quad (9)$$

ω – содержание кислорода в дутье, д. ед.;

$V_{C_{\phi}}$ – объём газифицированного кислородом дутья углерода у фурм, м³/т чугуна:

$$V_{C_{\phi}} = V_{C_k} + S_{n_2} - V_{C_d}; \quad V_{C_d} = (1 - r_i) O_{u}^{FeO}; \quad (10)$$

V_{C_d} – объём газифицированного углерода кокса при прямом восстановлении вюстита, м³/т чугуна;

б) тепло, вносимое шихтой: $q_{ш} = c_{ру} P_{ру} T_{ру} + c_u P_u T_u + c_k K T_k, \text{ кДж}, \quad (11)$

где $c_{ру}$, c_u , c_k – теплоемкость, кДж/(кг·К), рудной шихты, известняка и кокса при температуре их загрузки в доменную печь $T_{ру}$, T_u и T_k , °С, соответственно;

P_u – расход известняка, кг/т чугуна.

Расход тепла учитывался по следующим статьям:

1) расход тепла на диссоциацию оксидов железа:

$$q_{Fe} = P_{ру} (5154 C_{Fe_2O_3} + 4076 C_{FeO}), \text{ кДж}, \quad (12)$$

где 5154 и 4076 – теплота диссоциации Fe₂O₃ и FeO, кДж/кг;

и прочих соединений:

$$q_{np} = 31079 m_{Si_ч} + 7892 m_{Mn_ч} + 35755 m_{P_ч}, \text{ кДж}; \quad (13)$$

где 31079; 7892; 35755 – тепло разложения SiO₂, кДж/кг Si; силиката марганца и MnO, кДж/кг Mn; P₂O₅, кДж/кг P;

$m_{Si_ч}$, $m_{Mn_ч}$, $m_{P_ч}$ – масса соответственно кремния, марганца и фосфора в 1 т чугуна, кг;

2) расход тепла на диссоциацию карбоната кальция: $q_u = 4074 C_{CO_2} P_u, \text{ кДж}, \quad (14)$

где 4074 – теплота диссоциации CaCO₃ → CaO + CO₂, кДж/кг CO₂ [11];

C_{CO_2} – потери при прокаливании известняка, д. ед.;

3) тепло, уносимое чугуном: $q_ч = c_ч T_ч m_ч, \text{ кДж}, \quad (15)$

где $c_ч$, $T_ч$ и $m_ч$ – теплоемкость, кДж/(кг·К), температура, °С, и масса чугуна $m_ч = 1000$ кг;

4) тепло, уносимое шлаком $q_{шл} = c_{шл} T_{шл} B_{шл}, \text{ кДж}, \quad (16)$

где $c_{шл}$, $T_{шл}$ и $B_{шл}$ – теплоемкость, кДж/(кг·К), температура, °С, и выход шлака, кг/т чугуна; при работе на подготовленном железорудном сырье приближенно можно оценить как

$$B_{шл} = (1 - C_{Fe_2O_3} - C_{FeO}) P_{ру} + A_k K + (1 - C_{CO_2}) P_u, \quad (17)$$

где A_k – зола кокса, д. ед.;

5) тепло, уносимое колошниковым газом: $q_{кз} = c_{кз} T_{кз} V_{кз}, \text{ кДж}, \quad (18)$

где $c_{кз}$, $T_{кз}$ и $V_{кз}$ – теплоемкость, кДж/(м³·К), температура, °С, и выход колошникового газа, м³/т чугуна:

$$V_{кз} = (1 - \omega) V_{\delta} + (3 - 2\eta_H) S_{n_2} + V_{C_k} + \frac{22,4}{44} C_{CO_2} P_u; \quad (19)$$

б) тепло, уносимое влагой колошникового газа: $q_{w_{кз}} = c_{w_{кз}} T_{кз} V_{w_{кз}}, \text{ кДж}, \quad (20)$

где $c_{w_{кз}}$ – теплоемкость, кДж/(м³·К),

$V_{w_{кз}} \approx V_i^H$ – объём влаги колошникового газа, м³/т чугуна.

