

УДК 669.162.26:536.24

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ СОСТОЯНИЕМ ВЕРХА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ В ПЕРИФЕРИЙНОЙ ОБЛАСТИ

Загайнов С.А.¹, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Металлургия железа и сплавов» (zagainovsky@mail.ru)

Филатов С.В.², управляющий директор (filatov_sv@nlmk.ru)

Гилева Л.Ю.¹, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия железа и сплавов» (ly.gileva@gmail.com)

Лозович А.В.¹, аспирант кафедры «Металлургия железа и сплавов» (al.lozovich@gmail.com)

Джимо С.О.¹, аспирант кафедры «Металлургия железа и сплавов» (smaila20002001@yahoo.co.uk)

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира 19)

² ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК)

(398004, Россия, Липецк, площадь Металлургов 2)

Аннотация. Известно, что повышенное содержание FeO понижает температуру начала плавления первичных шлаков, что препятствует образованию устойчивого гарнисажа, в результате чего повышаются тепловые нагрузки на холодильники распара и заплечиков, а это сопровождается повышением тепловых потерь. Содержание FeO в первичных шлаках определяется развитием реакций косвенного восстановления. Целью выполненного исследования являлась оценка путей, способствующих снижению тепловых нагрузок на холодильники распара и заплечиков. Уменьшение температуры газов в периферийной зоне печи сопровождается изменением степени косвенного восстановления. Этот факт позволяет рассматривать температуру периферии как индикатор развития косвенного восстановления. Разработанная модель расчета температуры газа и его восстановительной работы в периферийной зоне доменной печи может быть использована для оптимизации теплового состояния шахты печи в ее периферийной зоне.

Ключевые слова: доменная печь, периферийная зона, теплообмен, косвенное восстановление, рудная нагрузка, гранулометрический состав.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-6-371-377

Известно, что повышенное содержание монооксида железа понижает температуру начала плавления первичных шлаков [1, 2], препятствующих образованию устойчивого гарнисажа, в результате чего повышаются тепловые нагрузки на холодильники распара и заплечиков, что сопровождается повышением потерь тепла. Анализ диаграмм состояния шлаковых систем, содержащих FeO [3], показал, что при содержании FeO в первичных шлаках более 20 % температура начала плавления не превышает 1200 °С.

Развитие реакции косвенного восстановления, определяющего содержание FeO в первичных шлаках, во многом зависит от гранулометрического состава железорудных материалов и рудной нагрузки в периферийной зоне доменной печи. В свою очередь, эти параметры определяют газопроницаемость слоя, скорость восстановления и высоту зоны косвенного восстановления.

Целью настоящей работы является оценка путей, способствующих снижению тепловых нагрузок на холодильники распара и заплечиков.

На основе закономерностей теплообмена и газодинамики [3 – 9] разработана математическая модель оценки влияния рудной нагрузки и гранулометрическо-

го состава шихты на развитие процессов восстановительной работы газового потока в периферийной зоне доменной печи.

Расчет изменения степени косвенного восстановления при увеличении количества газа-восстановителя производится линеаризованному уравнению:

$$\Delta R_i = \frac{CO_{\Sigma} \eta_{CO} + H_{\Sigma} \eta_{H_2}}{2P\delta} \Delta V_r + \frac{V_r (CO_{\Sigma} \Delta \eta_{CO} + H_{\Sigma} \Delta \eta_{H_2})}{2P\delta}, \quad (1)$$

где η_{CO} и η_{H_2} – степень использования CO и H₂ соответственно; CO_Σ – суммарное содержание CO и CO₂ в газе, м³/м³; H_Σ – суммарное содержание H₂ и H₂O в газе, м³/м³; V_r – выход газа в единицу времени; P – производительность доменной печи, т/ч; δ – удельное количество газифицированного кислорода на 1 т чугуна, м³/т.

Изменение количества газов рассчитывается по уравнению [4]

$$\Delta P = \lambda \frac{h}{d_3} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{T}{T_0} \frac{p_0}{p} \frac{\rho_0 w_0^2}{2}, \quad (2)$$

в котором λ – коэффициент сопротивления; d₃ – эквивалентный диаметр кусков шихты, м; ε – порозность, м³;

T – температура, К; p – давление, Па; ρ_0 – плотность газа, кг/м³; w_0 – скорость газового потока при нормальных условиях.

