

**В.И.Большаков, И.Г.Муравьева, Ю.С.Семенов, Ф.М.Шутылев**

**МЕТОД ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ  
В ЗОНАХ СЕЧЕНИЯ КОЛОШНИКА  
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПРОФИЛЕМЕРА**

Рекомендован метод оценки распределения материалов по радиусу колошника с использованием данных профилемера, основанный на взаимосвязи распределения рудной нагрузки в зонах сечения колошника и отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса. Метод может быть использован для оперативного контроля радиального распределения шихты и газового потока в печи.

**доменная печь, распределение материалов, профилемер, рудная нагрузка**

**Современное состояние вопроса и постановка задачи.**

Основными показателями, характеризующими распределение шихтовых материалов и газового потока по радиусу сечения колошника, являются величины рудных нагрузок и объемов в равновеликих кольцевых зонах радиуса [1]. Значение рудной нагрузки определяется отношением масс железосодержащих компонентов и кокса. Масса выгруженных за цикл загрузки железосодержащих материалов и кокса определена программой загрузки, а распределение толщин слоев зависит как от объема образованных слоев, так и насыпного веса выгружаемых материалов. Если первая составляющая масс – толщина слоя материала может быть определена с помощью установленного на печи профилемера, т.к. объем выгруженного материала может быть выражен произведением  $h_i \cdot S_i$  ( $h_i$  – толщина слоя,  $S_i$  – площадь зоны сечения колошника), то вторая – насыпной вес является неизвестной величиной в связи с тем, что при выгрузке шихты в печь она уплотняется и ее насыпной вес изменяется в зависимости от угла наклона лотка и профиля засыпи шихты. Задачей исследования являлся выбор метода оперативной оценки распределения материалов на колошнике доменной печи, основанного на информации профилемера.

**Изложение основных материалов исследования.**

Для оценки распределения материалов в зонах сечения колошника на основе данных, полученных с помощью профилемера, были опробованы несколько способов. Для оценки их достоверности получаемые данные сопоставлялись с распределением доли  $\text{CO}_2$  в радиальном газе, которое является одним из основных технологических параметров, контролируемых в ходе плавки и характеризующих изменение радиального распределения шихты и газового потока в печи. По нему, в основном, осуществляется контроль и адаптация режимов загрузки, методов расчета и моделей оценки показателей радиального распределения шихтовых материалов.

Первый способ включает оценку распределения шихтовых материалов по сечению колошника на основе показателя, определяемого соотношением толщин слоев железосодержащих материалов и кокса, образован-

ных за цикл загрузки. Основанием для этого явился анализ результатов исследований, выполненных на зарубежных доменных печах с использованием измерений профиломерами различных конструкций [2, 3]. В работе [2] с использованием данных о профиле поверхности засыпи шихты рассчитывается толщина слоев, на основе которой определяется отношение толщин слоев руда/кокс, являющееся характеристикой распределения материалов в цикле загрузки.

Результаты исследований использования отношения толщин слоев железосодержащих материалов и кокса в качестве показателя распределения по радиусу колошника печи, выполненных для трех периодов работы ДП №9 *I* – 14.01.08 г., *II* – 15.01.08 г. и *III* – 30.05.08 г. (параметры и показатели работы печи приведены в табл. 1 и 2 и рис. 1) показали следующее. Коэффициенты корреляции функциональной взаимосвязи ( $Y=A+BX$ ) показателей распределения, рассчитанных по отношению высот слоев, определенных по показаниям профиломера и радиальным распределением  $CO_2$  в печи составили: для периода *I* – 0,947, *II* – 0,973 и *III* – –0,110.

Следует отметить, что отсутствие взаимосвязи показателей распределения, рассчитанных по отношению высот слоев, определенных по показаниям профиломера и радиальным распределением  $CO_2$  в печи в третьем исследуемом периоде вызвано увеличением до  $62,4 \text{ м}^3/\text{мин м}^2$  величины выхода колошникового газа ( $V_{\text{кг}}^{S_{\text{к}}P_{\text{к}}}$ ) на  $1 \text{ м}^2$  площади колошника ( $S_{\text{к}}$ ) при установленном давлении колошникового газа ( $P_{\text{к}}$ ) и выходом ее за допустимый диапазон –  $48\text{--}55 \text{ м}^3/\text{мин м}^2$ , при котором достигается наиболее стабильный сход шихты [4]. Таким образом, показано, что этот способ оценки изменения показателей распределения по радиусу колошника применим при работе печи с указанной нормой выхода колошникового газа на единицу площади колошника при установленном  $P_{\text{к}}$ .