Уравнение потребности в газе-восстановителе, образующемся при газификации кокса и природного газа, для восстановления FeO представляется также в общем виде:

$$V_{зв} = \frac{r_i}{\eta_{\phi}} O_{и}^{FeO}, \text{ м}^3, \quad (21)$$

где $V_{зв}$ – объём газа-восстановителя, образующегося в доменной печи, м³/т чугуна;

$$V_{зв} = 3S_{nз} + V_{Cк} + \frac{22,4}{44} C_{CO_2} P_u \cdot \eta_u, \quad (22)$$

η_u – коэффициент участия CO_2 флюса в реакции $C+CO_2=2CO$, д. ед.;

η_{ϕ} – фактическая степень использования газа по реакции $FeO+CO(H_2)=Fe+CO_2(H_2O)$, д. ед.

$$\begin{cases} \text{ДП № 2} \\ K_m = 838,1 - 497,4r_i, \\ K_{\phi} = 239,5 \frac{r_i}{\eta_{\phi}} - 164,6; \end{cases} \begin{cases} \text{ДП № 3} \\ K_m = 906,9 - 537,0r_i, \\ K_{\phi} = 248,1 \frac{r_i}{\eta_{\phi}} - 142,8; \end{cases} \begin{cases} \text{ДП № 4} \\ K_m = 852,6 - 522,5r_i, \\ K_{\phi} = 245,5 \frac{r_i}{\eta_{\phi}} - 145,1; \end{cases} \begin{cases} \text{ДП № 6} \\ K_m = 821,0 - 519,5r_i, \\ K_{\phi} = 245,1 \frac{r_i}{\eta_{\phi}} - 173,1. \end{cases} \quad (23)$$

Для технологических режимов работы доменных печей МК «Азовсталь» в 2007 г. (таблица) получены системы уравнений, которые решались относительно двух неизвестных удельного расхода кокса K и степени косвенного восстановления r_i при условии равенства $K_m=K_{\phi}$:

Таблица

Показатели работы доменных печей МК «Азовсталь» в 2007 г.

Показатель	ДП-2	ДП-3	ДП-4	ДП-6
Расход кокса, кг/т чугуна	499,4	541,7	531,9	487,4
Содержание железа в шихте Fe , %	58,61	58,46	58,81	59,03
Доля окатышей в шихте O , %	66,53	66,33	71,44	65,47
Расход природного газа $P_{nз}$, м ³ /т чугуна	112,3	100,7	102,8	119,1
Температура дутья T_d , °С	1129	965	1019	1102
Содержание O_2 в дутье, %	23,99	25,11	24,29	25,47
Тепловые потери Q , %	12,6	11,8	10,5	8,4
Фактическая степень использования газа η_{ϕ} , %	25,43	25,56	23,82	25,22
Степень прямого восстановления r_d , %	30,18	30,31	35,86	33,34
Минимальная степень прямого восстановления $r_{d\min}$, %	16,8	17,71	20,23	19,87
Критерий полноты косвенного восстановления K_{r_i} , %	83,92	84,68	80,41	83,19
Минимальный расход кокса K_{\min} , кг/т чугуна	424,2	465,04	436,06	404,69
Показатель идеальности плавки ξ	0,849	0,830	0,820	0,858

В интервале изменения фактической степени использования газа η_{ϕ} , при помощи ЭВМ находили решение систем двух уравнений (23) и соответствующие им показатели доменной плавки. По мере улучшения восстановительной работы газового потока повышалась равновесная степень его использования η_w (рис. 1,а) за счет уменьшения удельного выхода газа (рис. 1,б) и повышения в нем концентрации восстановителей. При этом наблюдалось снижение удельного расхода кокса K (рис. 1,в) и степени прямого восстановления $r_d = 1 - r_i$ (рис. 1,г). При достижении печным газом равновесного состава выполнялось условие $\eta_{\phi} = \eta_{w\max}$ и определялись минимально возможные K_{\min} и $r_{d\min}$ (табл. 1), позволяющие рассчитать показатель идеальности плавки $\xi = K_{\min}/K$ [5] и критерий полноты косвенного восстановления $K_{r_i} = r_i / (1 - r_{d\min})$, который характеризует степень приближения доли восстановленных газами оксидов к максимальной теоретически возможной степени косвенного восстановления.

