

## Оценка взаимосвязи содержания $\text{CO}_2$ и распределения рудных нагрузок на колошнике доменной печи

Выполнена оценка взаимосвязи распределения рудной нагрузки и содержания  $\text{CO}_2$  по радиусу доменной печи. Обоснована возможность расчетного определения корректирующих изменений в программе загрузки при заданном изменении содержания  $\text{CO}_2$  в определенной зоне колошника. Ил. 1. Табл. 2. Библиогр.: 2 назв.

**Ключевые слова:** программа загрузки, доменная печь, рудная нагрузка,  $\text{CO}_2$ , корректировка, аппроксимирующая функция

*Interrelation between distribution of ore burden and  $\text{CO}_2$  content along blast furnace radius is estimated. Determination of adjusting changes by means of calculations in the charging program under given change of  $\text{CO}_2$  content in the definite zone of blast-furnace mouth is proved.*

**Keywords:** charging program, blast furnace, ore burden,  $\text{CO}_2$ , adjustment, approximation function

Корректировка программ загрузки при стабильном ходе доменной печи (ДП) и удовлетворительном уровне производства осуществляется, как правило, с целью повышения экономичности плавки за счет совершенствования показателей распределения газового потока и улучшения использования восстановительного потенциала шахтных газов [1, 2]. Основным показателем качества распределения газового потока по радиусу печи на ДП является содержание  $\text{CO}_2$  в точках отбора газа. На основании этих данных и индивидуального опыта технолог осуществляет корректировку распределения шихтовых материалов по радиусу печи. Выбор требуемой программы загрузки в этом случае может сопровождаться опробованием недостаточно рациональных решений и приводить к ухудшению показателей работы ДП. Определение корректирующих изменений в программе загрузки для получения заданного распределения  $\text{CO}_2$  по радиусу печи при помощи расчетного метода может существенно сократить количество апробируемых вариантов программ загрузки и упростить поиск рациональных решений.

Для решения этой задачи выполнена оценка взаимосвязи значений рудных нагрузок ( $R$ ) и содержания  $\text{CO}_2$  ( $\eta_{\text{CO}_2}$ ) по радиусу ДП. В качестве исходных данных использовались параметры режима загрузки и данные отборов газа за 16 периодов с декабря 2006 по ноябрь 2007 г. Указанные периоды характеризуются работой ДП с неизменной программой загрузки, а также постоянством температурно-дутьевого режима ДП.

При оценке этой взаимосвязи сопоставлялись значения рудных нагрузок и содержания  $\text{CO}_2$  в центрах десяти равных по площади кольцевых зон колошника. Значения рудных нагрузок определялись при помощи разработанной ИЧМ математической модели распределения шихтовых материалов на колошнике. Содержание  $\text{CO}_2$  в точках, соответствующих центрам

кольцевых зон (10 точек), определялось методом интерполяции результатов отбора проб газа в восьми точках.

В целом коэффициент корреляции ( $r$ ) величин  $R$  и  $\eta_{\text{CO}_2}$ , полученный при обработке всей выборки данных, за 16 периодов, составил 0,872 (рисунок).

При определении коэффициента корреляции по периодам работы с неизменной программой загрузки значения  $r$  находились в диапазоне 0,765–0,975 (в 75 % периодов коэффициент корреляции составлял более 0,9). Для оценки возможности аппроксимации зависимости содержания  $\text{CO}_2$  от рудной нагрузки и использования этой зависимости для расчета корректирующих воздействий определен коэффициент достоверности аппроксимации ( $r_0$ ) для различных видов аппроксимирующих функций (табл. 1).

Наиболее высокие значения коэффициента достоверности аппроксимации в большинстве периодов получены при аппроксимации зависимости степенной функцией вида  $y = a \cdot x^b$  ( $\eta_{\text{CO}_2} = a \cdot R^b$ ) – 0,83 ÷ 0,99. Максимальное среднее значение коэффициента достоверности аппроксимации (0,938) также получено при аппроксимации связи степенной функцией. Высокий коэффициент достоверности аппроксимации зависимости рудной нагрузки и содержания  $\text{CO}_2$  свидетельствует о принципиальной возможности использования зависимости  $\eta_{\text{CO}_2} = f(R)$  для расчетов корректирующего воздействия в виде изменения рудной нагрузки для получения требуемого распределения газа по радиусу ДП.

Вместе с тем, использование зависимости  $\eta_{\text{CO}_2} = f(R)$ , полученной за достаточно продолжительный интервал времени (более 10 мес.), для прогнозных расчетов корректирующих воздействий в виде изменения рудной нагрузки было бы некорректным, поскольку в течение этого периода существенно изменяются технологические параметры плавки, включая

## ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Таблица 1. Результаты определения взаимосвязи рудной нагрузки ( $x = R$ ) с содержанием  $CO_2$  ( $y = \eta_{CO_2}$ ) -  $\eta_{CO_2} = f(R)$  за период с 13.12.06 по 19.10.07 г.

№ периода	Вид зависимости				
	Линейная	Степенная	Логарифмическая	Экспоненциальная	Полиномиальная второго порядка
	$y = a \cdot x + c$	$y = a \cdot x^b$	$y = a \cdot \ln(x) + c$	$y = a \cdot e^{bx}$	$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$
Коэффициент достоверности аппроксимации ( $r_a$ )					
1	0,952	<b>0,978*</b>	0,935	0,964	0,952
2	0,945	<b>0,974</b>	0,958	0,934	0,964
3	0,933	<b>0,963</b>	0,923	0,952	0,933
4	0,905	<b>0,938</b>	0,905	0,920	0,907
5	0,875	0,901	0,895	0,869	<b>0,913</b>
6	0,839	0,872	0,858	0,844	<b>0,881</b>
7	0,905	<b>0,942</b>	0,901	0,931	0,905
8	0,900	<b>0,939</b>	0,893	0,929	0,900
9	0,886	0,915	0,907	0,884	<b>0,924</b>
10	0,911	<b>0,947</b>	0,913	0,932	0,914
11	0,935	<b>0,960</b>	0,938	0,942	0,939
12	0,923	<b>0,956</b>	0,910	0,951	0,926
13	0,916	<b>0,956</b>	0,905	0,944	0,916
14	0,765	<b>0,830</b>	0,785	0,799	0,803
15	0,920	<b>0,954</b>	0,902	0,949	0,921
16	0,975	<b>0,990</b>	0,981	0,961	0,984
Среднее значение	0,905	<b>0,938</b>	0,907	0,919	0,918

\* - максимальное значение в периоде

программу загрузки ДП и режим загрузки в целом. В этом случае величина требуемого изменения рудной нагрузки была бы получена с относительно грубым приближением.

Для разработки расчетного метода определения рудных нагрузок на колошнике и расчета требуемых корректирующих изменений в программе загрузки для получения заданного распределения  $CO_2$  по радиусу печи целесообразно использовать данные отбора проб газа, непосредственно предшествующие дате корректировки программы загрузки. Возможность использования текущих результатов отбора проб газа для указанных расчетов подтверждается оценкой взаимосвязи величин  $\eta_{CO_2}$  и  $R$  по данным газового анализа за одни-двое суток. При определении коэффициента достоверности аппроксимации в том случае, если отбор газа осуществлялся в течение двух смежных суток (как правило, с использованием всех четырех газоотборных машин М1-М4), использовались усредненные показатели распределения  $CO_2$  по всем четырем радиусам измерений. Если отбор проб газа осуществлялся с разрывом во времени, то для оценки использовались усредненные суточные параметры распределения газа по двум радиусам печи. Результаты оценки взаимосвязи величин рудной нагрузки и содержания  $CO_2$  по радиусу печи, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о наличии достаточно тесной и устойчивой связи между исследуемыми параметрами и о возможности использования текущих показателей распределения состава газа по радиусу для расчетного определения корректирующих изменений рудной нагрузки.

Как следует из результатов, приведенных в табл. 2, в исследованных периодах при использовании в ка-

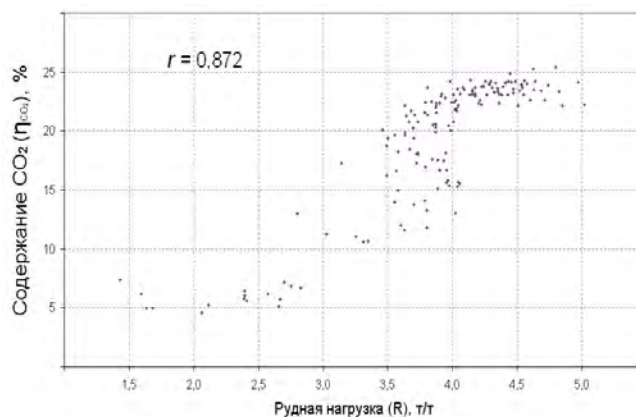


Рисунок. Зависимость содержания  $CO_2$  ( $\eta_{CO_2}$ ) от рудной нагрузки ( $R$ ) в кольцевых зонах колошника доменной печи

честве аппроксимирующей функции степенной зависимости величин  $\eta_{CO_2}$  и  $R$  коэффициент достоверности аппроксимации величин более, чем в 85 % периодов был выше 0,9 (при этом ни в одном из периодов не опускался ниже 0,82), а в 39 % периодов составлял 0,95 и более.

Следует отметить, что непосредственное использование функции  $\eta_{CO_2} = a \cdot R^b$  для расчета абсолютных значений содержания  $CO_2$  по значениям рудной нагрузки допустимо только в узком диапазоне изменения исходных значений рудных нагрузок. В связи с этим при разработке расчетного метода определения корректирующих изменений в программе загрузки для получения требуемого распределения рудных нагрузок и распределения  $CO_2$  по радиусу печи указанные зависимости целесообразно использовать для определения величины требуемого относительного изменения рудной нагрузки по заданному изменению содержания  $CO_2$  в определенной зоне колошника.

Таблица 2. Значения коэффициента достоверности аппроксимации ( $r_a$ ) взаимосвязи величин рудной нагрузки и содержания  $CO_2$  по радиусу печи степенной функцией

№ п/п	Дата	Коэффициент достоверности аппроксимации ( $r_a$ )	№ п/п	Дата	Коэффициент достоверности аппроксимации ( $r_a$ )
1	14-15.12.06 г.	0,984	35	07-08.05.07 г.	0,908
2	18-19.12.06 г.	0,971	36	10.05.2007 г.	0,905
3	26.12.2006 г.	0,965	37	14-15.05.07 г.	0,927
4	29.12.2006 г.	0,957	38	16-17.05.07 г.	0,910
5	04-05.01.07 г.	0,977	38	18.05.2007 г.	0,907
6	09.01.2007 г.	0,967	40	21.05.2007 г.	0,910
7	15-16.01.07 г.	0,964	41	22-23.05.07 г.	0,935
8	17-18.01.07 г.	0,963	42	24-25.05.07 г.	0,949
9	19.01.2007 г.	0,923	43	28.05.2007 г.	0,949
10	22-23.01.07 г.	0,948	44	29.05.2007 г.	0,958
11	24-25.01.07 г.	0,929	45	31-01.06.07 г.	0,958
12	29-30.01.07 г.	0,930	46	04-05.06.07 г.	0,962
13	05-06.03.07 г.	0,888	47	06-07.06.07 г.	0,952
14	07.03.2007 г.	0,878	48	08-09.06.07 г.	0,953
15	09.03.2007 г.	0,905	49	13-14.06.07 г.	0,965
16	12-13.03.07 г.	0,887	50	15.06.2007 г.	0,947
17	14-15.03.07 г.	0,898	51	18-19.06.07 г.	0,960
18	16.03.2007 г.	0,930	52	20-21.06.07 г.	0,943
19	19-20.03.07 г.	0,882	53	22.06.2007 г.	0,929
20	21-22.03.07 г.	0,862	54	25-26.06.07 г.	0,945
21	23.03.2007 г.	0,865	55	27.06.2007 г.	0,955
22	02-03.04.07 г.	0,930	56	05-06.07.07 г.	0,959
23	04-05.04.07 г.	0,942	57	09-10.07.07 г.	0,950
24	06.04.2007 г.	0,931	58	10-11.09.07 г.	0,818
25	09-10.04.07 г.	0,937	59	12-13.09.07 г.	0,818
26	11-12.04.07 г.	0,925	60	13-14.09.07 г.	0,829
27	13.04.2007 г.	0,936	61	27-28.09.07 г.	0,968
28	16-17.04.07 г.	0,927	62	01-02.10.07 г.	0,951
29	18-19.04.07 г.	0,962	63	03-04.10.07 г.	0,939
30	23.04.2007 г.	0,938	64	15-16.10.07 г.	0,992
31	25-26.04.07 г.	0,937	65	16-17.10.07 г.	0,986
32	28.04.2007 г.	0,936	66	17-18.10.07 г.	0,981
33	02-03.05.07 г.	0,917	67	18-19.10.07 г.	0,982
34	04.05.2007 г.	0,917			
Среднее значение			0,933		

Требуемое изменение рудной нагрузки в  $i$ -й зоне колошника может быть определено по формуле

$$\Delta R_i = \left( \frac{\eta_{CO_2 zi}}{a} \right)^{\frac{1}{b}} - \left( \frac{\eta_{CO_2 fi}}{a} \right)^{\frac{1}{b}}, \quad (1)$$

где  $\eta_{CO_2 zi}$  - заданное значение содержания  $CO_2$  в  $i$ -й кольцевой зоне колошника, %;  $\eta_{CO_2 fi}$  - фактическое (исходное) значение содержания  $CO_2$  в  $i$ -й кольцевой зоне колошника, %;  $a$  и  $b$  - численные коэффициенты аппроксимирующей зависимости.

Оценка возможного диапазона изменения значений величины  $\Delta R_i$  в отдельных зонах колошника при заданном изменении содержания  $CO_2$  на  $\pm 2$  % показала, что требуемое расчетное изменение рудной нагрузки в конкретной зоне может составить  $\pm 0,1 \div \pm 0,5$  в зависимости от исходных программы загрузки и

распределения содержания  $CO_2$ , а также избранной для корректировки зоны и направления изменения содержания  $CO_2$ .

При неизменном количестве кокса в этой зоне, для изменения рудной нагрузки на  $\pm 0,1 \div \pm 0,5$  необходимо скорректировать массу железорудных материалов, загружаемых в эту зону за цикл загрузки, в пределах  $\pm 0,2 \div \pm 1,6$  %.

При этом абсолютная величина расчетного корректирующего воздействия  $\Delta R_i$  монотонно убывает по направлению от оси к периферии колошника. Конкретное значение корректирующего воздействия определяется текущей взаимосвязью исходной программы загрузки и распределения содержания  $CO_2$  по радиусу печи, а также расположением избранной для корректировки зоны колошника.

Результаты выполненной оценки взаимосвязи

значений рудных нагрузок и содержания  $\text{CO}_2$  по радиусу ДП подтверждают наличие устойчивой зависимости этих параметров, позволяют осуществить обоснованный выбор аппроксимирующей функции, обеспечивающей максимальный коэффициент достоверности аппроксимации, и могут использоваться в качестве расчетного метода при разработке алгоритма расчета требуемых корректирующих изменений в программе загрузки для получения заданного распределения  $\text{CO}_2$  по радиусу печи.

### Выводы

Выполненная оценка взаимосвязи значений рудной нагрузки и содержания  $\text{CO}_2$  в кольцевых зонах колошника по результатам обработки выборки данных за длительный период показала, что зависимость этих параметров характеризуется высоким коэффициентом корреляции 0,905. Устойчивость связи подтверждается результатами оценки аппроксимации зависимости содержания  $\text{CO}_2$  от рудной нагрузки сте-

пенной функцией - значения коэффициента достоверности аппроксимации ( $r_p$ ) по периодам работы доменной печи с неизменной программой загрузки находились в диапазоне 0,83-0,99. Высокий коэффициент достоверности аппроксимации зависимости рудной нагрузки и содержания  $\text{CO}_2$  свидетельствует о принципиальной возможности использования зависимости  $\eta_{\text{CO}_2} = f(R)$  для разработки алгоритмов расчета корректирующих воздействий в виде изменения рудной нагрузки для получения требуемого распределения газа по радиусу доменной печи.

### Библиографический список

1. Большаков В.И. Теория и практика загрузки доменных печей. – М.: Металлургия, 1990. – 256 с.
2. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. – К.: Наукова думка, 2007. – 411 с.

Поступила 13.05.09

УДК 338:669.162

Производство

Шеремет В.А. /к.т.н./, Кекух А.В. /к.т.н./, Колесник А.А., Костенко Г.П., Оторвин П.И. /к.т.н./, Лялюк В.П. /д.т.н./, Нынь С.В.

ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

## Опыт эксплуатации и реконструкции доменной печи объемом 2700 м<sup>3</sup>

*Обобщен опыт эксплуатации доменной печи объемом 2700 м<sup>3</sup> со дня задувки. Выполнен анализ причин, вызвавших необходимость проведения капитальных ремонтов и всех конструктивных изменений во время их проведения. Табл. 1.*

**Ключевые слова:** доменная печь, реконструкция, капремонт, производительность, кокс

*Experience of blast furnace operation with 2700 m<sup>3</sup> holding capacity starting from its blowing-in date is generalized. The reasons for major overhauls and all engineering changes required are analyzed.*

**Keywords:** blast furnace, reconstruction, major overhaul, productivity, coke

Доменная печь № 8 (ДП) полезным объемом 2700 м<sup>3</sup> построена по типовому проекту Укрگیпромеца и введена в эксплуатацию 27 октября 1967 г. с проектной мощностью 1900 тыс. т чугуна в год. Печь имела 20 воздушных фурм, два обособленных литейных двора, каждый из которых был оборудован одной чугунной и одной шлаковой летками. Охлаждение шахты, заплечиков, фурменной зоны, горна (за исключением района чугунных леток) и лещади осуществлялось плитовыми холодильниками на пароиспарительном охлаждении. Плитовые холодильники горна в районе чугунных леток имели водяное охлаждение.

За время эксплуатации проведены следующие капитальные ремонты.

1971 г. (май) - капитальный ремонт I разряда. Продолжительность кампании – 3,5 г. Основной причиной остановки на ремонт явилось разрушение огнеупорной кладки горна и лещади, что привело к

двум прорывам горна – в марте 1970 и апреле 1971 г. Во время ремонта полностью заменена огнеупорная футеровка и система охлаждения горна и лещади. В сентябре 1971 г. снова произошел прорыв горна.

1973 г. (март-апрель) – капитальный ремонт I разряда. Продолжительность кампании – 2 г. Во время ремонта были выполнены следующие основные конструктивные изменения: увеличили количество воздушных фурм до 24; выполнили реконструкцию горна с установкой 3 чугунных леток и 1 шлаковой, с увеличением толщины огнеупорной футеровки на уровне оси чугунных леток с 990 до 1235 мм; система охлаждения лещади, горна и фурменной зоны переведена на водяное охлаждение. В октябре 1978 г. в результате износа футеровки углеродистых блоков горна прогорел горновой холодильник № 10.

1981 г. (август-сентябрь) – капитальный ремонт I разряда. Продолжительность кампании – 8,3 г. Во