Во втором способе обоснованием возможности расчета показателя радиального распределения материалов по изменению скоростей опускания шихтовых материалов в зонах явилась установленная обратная связь отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса и скорости опускания шихты. Указанная зависимость ( $Y=A+Bx$ ), для которой коэффициент корреляции составил  $r_{x,y} = -0,94$ , была получена в результате анализа параметров состояния поверхности засыпи шихты на колошнике ДП №9 в течение двух суток при постоянной программе загрузки и близких параметрах дутьевого режима плавки (периоды *I* и *II*). При этом, величины отношений высот слоев и скоростей опускания шихты определялись в среднем за цикл загрузки печи (рис. 2).

Таким образом, показатели распределения в каждой измеряемой зоне сечения колошника могут быть рассчитаны как величины, обратно пропорциональные скоростям опускания поверхности шихты.

Результаты расчета радиального распределения материалов по скоростям опускания поверхности шихты представлены в табл. 2 и на рис. 1. Коэффициенты корреляции функциональной взаимосвязи показателей

распределения, рассчитанных по скоростям опускания поверхности шихты с распределением объемной доли  $\text{CO}_2$  в радиальном газе составили: для периода *I* – 0,677, *II* – 0,679 и *III* – 0,859.

Результаты расчета радиального распределения материалов по скоростям опускания поверхности шихты представлены в табл.2 и на рис.1. Коэффициенты корреляции функциональной взаимосвязи показателей распределения, рассчитанных по скоростям опускания поверхности шихты с распределением объемной доли  $\text{CO}_2$  в радиальном газе составили: для периода *I* – 0,677, *II* – 0,679 и *III* – 0,859.

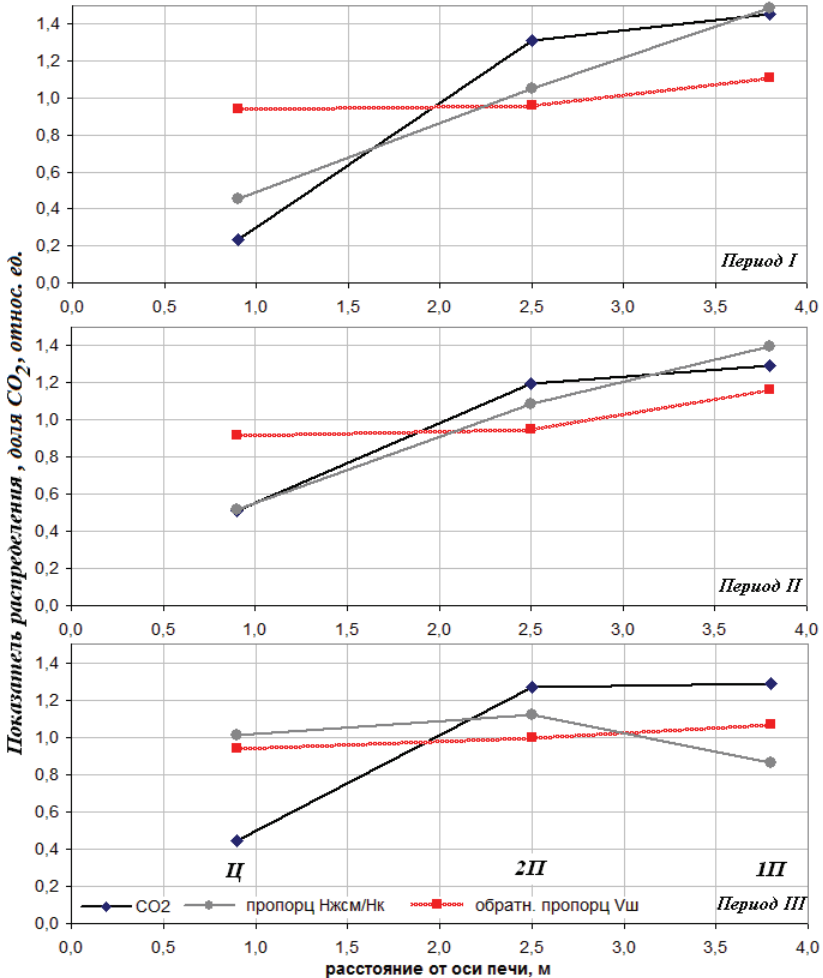


Рис. 1. Распределение показателей распределения и доли  $\text{CO}_2$  в газе по радиусу колошника для трех исследуемых периодов работы ДП №9