Для всех печей значения K_{r_i} практически совпадают ($\Delta K_{r_i} \leq 0,0061$ д. ед.) при равной фактической степени использования газа и принадлежат одной кривой (рисунок, г), что позво-

ляет сравнивать восстановительную работу газового потока в разных печах либо одной – при различных технологических режимах. Наиболее полно косвенное восстановление протекало в печи № 3: $K_{r_i}=84,68\%$ при содержании окатышей в железорудной шихте $O=66,33\%$, наименее полно – в печи № 4: $K_{r_i}=80,41\%$ при максимальном $O=71,44\%$. Значения ξ , характеризующие степень приближения расхода кокса к минимальному, также близки при большей погрешности ($\Delta\xi \leq 0,0207$ д. ед.) и принадлежат прямым, практически сливающимся в одну прямую (рисунок, г).

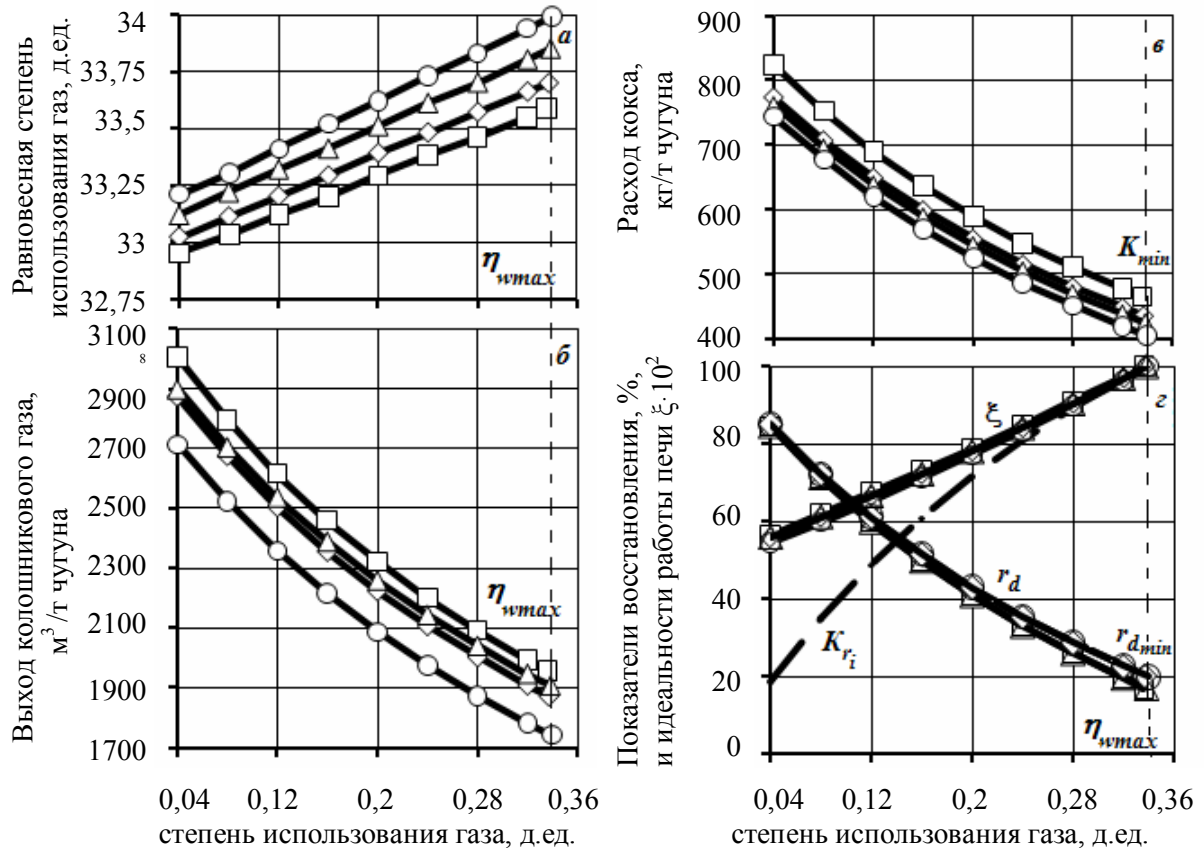


Рисунок – Изменение показателей доменной плавки по мере приближения $\eta_{\phi} \rightarrow \eta_{wmax}$ в печах МК «Азовсталь»: № 2 (Δ), № 3 (\square), № 4 (\diamond), № 6 (\circ)