В качестве показателя удельного газодинамического сопротивления слоя предлагается использовать ту часть уравнения Эргона, которая учитывает диаметр кусков и порозность слоя:

$$\Delta P_{ш} = \frac{1}{d_3} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3}. \quad (3)$$

Для расчета порозности слоя использовалось уравнение [10]

$$\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_k)g_k - \sum (1 - \varepsilon_i)g_i \left[1,582 - 2,416 \left(\frac{d_i}{d_k} \right) + 1,485 \left(\frac{d_i}{d_k} \right)^2 + 0,18 \left(\frac{g_k}{g_i} \right) - 0,015 \left(\frac{g_k}{g_i} \right)^2 \right]; \quad (4)$$

здесь ε_k и ε_i – порозность крупной и i -ой фракции; g_k и g_i – содержание крупной и i -ой фракции; d_k и d_i – диаметр кусков крупной и i -ой фракции.

Эквивалентный диаметр рассчитывался по уравнению

$$d_3 = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{d_i}}. \quad (5)$$

При условии сохранения перепада давления при изменении гранулометрического состава имеем

$$\frac{V_r^*}{V_r} = \sqrt{\frac{d_3^* (1 - \varepsilon^*) \varepsilon^3}{d_3 (1 - \varepsilon) \varepsilon^{3*}}}. \quad (6)$$

Скорость восстановления куска зависит от его размеров. Реакция восстановления протекает на поверхности куска, поэтому скорость реакции пропорциональна площади этой поверхности [11]:

$$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta \tau} = 4\pi r_0 (r_0 - Fr_0)^2 \left(\frac{\Delta f}{\Delta \tau} \right) \rho_k; \quad (7)$$

здесь r_0 – начальный радиус куска; F – степень восстановления; ρ_k – плотность куска.

В качестве рабочей гипотезы принято, что оценка влияния гранулометрического состава железорудных материалов на скорость восстановления может быть описана моделью сжимающегося ядра [11]:

$$\frac{\Delta \varphi}{\Delta \tau} = \frac{k}{r_0 \rho_k}, \quad (8)$$

где $\Delta \varphi / \Delta t$ – увеличение степени восстановления за единицу времени; k – константа скорости реакции, зависящая от температуры, давления и состава газавосстановителя.

По данным о работе доменной печи № 4 ОАО «НЛМК» выполнен анализ влияния фракционного состава при выводе из шихты кусков фракции более 40 мм и фракции менее 5 мм на показатели слоя. Результаты представлены на рис. 1.

Полученные графики показывают, что уменьшение содержания фракции более 40 мм на 1 % увеличивает скорость восстановления на 2 % и количество газа на 6 %. В свою очередь уменьшение количества фракции менее 5 мм на 1 % снижает скорость восстановления на 9 % и количество газа на 10 %.

Изменение количества газов можно реализовать за счет снижения рудной нагрузки.

Результаты моделирования параметров гранулометрического состава представлены ниже:

Значение	Фракционный состав, %					$\Delta P_{ш}$	$\Delta \varphi / \Delta t$
	5 – 10	10 – 25	25 – 40	>40	<5		
Min	4,00	41,5	31,10	22,00	1,40	234	945
Max	35,90	36,9	6,90	8,80	11,50	1811	5014
Среднее	22,04	45,0	14,87	12,77	5,32	842	2732
Оптим.	< 20	≥ 40	≥ 17	< 6	< 6	< 900	≥ 2000

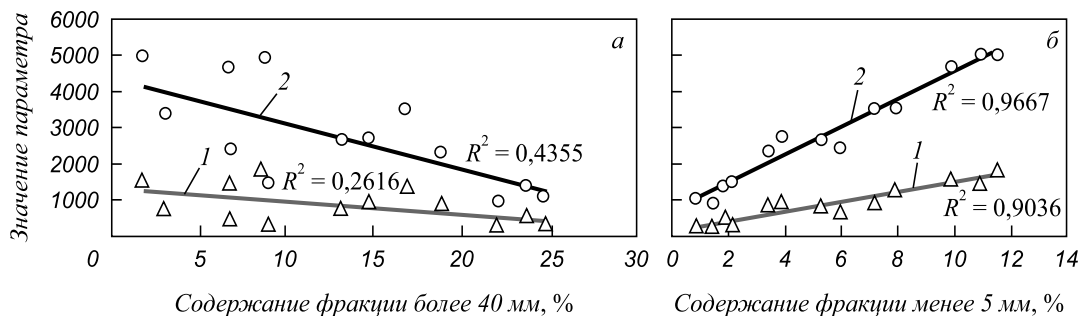


Рис. 1. Влияние содержания фракции более 40 мм (а) и менее 5 мм (б) на параметры слоя шихтовых материалов: 1 – удельное газодинамическое сопротивление; 2 – скорость восстановления

Fig. 1. Influence of content of fraction of more than 40 mm (a) and less than 5 mm (b) on the parameters of charge material layer: 1 – specific gas-dynamic resistance; 2 – recovery rate

Из математической модели восстановления куска следует, что наилучшее восстановление наблюдается для слоя кусков малого диаметра. Это входит в противоречие с газодинамикой процесса.

Порозность определяется рудной нагрузкой:

$$\varepsilon = \frac{P_n \frac{\varepsilon_a}{\rho_a} + \frac{\varepsilon_k}{\rho_k}}{P_n \frac{1}{\rho_a} + \frac{1}{\rho_k}}, \quad (9)$$

где ε_a и ε_k – порозность агломерата и кокса; ρ_a и ρ_k – насыпные массы агломерата и кокса.

Результаты влияния рудной нагрузки на степень косвенного восстановления представлены на рис. 2.

Влияние изменения рудной нагрузки на степень косвенного восстановления в большей степени проявляется при использовании агломерата меньшего размера.

Влияние времени восстановления на отклонение концентрации продуктов реакции от равновесной выражается через скорость реакции [6]:

$$v = \frac{dx}{d\tau} = k(x - x_p), \quad (10)$$

где v – скорость химической реакции моль/(л·с); x – концентрация вещества, моль/л; x_p – равновесная концентрация, моль/л; τ – время, с; k – константа скорости реакции, с⁻¹.

Интегрирование этого выражения позволяет получить зависимость отклонения концентрации вещества относительно равновесной от времени протекания реакции:

$$\int_{x_p}^x \frac{dx}{x - x_p} = k \int_0^{\tau} d\tau; \quad (11)$$

$$\ln(x - x_p) = k\tau, \quad (12)$$

или

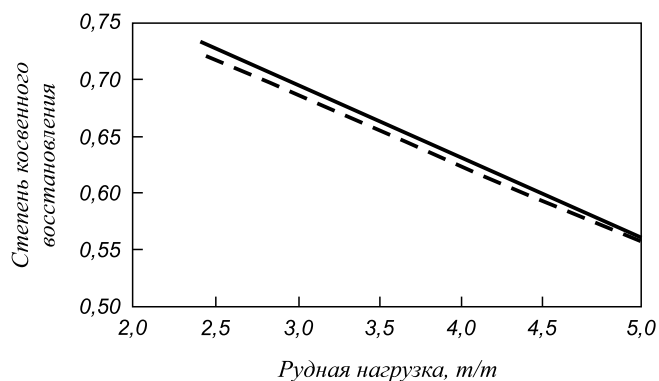


Рис. 2. Влияние рудной нагрузки на степень косвенного восстановления при порозности $\varepsilon = 0,3$ (---) и $\varepsilon = 0,4$ (—)

Fig. 2. Influence of ore burden on the degree of gaseous reduction at the fractional void volume of $\varepsilon = 0.3$ (---) and $\varepsilon = 0.4$ (—)

$$x - x_p = e^{k\tau}. \quad (13)$$

Учитывая, что k величина отрицательная, можно сделать вывод, что при увеличении времени степень приближения реакций к равновесию возрастает.

В качестве технологического показателя, характеризующего степень развития реакции косвенного восстановления, принята степень использования монооксида углерода, определяемая развитием реакции:

$$\eta_{CO} = \frac{CO_2}{CO + CO_2}, \quad (14)$$

где η_{CO} – степень использования монооксида углерода, доли единиц; CO и CO₂ – содержание монооксида и диоксида углерода в газовой фазе, %.

Зависимость степени использования монооксида углерода от времени описывается уравнением

$$\eta_{CO} = \eta_{CO}^p (1 - e^{k\tau}), \quad (15)$$

где η_{CO}^p – равновесная степень использования монооксида углерода, доли единиц; τ – время пребывания материала в зоне восстановления, с.

Или после линеаризации получим

$$\frac{\Delta\eta_{CO}}{\eta_{CO}} = \frac{\Delta\eta_{CO}^p}{\eta_{CO}^p} - \frac{e^{k\tau}}{1 - e^{k\tau}} (k\Delta\tau + \Delta k\tau). \quad (16)$$

Значение k определяется с использованием данных о работе доменной печи. Равновесная степень использования монооксида углерода зависит от давления.

Изменение рудной нагрузки сопровождается изменением газодинамического режима верхней и нижней зон печи, долей объема шахты, занятой рудными материалами, и временем пребывания шихты в печи. В свою очередь время пребывания шихты в печи сопровождается изменением степени косвенного восстановления [12].

Изменение времени пребывания материалов в печи зависит от ее суточной производительности:

$$\tau = \frac{SH}{P_{сут} \gamma_{нас} (1 - f)} 24, \quad (17)$$

где S – сечение кольца, расположенного на периферии, м²; H – высота верхней ступени теплообмена, м; $P_{сут}$ – суточная производительность, т/сут; $\gamma_{нас}$ – удельный объем материала, м³/т чугуна; f – коэффициент уминки шихты, доли единицы.

Расчет высоты верхней зоны теплообмена производится по следующему уравнению [13]:

$$H_{в.ст} = \frac{3W_{шт} c_{каж} \rho_{нас}}{\alpha_v} (1 - m), \quad (18)$$

где $W_{\text{шх}}$ – теплоемкость потока шихтовых материалов; m – отношение теплоемкостей шихтового и газового потоков; $c_{\text{каж}}$ – кажущаяся теплоемкость шихтовых материалов; $\rho_{\text{нас}}$ – насыпная масса шихты; α_v – коэффициент теплопередачи от газового потока к потоку шихтовых материалов в верхней ступени теплообмена.

Линеаризовав уравнение (18), получим

$$\Delta H = -\frac{3W_{\text{шх}}}{\alpha_v} (1-m) \frac{\Delta\alpha_v}{\alpha_v} - \frac{3W_{\text{шх}}}{\alpha_v} \Delta m. \quad (19)$$

Поделив и умножив $(3W_{\text{шх}}/\alpha_v)\Delta m$ на H , получим для расчета относительного изменения высоты верхней зоны теплообмена следующее уравнение:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta\alpha_v}{\alpha_v} - \frac{\Delta m}{1-m}. \quad (20)$$

Учитывая, что $m = 0,5 \left(1 + \frac{W_{\text{шх}}}{W_r}\right)$ и допустив, что $W_{\text{шх}} = \text{const}$, после линеаризации получим

$$\Delta m = -0,5 \frac{W_{\text{шх}}}{W_r} \frac{\Delta W_r}{W_r}. \quad (21)$$

Учитывая, что $W_r = V_{\text{гг}}$, получим конечное выражение для расчета относительного изменения высоты верхней зоны печи

$$\frac{\Delta H}{H} = -\frac{\Delta\alpha_v}{\alpha_v} - \frac{1}{1-m} \frac{m-0,5}{1-m} \frac{\Delta V_r}{V_r}. \quad (22)$$

Коэффициент теплопередачи определяется по следующему уравнению [3]:

$$\alpha_v = 186 \left(\frac{w_r^{0,9} T^{0,3}}{d_s^{0,75}} \right) 0,5. \quad (23)$$

На рис. 3 представлено влияние исследуемых параметров на высоту верхней ступени теплообмена.

Для расчета температуры периферийных газов используются следующие уравнения [4]:

$$m = 0,5 \left(1 + \frac{c_{\text{шх}} G_{\text{шх}}}{c_r G_r} \right), \quad (24)$$

$$m = \frac{t_{0\text{к}} - t}{t_{r0} - t_{\text{шк}}}, \quad (25)$$

$$\Delta m = -(m-0,5) \left(\frac{\Delta(c_{\text{шх}} G_{\text{шх}})}{c_{\text{шх}} G_{\text{шх}}} - \frac{\Delta(c_r G_r)}{c_r G_r} \right). \quad (26)$$

Изменение температуры газового потока рассчитывается по уравнению

$$\Delta t_G = \Delta m (t_{\text{ш0}} - t_{\text{шк}}), \quad (27)$$

где Δm – изменение отношения теплоемкостей шихтового и газового потоков; $t_{\text{ш0}}$ – температура шихтовых материалов, К; $t_{\text{шк}}$ – температура шихтовых материалов на колошнике, К.

Влияние качества железорудных материалов на температуру колошника представлено на рис. 4.

По производственным данным была проведена оценка влияния показателей тепловой работы печи на потери тепла и температуру периферии. Результаты оценки представлены на рис. 5.

Корреляционный анализ взаимосвязи между температурой периферии и теплосъемом с холодильников заплечиков, выполненный по среднесуточным данным о работе доменной печи № 4, представлен на рис. 6.

Наличие зависимости между потерями тепла и теплосъема с температурой периферийных газов подтвердило тот факт, что повышение температуры периферийных газов (в существующем диапазоне) приводят

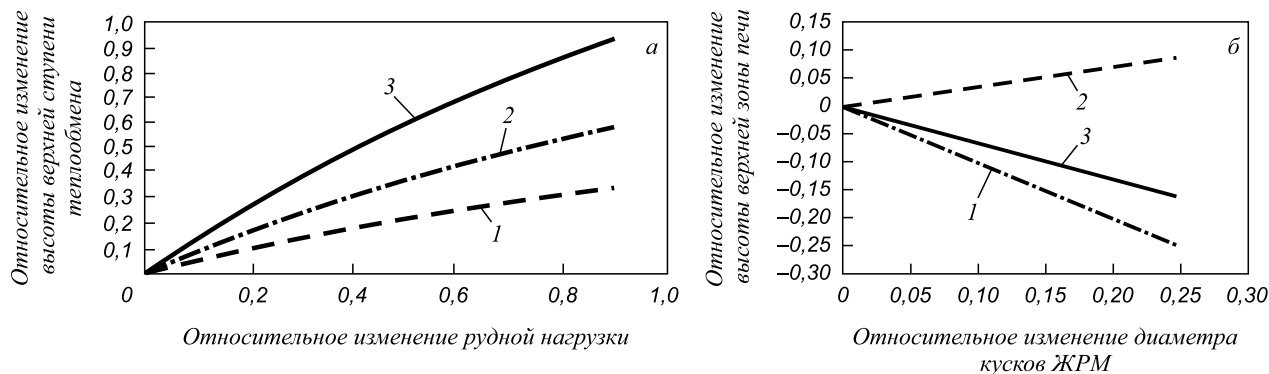


Рис. 3. Влияние изменения рудной нагрузки (а) и диаметра кусков железорудных материалов (б) на изменение высоты верхней ступени теплообмена:

1 – за счет изменения α ; 2 – за счет изменения m ; 3 – суммарное изменение

Fig. 3. Influence of ore burden change (a) and the diameter of iron-ore material pieces (б) on the change of the height of the upper step of heat exchange:

1 – due to the change of α ; 2 – due to the change of m ; 3 – summery change

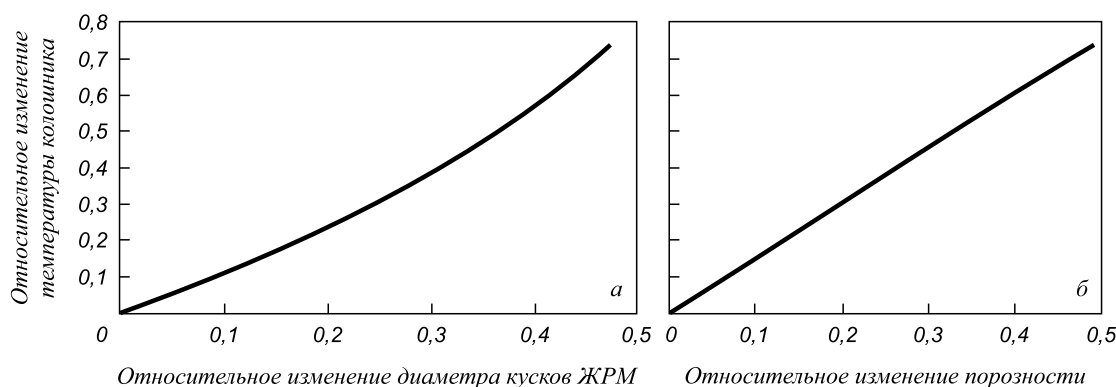


Рис. 4. Влияние изменения диаметра кусков ЖРМ (а) и относительное изменение порозности (б) на изменение температуры колошниковых газов

Fig. 4. Influence of change of diameter of iron-ore material pieces (а) and the relative change of fractional void volume (б) on the temperature change of blast furnace gases

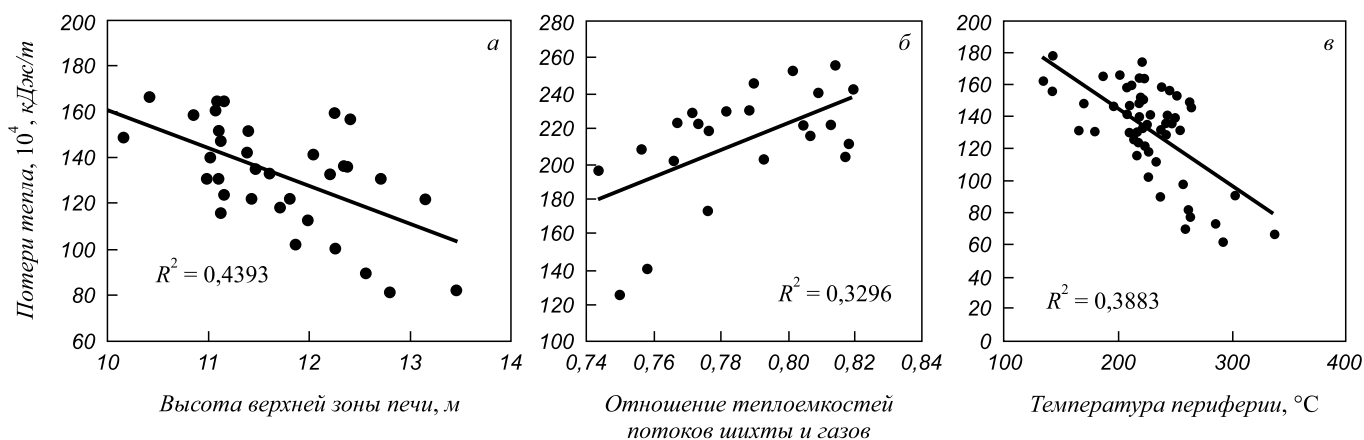


Рис. 5. Зависимость потерь тепла в области периферии от высоты верхней зоны доменной печи № 4 (а), отношения теплоемкостей потоков шихты и газов (б) и температуры периферии (в)

Fig. 5. Dependence of heat loss in the area of periphery on the height of the upper zone of blast furnace no. 4 (а), connections of heat capacity of charge and gas jets (б) and the periphery temperature (в)

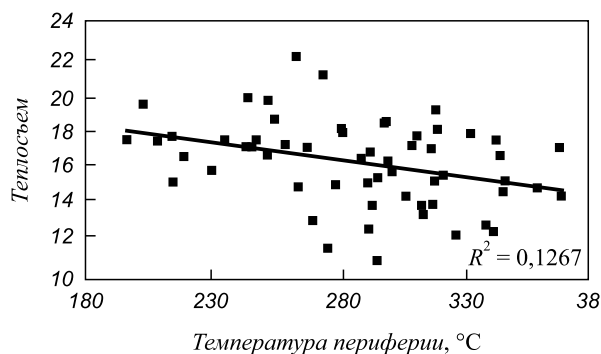


Рис. 6. Зависимость теплосъема от температуры периферии

Fig. 6. Dependence of heat removal on periphery temperature

к улучшению косвенного восстановления, что, в свою очередь, способствует образованию устойчивого гарниссажа [14, 15]. Таким образом, при повышении тепловых нагрузок на холодильники доменных печей следует исключить загрузку в периферийную область

крупного агломерата и окатышей и снизить рудную нагрузку.

Выводы. Уменьшение температуры газов в периферийной зоне печи сопровождается изменением степени косвенного восстановления (R_i). Этот факт позволяет рассматривать температуру периферии как индикатор развития косвенного восстановления. Увеличение рудной нагрузки в периферийной зоне доменной печи приводит к повышению высоты верхней зоны печи, снижению температуры периферийных газов и уменьшению степени косвенного восстановления. Повышение протяженности верхней зоны печи сопровождается увеличением тепловых нагрузок в нижней части шахты. Наличие в агломерате фракции более 40 мм сопровождается уменьшением порозности рудной части шихты и скорости восстановления оксидов железа. Наиболее эффективное управление тепловой и восстановительной работой периферийной зоны доменной печи достигается при агломерате фракции 5 – 25 мм. Разработанная модель расчета температуры газа и его вос-

становительной работы в периферийной зоне доменной печи может быть использована для оптимизации теплового состояния шахты печи в ее периферийной зоне. Для доменных печей, оборудованных бесконусными загрузочными устройствами, в качестве одного из показателей, характеризующих распределение потоков шихты и газов по радиусу доменной печи, следует рассматривать температуру периферийных газов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жило Н.Л. Формирование и свойства доменных шлаков. – М.: Металлургия, 1974. – 120 с.
2. Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михалевиц А.Г. Свойства жидких доменных шлаков. – М.: Металлургия, 1975. – 184 с.
3. Доменное производство: В 2-х т. Т. 1. Подготовка руд и доменный процесс / Под ред. Е.Ф. Вегмана. – М.: Металлургия, 1989. – 486 с.
4. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Суханов Е.Л. Теплотехника доменного процесса. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
5. Филатов С.В., Загайнов С.А., Гилева Л.Ю., Пыхтеева К.Б. Разработка методики анализа процессов восстановления оксидов железа в доменной печи // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Том 58. № 9. С. 658 – 662.
6. Китаев Б.И., Тимофеев В.Н., Боковиков Б.А. Тепло- и массообмен в плотном слое. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
7. Драничников Н.А., Китаев Б.И., Суханов Е.Л. О взаимном влиянии теплообменных и восстановительных процессов в шахте доменной печи. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 1982. № 2. С. 6 – 9.
8. Драничников Н.А., Китаев Б.И., Суханов Е.Л. О взаимном влиянии теплообменных и восстановительных процессов в шахте доменной печи. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 1982. № 4. С. 8 – 11.
9. Тимофеев В.Н., Боковиков Б.А., Бабушкин Н.М. Математическое описание явлений тепло- и массопереноса в доменной печи // Теплотехника доменного и агломерационного процессов: Сб. научн. трудов ВНИИМТ. – М.: Металлургия, 1966. С. 5 – 18.
10. Ковшов В.Н., Палаганов А.И., Остяков В.Г. Исследование порозности многокомпонентных шихт // Металлургия и коксохимия. 1977. Вып. 53. С. 34 – 37.
11. Шварцман А.А., Жуховицкий А.А. Начала физической химии для металлургов. – М.: Металлургия, 1991. – 208 с.
12. Товаровский И.Г. Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса. – М.: Металлургия, 1987. – 192 с.
13. Шаврин С.В., Ченцов А.В. К расчету высоты ступеней теплообмена в доменных печах // Изв. вуз. Черная металлургия. 1960. № 11. С. 27 – 31.
14. Jimoh S.O., Pyhteeva C.B., Zagaynov S.A. Analysis of the characteristics of the blast furnace peripheral zone // International journal of scientific & technology research. 2013. Vol. 2. № 9. P. 125 – 128.
15. Jimoh S.O., Ibrahim M.E., Ighalo B.S.O. Determination of optimum Lump size of sinter Obtained from Itakpe ironore Concentrate as charge material for blast Furnace // Nigerian Journal of Engineering Faculty of Engineering Ahmadu Bello University. 2008. Vol. 14. № 2. P. 5 – 7.

Поступила 30 марта 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 6, pp. 371–377.

CAPABILITY ASSESSMENT OF THERMAL CONTROL OF BLAST FURNACE UPPER ZONE IN PERIPHERAL AREA

S.A. Zagainov¹, S.V. Filatov², L.Yu. Gileva¹, A.V. Lozovich¹, S.O. Jimoh¹

¹Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

²JSC “Novolipetsk Metallurgical Plant”, Lipetsk, Russia

Abstract. It is known that an increased FeO content reduces the start melting temperature of the primary slag, which prevents the formation of a stable skull, thereby increasing the thermal load on the refrigerators of bally and bosh, and it is accompanied by increased heat losses. FeO content in the raw slag was determined by the development of indirect reduction reactions. The aim of the experiment was to evaluate the ways to reduce the heat losses of refrigerators of bally and bosh. Reducing the gas temperature in the peripheral zone of the furnace is accompanied by a change in the degree of indirect restoration. This fact can be considered as an indicator of the temperature of the periphery of the indirect restoration. The developed model for calculating the gas temperature and reducing its operation in the peripheral zone of the blast furnace can be used to optimize the thermal state of the furnace shaft in its peripheral zone.

Keywords: blast furnace, peripheral zone, heat transfer, indirect reduction, ore load, size distribution of iron materials.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-6-371-377

REFERENCES

1. Zhilo N.L. *Formirovanie i svoistva domennykh shlakov* [Formation and properties of blast-furnace slags]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 120 p. (In Russ.).
2. Voskoboynikov V.G., Dunaev N.E., Mikhalevich A.G. *Svoistva zhidkikh domennykh shlakov* [Properties of liquid blast-furnace slags]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 184 p. (In Russ.).
3. *Domennoe proizvodstvo: In 2 vol. Vol. 1. Podgotovka rud i domennyi protsess* [Blast-furnace production: In 2 vols. Vol. 1. Preparation of ores and blast-furnace processes]. Vegman E.F. ed. Moscow: Metallurgiya, 1989, 486 p. (In Russ.).
4. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Sukhanov E.L. *Teplotekhnika domennogo protsesssa* [Heat engineering of blast-furnace processes]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 248 p. (In Russ.).
5. Filatov S.V., Zagainov S.A., Gileva L.Yu., Pykhteeva K.B. Development of the analysis of iron oxide reduction processes. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 9, pp. 658–662. (In Russ.).
6. Kitaev B.I., Timofeev V.N., Bokovikov B.A. *Teplo- i massoobmen v plotnom sloe* [Heat and mass transfer in a dense layer]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 432 p. (In Russ.).
7. Dranichnikov N.A., Kitaev B.I., Sukhanov E.L. On the mutual influence of heat exchange and reduction processes in the blast furnace shaft. Message 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982, no. 2, pp. 6–9. (In Russ.).
8. Dranichnikov N.A., Kitaev B.I., Sukhanov E.L. On the mutual influence of heat exchange and reduction processes in the blast furnace shaft. Message 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982, no. 4, pp. 8–11. (In Russ.).
9. Timofeev V.N., Bokovikov B.A., Babushkin N.M. Mathematical description of the phenomena of heat and mass transfer in the blast furnace. In: *Teplotekhnika domennogo i aglomeratsionnogo protsessov: Sb. nauchn. trudov VNIIMT* [Heat engineering of blast-furnace and sintering processes: Coll. of reports of VNIIMT]. Moscow: Metallurgiya, 1966, pp. 5–18. (In Russ.).

10. Kovshov V.N., Palaganov A.I., Ostyakov V.G. Study of fractional void volume of multicomponent charges. *Metallurgiya i koksokhimiya*. 1977, vol. 53, pp. 34–37. (In Russ.).
11. Shvartsman A.A., Zhukhovitskii A. A. *Nachala fizicheskoi khimii dlya metallurgov* [Elements of physical chemistry for metallurgists]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 208 p. (In Russ.).
12. Tovarovskii I.G. *Sovershenstvovanie i optimizatsiya parametrov domennogo protsessa* [Improvement and optimization of the parameters of the blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 192 p. (In Russ.).
13. Shavrin S.V., Chentsov A.V. Calculation of the height of heat exchange steps in blast furnaces. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1960, no. 11, pp. 27–31. (In Russ.).
14. Jimoh S.O., Pyhteeva C.B., Zagaynov S.A. Analysis of the characteristics of the blast furnace peripheral zone. *International journal of scientific & technology research*. 2013, vol. 2, no. 9, pp. 125–128.
15. Jimoh S.O., Ibrahim M.E., Ighalo B.S.O. Determination of optimum lump size of sinter obtained from Itakpe iron ore Concentrate as charge material for blast furnace. *Nigerian Journal of Engineering Faculty of Engineering Ahmadu Bello University*. 2008, vol. 14, no. 2, pp. 5–7.

Information about the authors:

S.A. Zagainov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys” (zagainovsky@mail.ru)

S.V. Filatov, Managing Director (filatov_sv@nlmk.ru)

L.Yu. Gileva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys” (lu.gileva@gmail.com)

A.V. Lozovich, Postgraduate of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys” (al.lozovich@gmail.com)

S.O. Jimoh, Postgraduate of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys” (smaila20002001@yahoo.co.uk)

Received March 30, 2016