Таблица 1. Показатели дутьевого и газодинамического режимов работы ДП №9 для трех исследуемых периодов

Параметры, показатели		I – 14.01.2008	II – 15.01.2008	III – 30.05.2008
Приведенный расход дутья	$F_{пр}, \text{ м}^3/\text{мин}$	7912	8143	8337
Расход природного газа	$Q_{пг}, \text{ м}^3/\text{мин}$	573	559	530
Содержание $O_2$ в холодном дутье	$[O_2], \%$	26,3	26,0	27,3
Температура горячего дутья	$T_{гд}, \text{ }^\circ\text{C}$	1078	1042	1107
Давление горячего дутья	$P_{гд}, \text{ ати}$	3,60	3,68	2,99
Скорость дутья	$V_{д}, \text{ м/с}$	197,2	193,2	228,4
Расход дутья на $1 \text{ м}^2$ колошника	$q, \text{ м}^3/\text{мин}/\text{м}^2$	86,4	88,9	91,0
Выход колошникового газа	$V_{кг} 1\text{м}^2 S_{к} \text{ при } P_{к}$	50,52	50,40	62,39
Давление под колошником	$P_{к}, \text{ ати}$	1,61	1,70	1,14
Перепад давления общий	$\Delta P_{общ}, \text{ ати}$	1,96	1,95	1,83
Перепад давления верхний	$\Delta P_{в}, \text{ ати}$	0,45	0,43	0,36
Перепад давления нижний	$\Delta P_{н}, \text{ ати}$	1,51	1,52	1,47
Теоретическая температура	$T_{f}, \text{ }^\circ\text{C}$	2091	2092	2224
$V_{кг} \frac{S_{к} P_{к}}{P_{H_{общ}}}$	$\frac{\text{нм}^3 \cdot \text{мин}/\text{м}^2}{\text{т/т}}$	13,8	14,4	18,1

Сопоставление коэффициентов корреляции взаимосвязи показателей распределения, рассчитанных двумя способами, с долей  $CO_2$  в радиальном газе показывает, что наибольшие их значения характерны для первого предлагаемого способа.

Таблица 2. Показатели рационального распределения шихты и газового потока для трех исследуемых периодов работы ДП №9

Параметры, показатели	Единицы измерения	Период работы печи											
		I – 14.01.2008				II – 15.01.2008				III – 30.05.2008			
		3,80	2,5 0	0,9 0	ср	3,80	2,50	0,90	ср	3,80	2,50	0,90	ср
Расстояние от оси печи	м	3,655											
Общая средняя рудная нагрузка	т/т	3,505											
Отношение высот слоев железосодержащих материалов и кокса, $H_{жсв}/H_k$	$\frac{ед}{отн. ед}$	$\frac{0,986}{1,490}$	$\frac{0,699}{1,055}$	$\frac{0,302}{0,455}$	<b><math>\frac{0,662}{1,000}</math></b>	$\frac{0,935}{1,395}$	$\frac{0,730}{1,089}$	$\frac{0,346}{0,516}$	<b><math>\frac{0,670}{1,000}</math></b>	$\frac{0,78}{0,866}$	$\frac{1,01}{1,122}$	$\frac{0,91}{1,013}$	<b><math>\frac{0,897}{1,000}</math></b>
Рудные нагрузки, рассчитанные пропорционально $H_{жсв}/H_k$	$\frac{т/т}{отн. ед}$	$\frac{5,444}{1,490}$	$\frac{3,856}{1,055}$	$\frac{1,665}{0,455}$	<b><math>\frac{3,655}{1,000}</math></b>	$\frac{4,888}{1,395}$	$\frac{3,818}{1,089}$	$\frac{1,809}{0,516}$	<b><math>\frac{3,505}{1,000}</math></b>	$\frac{2,981}{0,866}$	$\frac{3,863}{1,122}$	$\frac{3,488}{1,013}$	<b><math>\frac{3,444}{1,000}</math></b>
Скорости опускания шихты $I_{ш}$	м/мин	0,080	0,092	0,094	<b>0,089</b>	0,053	0,065	0,067	<b>0,062</b>	0,084	0,090	0,096	<b>0,090</b>
Рудные нагрузки, рассчитанные обротно пропорционально $I_{ш}$	$\frac{т/т}{отн. ед}$	$\frac{4,051}{1,108}$	$\frac{3,522}{0,964}$	$\frac{3,447}{0,943}$	<b><math>\frac{3,673}{1,005}</math></b>	$\frac{4,078}{1,164}$	$\frac{3,325}{0,949}$	$\frac{3,226}{0,920}$	<b><math>\frac{3,543}{1,011}</math></b>	$\frac{3,690}{1,071}$	$\frac{3,444}{1,000}$	$\frac{3,229}{0,938}$	<b><math>\frac{3,454}{1,003}</math></b>
Объемная доля $CO_2$ в радиальном газе	$\frac{\%}{отн. ед}$	$\frac{20,34}{1,453}$	$\frac{18,37}{1,312}$	$\frac{3,29}{0,235}$	<b><math>\frac{13,998}{1,000}</math></b>	$\frac{21,32}{1,293}$	$\frac{19,69}{1,194}$	$\frac{8,46}{0,513}$	<b><math>\frac{16,491}{1,000}</math></b>	$\frac{21,63}{1,289}$	$\frac{21,23}{1,266}$	$\frac{7,47}{0,445}$	<b><math>\frac{16,776}{1,000}</math></b>
Рудные нагрузки, рассчитанные на модели РРШ	$\frac{т/т}{отн. ед}$	$\frac{3,239}{1,065}$	$\frac{3,857}{1,268}$	$\frac{2,027}{0,666}$	<b><math>\frac{3,041}{1,000}</math></b>	$\frac{3,045}{1,044}$	$\frac{3,561}{1,221}$	$\frac{2,142}{0,735}$	<b><math>\frac{2,916}{1,000}</math></b>	$\frac{3,613}{1,245}$	$\frac{3,404}{1,173}$	$\frac{1,690}{0,582}$	<b><math>\frac{2,902}{1,000}</math></b>

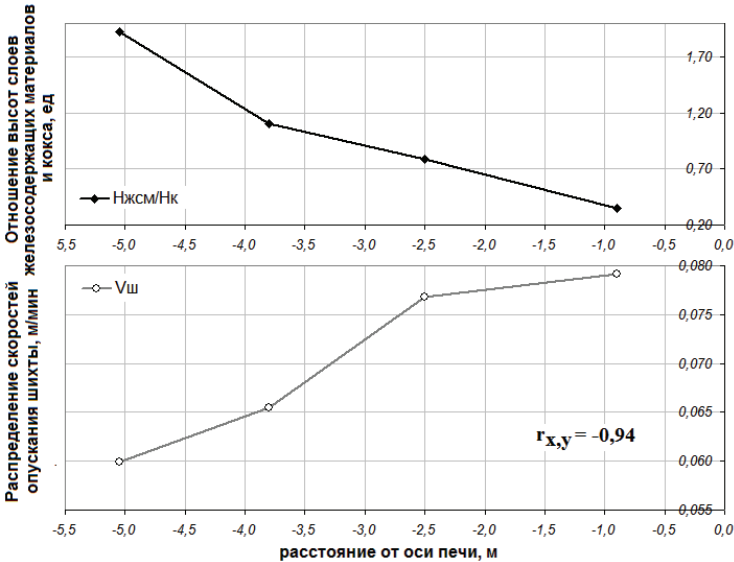


Рис.2. Изменение отношения толщин слоев железосодержащих материалов и кокса и скоростей опускания шихты по радиусу колошника ДП №9.

Оценка согласованности результатов расчета показателей распределения с помощью предложенных способов с результатами математического моделирования с использованием разработанной в ИЧМ модели радиального распределения шихты (табл.2 и рис.1) показала, что наибольшие значения коэффициентов корреляции характерны для взаимосвязи рудных нагрузок, рассчитанных с помощью математической модели, с отношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса.

Так, для периода *I* коэффициент корреляции составляет: 0,903; для периода *II* – 0,885 и для периода *III* – 0,997. Взаимосвязь отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса с показателями распределения, рассчитанными обратно пропорционально изменению значений скоростей опускания шихты в зонах сечения колошника, характеризуется следующими коэффициентами корреляции: период *I* – 0,877; период *II* – 0,830; период *III* – –0,604.