Наименьший показатель идеальности $\xi=0,820$ также соответствует работе печи № 4 с наименьшей фактической степенью использования газа $\eta_{\phi}=23,82\%$ при относительно невысоких температуре дутья $T_o=1019\text{ }^\circ\text{C}$ и расходе природного газа $P_{nz}=102,8\text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; наибольший показатель идеальности $\xi=0,858$ достигнут на печи № 6, работавшей с минимальными $Q=8,4\%$ и высокой $T_o=1102\text{ }^\circ\text{C}$ при максимальных $O_2=25,47\%$, $Fe=59,03\%$, $P_{nz}=119,1\text{ м}^3/\text{т}$ чугуна. Показатель идеальности печей МК «Азовсталь» не достигает $0,90-0,95$ [5], что свидетельствует о существующем резерве снижения расхода кокса.

Выводы

1. Разработанная упрощенная математическая модель позволяет оценить изменение показателей доменной плавки по мере улучшения восстановительной работы газового потока и определить минимальные расход кокса и степень прямого восстановления при достижении максимальной равновесной степени использования газа.
2. В дальнейшем разработанную модель необходимо совершенствовать с целью изучения возможности снижения расхода кокса при применении различных факторов интенсификации доменного процесса.

Список использованных источников:

1. Рамм А.Н. Современный доменный процесс/ А.Н. Рамм. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.

2. Металлургия чугуна / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев [и др.] // Под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: Академкнига, 2004. – 774 с.
3. Кузнецов А.М. Использование восстановительной способности газов и развитие прямого восстановления железа в ходе совершенствования параметров доменной плавки / А.М. Кузнецов, И.Г. Товаровский, В.И. Большаков // *Металл и литье Украины*. – 2004. – № 11. – С. 6-10.
4. Любан А.П. Анализ явлений доменного процесса / А.П. Любан. – М., 1962. – 535 с.
5. Андронов В.П. Минимально возможный расход кокса и влияние на него различных факторов доменной плавки / В.П. Андронов. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГТУ, 2001. – 142 с.
6. Товаровский И.Г. Эволюция доменной плавки / И.Г. Товаровский, В.П. Лялюк. – Днепропетровск: Пороги, 2001. – 424 с.
7. Вегман Е.Ф. Краткий справочник доменщика / Е.Ф. Вегман. – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.

Рецензент: В.П. Тарасов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 01.02.2011

УДК 669.16.002.68

Маслов В.А.¹, Дубовкина М.Ю.², Хлестова О.А.³

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЧУГУНА С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДА УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

В статье рассмотрены условия и источники образования графитовой спелы. Предложено использование математических моделей снижения температуры чугуна с целью определения выхода углеродсодержащих отходов.

Ключевые слова: графитовая спель, температура чугуна, математическая модель, углеродсодержащие отходы, ресурсосбережение.

Маслов В.О., Дубовкіна М.Ю., Хлестова О.А. Використання математичних моделей зниження температури чавуну з метою визначення вуглецьвмісних відходів. У статті розглянуто теоретичні основи і дано аналіз утворення графітової спелі. Запропоновані методи визначення ділянок з максимальною кількістю вуглецьвмісних відходів.

Ключові слова: графітова спель, температура чавуну, математична модель, утилізація, вуглецьвмісні відходи, ресурсозбереження.

V.A. Maslov, M.Y. Dubovkina, O.A. Khlestova. Usage of mathematical models for decreasing of pig iron temperature to detect carbonaceous wastes yield. In the article theoretical principles and analysis of graphite spill origination have been considered. It also proposes methods to determine segments with maximum percentage of carbonaceous wastes for their further utilization.

Key words: graphite spill, pig iron temperature, utilization, carbonaceous wastes, resource-savin.

Постановка проблемы. Задача управления отходами как источниками ценного сырья для самой металлургии и других отраслей народного хозяйства включает исследование источников образования, механизмов отходообразующих процессов, качественной и количественной оценки состава отходов.

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² канд. техн. наук, ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь