

УДК 669.162

ПРЕИМУЩЕСТВА И РИСКИ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ С ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ

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.com)

Мясоедов С.В.², начальник доменного цеха (myasoedov_sv@nlmk.com)

Гилева Л.Ю.¹, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия железа и сплавов» (luy.gileva@urfu.ru)

Титов В.Н.², главный специалист по оптимизации руднотермических технологий (titov_vn@nlmk.com)

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

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

² ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», (НЛМК)

(398004, Россия, г. Липецк, пл. Металлургов, 2)

Аннотация. Рост интенсивности плавки на доменных печах ОАО «НЛМК», который достигнут путем повышения качества кокса и железорудных материалов, повышения давления под колошником и обогащении дутья кислородом, сопровождается увеличением скорости косвенного восстановления вюстита и снижением удельных потерь тепла с охлаждающей водой. Однако при высокой интенсивности существенно увеличиваются риски возникновения расстройств схода шихты. Установлено, что наряду с изменением качества шихтовых материалов причиной нарушения схода шихты может служить изменение распределения рудной нагрузки по радиусу печи. Разработан новый метод диагностики причин, которые приводят к расстройству схода шихтовых материалов. С использованием метода математического моделирования выполнен анализ влияния изменения рудной нагрузки и крупности железорудных материалов на изменение температуры периферийных газов и степень использования монооксида углерода. Метод основан на анализе совместного изменения температуры газов и степени использования монооксида углерода в периферийной области. Анализ изменения температуры периферийных газов и степени использования соединения СО позволяет выявлять причины изменения перепадов давления по высоте печи. В результате анализа динамики изменения перепадов давления по высоте печи найдены признаки, по которым можно судить о вероятности расстройства схода шихты. Рассмотрены возможность снижения перепада давления за счет перераспределения рудной нагрузки по радиусу печи и количества газов. Показано, что различные способы снижения количества газов сопровождаются различными изменениями расхода кокса и производительности печи. Разработана математическая модель для выбора наилучшей, в конкретных условиях, комбинации изменения параметров комбинированного дутья.

Ключевые слова: доменная печь, интенсивность, степень использования газа, удельный расход углерода топлива, газодинамика, сход шихтовых материалов, перепады давления по высоте печи.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-760-765

Вопрос о влиянии интенсивности плавки, которую целесообразно оценивать по удельной производительности $P_{уд}$, т/м³ в сутки, на эффективность ее работы в настоящее время является весьма актуальным. Это объясняется тем, что в современных условиях при повышении интенсивности плавки наблюдается снижение удельного расхода топлива.

В работе [1] доказано, что рост интенсивности плавки, который достигается путем повышения качества кокса и железорудных материалов, сопровождается увеличением скорости косвенного восстановления вюстита и снижением удельных потерь тепла с охлаждающей водой. При этом доминирующим фактором является снижение потерь тепла, что во многом определяет снижение удельного расхода кокса. Также в работе [1] показано, что при проведении комплекса мероприятий, направленных на повышение интенсивности плавки, достигнуто значительное

снижение удельного расхода кокса, что подтверждается в работах [2 – 4].

Принимая во внимание возрастание требований по снижению эмиссии диоксида углерода в черной металлургии, вклад которой в глобальную эмиссию этого газа техногенного происхождения составляет 7 % [5], энергозатраты на выплавку 1 т чугуна удобно оценивать величиной суммарного расхода углерода.

Оценка изменения этого показателя, полученная по данным о работе доменных печей ОАО «НЛМК» (рис. 1), в полной мере подтвердила преимущества работы доменных печей с высокой интенсивностью.

Риски работы доменных печей, возникающие при высокой интенсивности плавки, в первую очередь связаны с возможными расстройствами схода шихты.

Условия схода шихты определяются взаимодействием сил тяжести и силы газового потока, оцениваются степенью уравновешивания шихты:

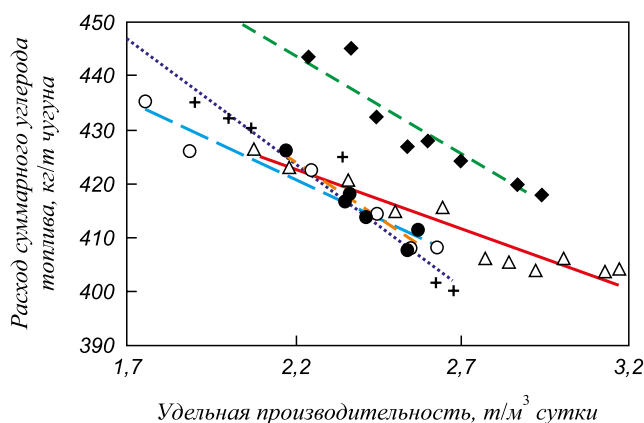


Рис. 1. Зависимость расхода суммарного углерода топлива от удельной производительности доменной печи: + – ДП 3; Δ – ДП 4; ○ – ДП 5; ● – ДП 6; ◆ – ДП 7

Fig. 1. Dependence of total fuel carbon consumption on specific productivity of the blast furnace – BF (blast furnace): + – BF 3; Δ – BF 4; ○ – BF 5; ● – BF 6; ◆ – BF 7

$$C_y = \frac{\Delta P}{\rho g h}, \quad (1)$$

где ΔP – перепад давления на высоте h слоя, Па; ρ – насыпная масса шихты, кг/м³.

При высокой интенсивности плавки печи работают с предельно допустимыми перепадами давления.

Учитывая, что давление в каждом горизонтальном сечении печи постоянно [6], а распределение рудной нагрузки по радиусу и, следовательно, насыпная масса отличаются, можно утверждать, что характер схода шихты определяется степенью ее уравнивания в критической области, которой могут являться периферийная или осевая зоны.

Взаимосвязь между перепадом давления в верхней и нижней зонах печи и режимными параметрами описывается уравнением Эргона [7]:

$$\Delta P = \lambda \frac{h}{d} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{T}{T_0} \frac{P_0}{P} \frac{\rho_0 w_0^2}{2}; \quad (2)$$

здесь λ – коэффициент, учитывающий поверхностные свойства кусков; d – эквивалентный диаметр кусков слоя, м; ε – порозность слоя (относительный объем межкускового пространства в слое), м³/м³; T и T_0 – средняя температура газа в слое и при нормальных условиях, К; P – среднее давление газа в слое, Па; ρ_0 – плотность газа при нормальных условиях, кг/м³; w_0 – средняя скорость газа в свободном сечении печи при нормальных условиях, м/с.

Следует отметить, что протяженность зоны, где измеряется верхний перепад давления, составляет от 30 до 48 % от уровня засыпи до уровня фурм. Протяженность сухой зоны печи значительно больше и согласно расчетам температурных полей, выполненных по уравнениям работы [8], доходит до 70 % расстояния от

уровня засыпи до уровня фурм. Из этого следует, что перепад давления в сухой зоне печи контролируется не в полной мере.

Классические расстройтва схода шихты, а также способы их ликвидации достаточно подробно описаны в работах [9, 10]. Основные способы ликвидации расстройств схода шихтовых материалов связаны со снижением количества газов и перераспределением рудной нагрузки по радиусу печи.

Основными причинами расстройств схода шихтовых материалов является следующее:

- несоответствие рудной нагрузки, программы загрузки и параметров комбинированного дутья качеству шихтовых материалов;
- сбои и отказы работы оборудования;
- ошибки технологического персонала.

Диагностика причин, которые приводят к расстройству схода шихтовых материалов, осуществляется путем анализа совместного изменения температуры газов и степени использования монооксида углерода в периферийной области.

На основе закономерностей теплообмена [11] и особенностей восстановления железорудных материалов [12] выполнен расчет изменения степени использования монооксида углерода и температуры газов в периферийной области верхней зоны доменной печи. Расчеты выполняли при условии, что рудная нагрузка в периферийной области составляет 2 – 3 т/т, а эквивалентный diam. железорудных материалов – 5 мм.

Расчеты показали, что при увеличении рудной нагрузки в периферийной области на 0,1 т/т температура газов снижается на 10 – 16 °С, а степень использования монооксида углерода снижается на 0,12 – 0,18 %. При снижении эквивалентного диаметра железорудных материалов на 1 мм степень использования соединения СО возрастает на 0,3 – 0,5 %, а температура газов снижается на 6 – 10 °С. Таким образом, однонаправленное изменение температуры периферийных газов и степени использования монооксида углерода свидетельствует об изменении распределения рудной нагрузки по радиусу печи, а разнонаправленное изменение этих параметров – об изменении качества шихтовых материалов.

Рассматривая возможность снижения перепада давления за счет перераспределения рудной нагрузки по радиусу печи, следует отметить, что это мероприятие приводит к снижению степени использования соединения СО, повышению степени прямого восстановления и удельного расхода кокса.

Горячий ход печи и низкое качество шихтовых материалов могут служить причинами тугого хода.

Тугой ход при нормальном нагреве печи – это нормальная работа печи при существующем качестве шихтовых материалов. Одним из способов повышения интенсивности плавки в этом случае является снижение рудной нагрузки в периферийной области. При этом за

счет повышения количества газов на периферии высота верхней зоны печи сокращается и повышаются тепловые нагрузки на холодильники распара и заплечиков. При сильном раскрытии периферии возможно оползание гарнисажа, что может усугубить расстройство. Поэтому наряду с раскрытием периферии следует снизить количество газов за счет снижения расхода природного газа и содержания кислорода в дутье. Для компенсации снижения степени использования монооксида углерода и снижения расхода природного газа снижается рудная нагрузка, что способствует увеличению порозности слоя шихты.

Для предотвращения расстройства при горячем ходе печи на практике в первую очередь реализуются мероприятия, направленные на стабилизацию теплового состояния.

С использованием математической модели, разработанной в УрФУ [13], выполнен анализ эффективности снижения верхнего перепада давления путем одновременного изменения рудной нагрузки на периферии, снижения расхода природного газа и содержания кислорода в дутье. Результаты расчета показали, что для снижения верхнего перепада давления на 0,01 ата на печах, оборудованных бесконусным засыпным устройством, удельный расход кокса увеличится на 1,0 – 2,0 кг на т чугуна, а производительность печи снизится менее чем на 1 %.

Для предотвращения и ликвидации нарушения схода шихты реализуются такие изменения параметров комбинированного дутья, при которых снижается минутное количество газов. При снижении количества газов происходит одновременное снижение как верхнего, так и нижнего перепадов давления. Причем на каждой доменной печи эта взаимосвязь индивидуальна. Результаты расчета взаимосвязи между изменением верхнего и нижнего перепадов давления представлены на рис. 2.

Различный характер зависимости между изменением верхнего и нижнего перепадов давления по

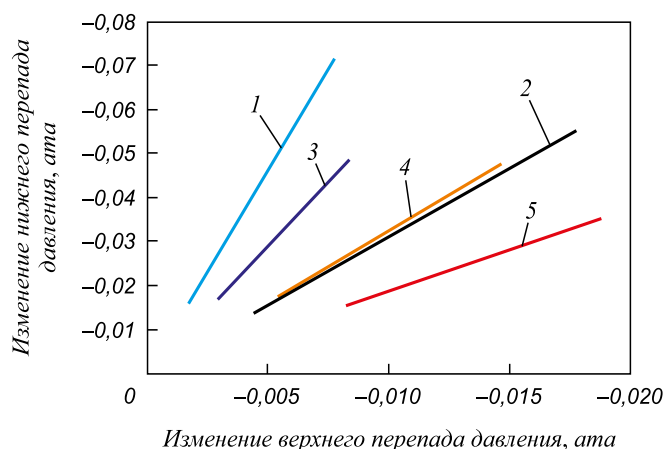


Рис. 2. Взаимосвязь изменения верхнего и нижнего перепадов давления при снижении количества газов:
1 – ДП 3; 2 – ДП 4; 3 – ДП 5; 4 – ДП 6; 5 – ДП 7

Fig. 2. Relation between changes in upper and lower pressure drops at decrease in the gases volume:
1 – BF 3; 2 – BF 4; 3 – BF 5; 4 – BF 6; 5 – BF 7

печах объясняется различным отношением верхнего перепада давления к нижнему. Чем больше это отношение, тем в меньшей степени отличаются их изменения.

Рассматривая варианты ликвидации неровного схода шихты или схода ее с подвисаниями и обрывами, следует отметить, что наиболее эффективный способ борьбы с такими расстройствами связан с сокращением количества газов. Это достигается изменением параметров комбинированного дутья.

Сопоставление основных приемов снижения верхнего перепада давления на 0,01 ата для доменных печей ОАО «НЛМК» представлено в таблице. В ней приводятся средние изменения производительности и удельного расхода кокса. Диапазон изменения этих показателей в технологических эффективных режимах составляет ±10 % (отн.).

Сопоставление основных приемов снижения верхнего перепада давления на 0,01 ата для доменных печей ОАО «НЛМК»

Comparison of the main methods of reducing the upper pressure drop by 0.1 kPa for NLMK blast furnaces

Мероприятия	ДП 3	ДП 4	ДП 5	ДП 6	ДП 7
Снижение содержания кислорода в дутье	–	<u>-2,1</u> -8,5	<u>-5,5</u> -8,2	<u>-5,74</u> -10,73	<u>-3,5</u> -7,0
Снижение расхода дутья	<u>-3,2</u> -4,8	<u>-1,13</u> -1,93	<u>-1,56</u> -1,38	<u>-1,90</u> -2,16	<u>-0,82</u> -1,37
Снижение расхода природного газа	<u>+1,65</u> +18,26	<u>-0,72</u> +8,50	<u>+0,54</u> +9,70	<u>+0,6</u> +8,9	<u>+0,27</u> +5,50
Изменение расхода природного газа и содержания кислорода в дутье при постоянной теоретической температуре фурменного газа	<u>-4,75</u> -0,50	<u>-2,6</u> 0	<u>-2,6</u> 0	<u>-2,50</u> -0,64	<u>-1,7</u> 0

Примечание. В числителе приведены значения изменения производительности, %, в знаменателе – изменения удельного расхода кокса, кг/т чугуна.

Приведенные в таблице данные показывают, что снижение расхода дутья в меньшей степени сказываются на изменении производительности печи и тепловом состоянии, так как для сохранения теплового состояния требуется меньшее изменение удельного расхода кокса. При реализации этого мероприятия наблюдается снижение протяженности фурменного очага.

Минимальное изменение производительности достигается при снижении расхода природного газа. Однако при реализации этого мероприятия требуется существенно увеличить расход кокса.

Снижение перепада давления путем совместного изменения расхода природного газа и содержания кислорода в дутье менее эффективно с точки зрения потери производства. Однако при использовании этого мероприятия сохраняется структура столба шихтовых материалов, так как рудная нагрузка практически не меняется.

В зависимости от конкретной ситуации в доменном цехе реализуется то или иное мероприятие. Для выбора конкретного мероприятия разработано специальное математическое обеспечение.

Анализ показал, что в тех случаях, когда нижний перепад давления приближается к критическому значению, наиболее эффективным мероприятием является снижение расхода дутья.

При высокой интенсивности плавки возникают ситуации, когда при практически постоянном темпе срабатывания подачи и уровне засыпи происходит обрыв шихты на 2 – 4 м. Анализ информации об изменениях перепадов давления, составе колошникового газа, расходе и давлении дутья, температурах периферийных газов и газов в газоотводах, усредненной на интервале времени 5 с более чем за 50 периодов работы печи при возникновении обрывов, позволил выявить признаки, на основе которых возможно предсказать приближающийся обрыв. Более чем в 40 периодах обрыву предшествовало разнонаправленное изменение верхнего и нижнего перепадов давления. При увеличении верхнего перепада нижний перепад снижался. Типичная картина изменения динамики перепадов давления по высоте печи приводится на рис. 3.

При возникновении обрывов шихты наблюдается похолодание печи, которое обусловлено снижением времени пребывания шихты в зоне косвенного восстановления вюстита.

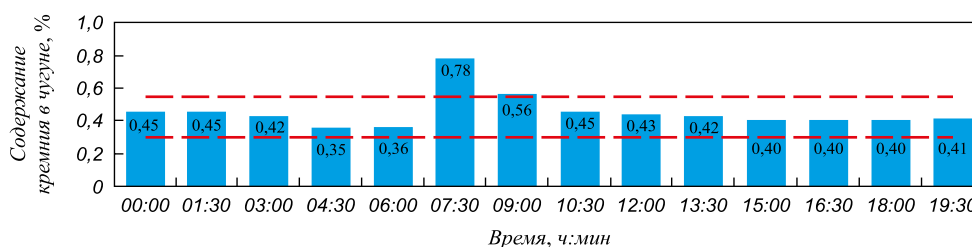


Рис. 4. Пример расчета динамики изменения содержания кремния в чугуне при обрыве шихты и загрузке в печь двух холостых подач

Fig. 4. An example of calculating the dynamics of change in silicon content in cast iron when there is burst of charge and two idle feeds are charged into the furnace

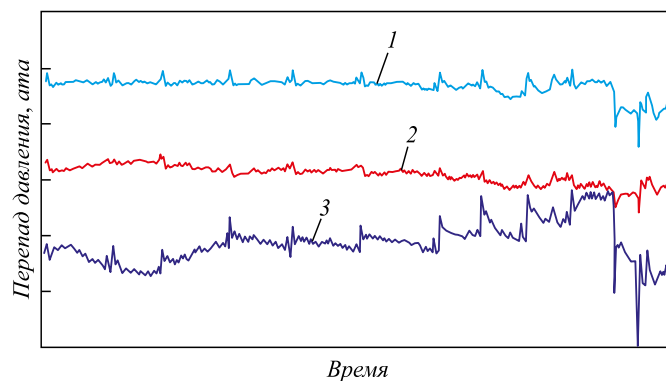


Рис. 3. Типичная картина изменения перепадов давления по высоте печи перед «внезапным» обрывом шихты: 1 – ΔP общий; 2 – ΔP нижний; 3 – ΔP верхний

Fig. 3. Typical changes in pressure drops along the furnace height before the “sudden” burst of charge : 1 – ΔP total; 2 – ΔP lower; 3 – ΔP upper

Используя математические модели для оценки влияния времени пребывания шихты в печи на степень использования монооксида углерода [14] и температурных полей в верхней зоне печи [7, 8, 15, 16] и известные подходы к математическому описанию динамических характеристик [17 – 23], разработана компьютерная методика моделирования динамики изменения содержания кремния в чугуне при компенсации обрывов с использованием холостых подач и параметров комбинированного дутья.

Методика реализована в виде программного модуля, который позволяет в диалоговом режиме выбирать такой комплекс воздействий, при котором сокращается время восстановления уровня засыпи и минимизируется количество выпусков с некондиционным чугуном.

Пример расчета динамики изменения содержания кремния в чугуне при обрыве шихты и использовании холостых подач представлен на рис. 4.

Выводы. Установлено, что при повышении интенсивности плавки снижается удельный расход суммарного углерода топлива. При высокой интенсивности плавки возникают риски превышения перепадов давления критических значений. Рассмотрены способы снижения перепада давления путем изменения расхода дутья, содержания кислорода в дутье и расхода природного газа.

Показано различное влияние этих параметров на производительность печи и удельный расход кокса. Разработано программное обеспечение, позволяющее выбрать такие управляющие воздействия, применение которых в конкретной ситуации обеспечивает наименьшие потери.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курунов И.Ф., Филатов С.В., Тихонов Д.Н., Басов В.И. Интенсивность доменной плавки и эффективность косвенного восстановления // *Сталь*. 2016. № 8. С. 26 – 31.
2. Готлиб А.Д. Доменный процесс. – М.: Металлургия, 1966. – 503 с.
3. Товаровский И.Г., Лялюк В.П. Эволюция доменной плавки. – Днепропетровск: Пороги, 2001. – 424 с.
4. Товаровский И.Г., Бондаренко В.И. Интенсивность хода и удельный расход кокса в современных и перспективных условиях доменной плавки // *Сталь*. 1978. № 3. С. 203 – 206.
5. Adeline Morcel, Lena Sundqvist Okvist, Joel Orre, Bo Bjorkman, Per Lagrerwall. Low CO₂ Ironmaking in the Blast Furnace. Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016. – 2016. P. 274 – 283.
6. Тарасов В.П. Газодинамика доменного процесса. – М.: Металлургия, 1990. – 215 с.
7. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Д. Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия, 1966. – 355 с.
8. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов и др. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
9. Металлургия чугуна: Учеб. для вузов., 3-е изд. перераб. и доп. / Под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
10. Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, О.П. Онорин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 545 с.
11. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А. Спиринов, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко; под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 1995. – 243 с.
12. Zagainov S.A., Filatov S.V., Gileva L.Y., Lozovich A.V., Jimoh S.O. Controlling the peripheral temperature of the blast furnace // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. No. 6. P. 378 – 383.
13. Разработка структурированного математического обеспечения для решения комплекса технологических задач организации и управления доменным процессом / Л.Ю. Гилева, С.А. Загайнов, В.Н. Титов, А.В. Галкин. – В кн.: Современные сложные системы управления. Материалы XII Международной научно-практической конференции. Т. 1. – Липецк: изд. Липецкого государственного технического университета, 2017. С. 205 – 209.
14. Korshikov G.V., Titov V.N., Mikhailov V.G., Karpov A.V. Fuel consumption and reduction kinetics in blast furnaces // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. No. 2. P. 125 – 131
15. Bokovikov B.A., Moikin V.I., Gordon Y.M., Spirin N.A., Shvidkii V.S., Yaroshenko Y.G., Lavrov V.V. Analysis of Transient Processes in Blast Furnace. AISTech Proceedings. 4 – 7 May 2015 – Cleveland. Oh. USA, 2015. P. 237 – 244.
16. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спиринов, В.Л. Терентьев и др. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2005. – 301 с.
17. Улахович В.А., Райх Е.И., Шоленинов В.М. и др. Исследование динамики доменного процесса // *Сталь*. 1975. № 1. С. 9 – 14.
18. Похвиснев А.Н., Курунов И.Ф., Завидонский В.А. и др. Экспериментальное определение динамических характеристик доменной печи. – В кн.: Подготовка доменного сырья к плавке: сб. трудов МИСиС. № 69. – М.: Металлургия, 1971. С. 118 – 121.
19. Авдеев В.П., Даниелян Т.М., Белоусов П.Г. Идентификация промышленных объектов с учетом нестационарностей и обратных связей. – Новокузнецк: изд. СМИ, 1984. – 88 с.
20. Kurunov I.F., Dobroskok V.A., Isteev A.I., Fursova L.A., Pleshkov V.I., Shcherbakov P.I. Determining dynamic characteristics of 5000 m³ blast furnace // *Steel USSR*. 1977. Vol. 7. No. 9. P. 496 – 497.
21. Serov V.V., Mikhalevich A.G. The Dynamics of the quality of pig iron in blast furnaces // *Metallurgist*. 1983. No. 1. P. 14 – 17.
22. Jun-ichiro Y. Matematical model of blast furnace, Progress and Application to New Technology Development, 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking. – Rio de Janeiro, Brazil, 2012. P. 1660 – 1673.
23. Flierman G.A., Oderkerk H. Numerical simulation of the blast furnace process, *Math. Process Models, Iron and Steelmak.* – Amsterdam, 1973. P. 40 – 50, London, Discussion, 1975. P. 37 – 50.

Поступила 7 сентября 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 10, pp. 760–765.

BENEFITS AND RISKS OF BLAST FURNACES WITH HIGH INTENSITY

S.A. Zagainov¹, S.V. Filatov², S.V. Myasoedov², L.Yu. Gileva¹, V.N. Titov²

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

²JSC “Novolipetsk Metallurgical Plant” (NLMK), Lipetsk, Russia

Abstract. Increase in the intensity of blast furnace smelting at NLMK JSC is achieved by improving quality of coke and iron ore materials, by increasing pressure under the blast furnace mouth and by oxygen enrichment. It is accompanied by an increase in the rate of wustite indirect reduction and decrease in specific heat losses with cooling water. However, the risks of burden yield problems are significantly lower with high intensity. It has been established that with the change in quality of charge materials, reason for burden yield problems can be also the variation in ore load ratio along the furnace radius. A new method for diagnosing causes of burden yield problems was developed. Using method of mathematical modeling, effect of change in ore load and size of iron-ore materials on peripheral gases temperature change and the degree of CO use were analyzed. The method is based on analysis of joint change in gas temperature and degree of CO use in peripheral area. Analysis of

peripheral gases temperature variation and degree of CO use makes it possible to identify reasons of pressure drops along the furnace height. As a result of analysis of pressure drops dynamics changes along the furnace height, there have been found signs that can be used to judge the probability of burden yield problems. The possibility of reducing pressure drops due to redistribution of ore load along the furnace radius and the amount of gases is considered. It is shown that various methods of reducing the amount of gases are accompanied by different changes in coke consumption and furnace productivity. Mathematical model has been developed to select the best combination of parameters changing of the fuel-enriched blast in specific conditions.

Keywords: blast furnace, intensity, degree of gas use, specific fuel carbon consumption, gas dynamics, burden yield, pressure differences along the furnace height.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-760-765

REFERENCES

1. Kurunov I.F., Filatov S.V., Tikhonov D.N., Basov V.I. Indirect reduction in blast-furnace smelting. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 8, pp. 583–588.

2. Gotlib A.D. *Domennyi protsess* [Blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 503 p. (In Russ.).
3. Tovarovskii I.G., Lyalyuk V.P. *Evolutsiya domЕННОй plavki* [Evolution of blast furnace smelting]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2001, 424 p. (In Russ.).
4. Tovarovskii I.G., Bondarenko V.I. Intensity of course and specific consumption of coke in modern and advanced conditions of blast furnace smelting. *Stal'*. 1978, no. 3, pp. 203–206. (In Russ.).
5. Adeline Morcel, Lena Sundqvist Okvist, Joel Orre, Bo Bjorkman, Per Lagrerwall. Low CO₂ Ironmaking in the Blast Furnace. In: *Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016*, pp. 274–283.
6. Tarasov V.P. *Gazodinamika domЕННОго protsessа* [Gas dynamics of blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 215 p. (In Russ.).
7. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Lazarev B.D. *Teploobmen v domЕННОй pechi* [Heat exchange in blast furnace]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 355 p. (In Russ.).
8. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Sukhanov E.L. etc. *Teplotekhnika domЕННОго protsessа* [Heat engineering of blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 248 p. (In Russ.).
9. *Metallurgiya chuguna: Ucheb. dlya vuzov* [Cast iron metallurgy: Proc. for universities]. Yusfin Yu.S. ed. Moscow: Akademkniga, 2004, 774 p. (In Russ.).
10. Dmitriev A.N., Shumakov N.S., Leont'ev L.I., Onorin O.P. *Osnovy teorii i tekhnologii domЕННОй plavki* [Fundamentals of theory and technology of blast furnace smelting]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2005, 545 p. (In Russ.).
11. Spirin N.A., Ovchinnikov Yu.N., Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teploobmen i povyshenie effektivnosti domЕННОй plavki* [Heat transfer and increasing efficiency of blast furnace smelting]. Yaroshenko Yu.G. ed. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 1995, 243 p. (In Russ.).
12. Zagainov S.A., Filatov S.V., Gileva L.Y., Lozovich A.V., Jimoh S.O. Controlling the peripheral temperature of the blast furnace. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 6, pp. 378–383.
13. Gileva L.Yu., Zagainov S.A., Titov V.N., Galkin A.V. Development of structured software for solving a set of technological problems of organizing and managing of blast furnace process. In: *Sovremennye slozhnye sistemy upravleniya. Materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, t. 1* [Modern Complex Control Systems. Materials of 12th Int. Sci.-Pract. Conf. Vol. 1]. Lipetsk: izd. Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017, pp. 205–209. (In Russ.).
14. Korshikov G.V., Titov V.N., Mikhailov V.G., Karpov A.V. Fuel consumption and reduction kinetics in blast furnaces. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 2, pp. 125–131.
15. Bokovikov B.A., Moikin V.I., Gordon Y.M., Spirin N.A., Shvidkii V.S., Yaroshenko Y.G., Lavrov V.V. Analysis of Transient Processes in Blast Furnace. *AISTech Proceedings. 4 – 7 May 2015*. Cleveland. Oh. USA. P. 237–244.
16. Onorin O.P., Spirin N.A., Terent'ev V.L. etc. *Komp'yuternye metody modelirovaniya domЕННОго protsessа* [Computer simulation of blast furnace process]. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 2005, 301 p. (In Russ.).
17. Ulakhovich V.A., Raikh E.I., Sholeninov V.M. etc. Study of the dynamics of blast furnace process. *Stal'*. 1975, no. 1, pp. 9–14. (In Russ.).
18. Pokhvisnev A.N., Kurunov I.F., Zavidonskii V.A. etc. Experimental determination of dynamic characteristics of blast furnace. In: *Podgotovka domЕННОго syr'ya k plavke: Sb. trudov MISiS* [Preparation of blast furnace materials for smelting: Coll. of MISiS proc.]. Moscow: Metallurgiya, 1971, no. 69, pp. 118–121. (In Russ.).
19. Avdeev V.P., Danielyan T.M., Belousov P.G. *Identifikatsiya promyshlennykh ob'ektov s uchetom nestatsionarnosti i obratnykh svyazei* [Identification of industrial facilities with regard to nonstationarity and feedback]. Novokuznetsk: SMI, 1984, 88 p. (In Russ.).
20. Kurunov I.F., Dobroskok V.A., Isteev A.I., Fursova L.A., Pleshkov V.I., Shcherbakov P.I. Determining dynamic characteristics of 5000 m³ blast furnace. *Steel USSR*. 1977, vol. 7, no. 9, pp. 496–497.
21. Serov V.V., Mikhalevich A.G. Dynamics of formation of the composition of conversion pig iron in blast furnaces. *Metallurgist*. 1983, vol. 27, no. 1, pp. 9–13.
22. Jun-ichiro Y. Mathematical model of blast furnace, Progress and Application to New Technology Development, *6th Int. Congress on the Science and Technology of Ironmaking, Rio de Janeiro, Brazil*, 2012, pp. 1660–1673.
23. Flierman G.A., Oderkerk H. Numerical simulation of the blast furnace process. *Math. Process Models, Iron and Steelmak*. Amsterdam, 1973, pp. 40–50; London, Discussion, 1975, pp. 37–50.

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.com)

S.V. Myasoedov, Head of the Blast Furnace Shop (myasoedov_sv@nlmk.com)

L.Yu. Gileva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys” (luy.gileva@urfu.ru)

V.N. Titov, Chief Specialist in Optimization of Ore-Thermal Technologies (titov_vn@nlmk.com)

Received September 7, 2018