Обычно программа загрузки определяется расчетным путем [1] с помощью математической модели, а затем ее уточняют по косвенным данным о распределении шихтовых материалов – химсоставу газов и их температуры по радиусу печи. Как показали исследования, рассчитанные с помощью модели рудные нагрузки, не в достаточной степени соответ-

ствуют реальному их распределению. Таким образом, измерение профиля засыпи шихты и установление параметров, расчет которых с помощью информации профилемера позволит приблизить определение показателей распределения шихты на колошнике печи к реальным их значениям, представляется целесообразным. Установленная взаимосвязь отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса, рассчитываемых на основе информации профилемера и полученных с помощью модели рудных нагрузок, позволяет использовать отношение высот для уточнения расчета рудных нагрузок в зонах сечения колошника и последующего регулирования распределения шихтовых материалов. Для этого может быть введено понятие показателя объемного фактора рудной нагрузки в зоне сечения колошника – отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса. С учетом предложенного показателя может быть развито предложенное сотрудниками ИЧМ [1] выражение для определения средней рудной нагрузки в цикле загрузки:

$$R = \frac{\rho \sum \frac{R_i \delta_i}{\rho + R_i}}{1 - \sum \frac{R_i \delta_i}{\rho + R_i}} \quad (1)$$

где  $R_i$  – рудная нагрузка в кольцевой зоне колошника, т/т;  $\rho$  – отношение насыпных масс железосодержащих материалов и кокса, ед;  $\delta_i$  – доля объема материала от общего объема, загруженного за цикл в равновеликой кольцевой зоне колошника, ед.

Если площадь колошника  $S_{\text{сш}} = n \cdot S_i$

где  $n$  – число равновеликих кольцевых зон;  $S_i$  – площадь кольцевой зоны;  $S_{\text{сш}}$  – площадь колошника;

доля объема материала от общего объема ( $V$ ), загруженного за цикл в равновеликой кольцевой зоне колошника  $\delta_i = \frac{V_i}{V}$ ;

где  $V_i = V_{\text{а.н.}i} + V_{\text{к.}i} = h_{\text{а.н.}} \cdot S_i + h_{\text{к.}} \cdot S_i$ ;  $V = h_{\text{нб}} \cdot S_{\text{сш}} = h_{\text{нб}} \cdot n \cdot S_i$

при  $V_{\text{а.н.}i} = h_{\text{а.н.}i} \cdot S_i$ ;  $V_{\text{к.}i} = h_{\text{к.}i} \cdot S_i$ :

$$\frac{h_{\text{а.н.}i}}{h_{\text{к.}i}} = \frac{V_{\text{а.н.}i}}{V_{\text{к.}i}};$$

$$\delta_i = \frac{h_{\text{а.н.}i} + h_{\text{к.}i}}{h_{\text{нб}} \cdot n};$$

То формула (1) может быть выражена через высоты слоев железосодержащих материалов ( $h_{\text{а.н.}}$ ) и кокса ( $h_{\text{к.}}$ ) следующим образом:

$$R = \frac{\rho \sum \frac{R_i \cdot (h_{\text{а.н.}_i} + h_{\text{е}_i})}{(\rho + R_i) h_{\text{н0}} \cdot n}}{1 - \sum \frac{R_i \cdot (h_{\text{а.н.}_i} + h_{\text{е}_i})}{(\rho + R_i) h_{\text{н0}} \cdot n}} \quad (2)$$

Таким образом, уточнение выражения для расчета средних за цикл загрузки рудных нагрузок на основе полученных профилемером данных о высотах слоев в зонах сечения колошника позволит учесть различный характер опускания шихтовых материалов по радиусу колошника путем учета относительной скорости опускания шихтовых материалов по радиусу печи, выраженную в аналитической зависимости (2) через высоты слоев железосодержащих материалов и кокса.

**Вывод.** Установленная взаимосвязь показателей распределения шихтовых материалов в зонах сечения колошника с распределением объемной доли  $CO_2$  в газе и рудных нагрузок, рассчитанных с помощью модели ИЧМ, позволяет рекомендовать метод оценки распределения материалов по радиусу колошника с использованием данных профилемера, основанный на взаимосвязи распределения рудной нагрузки в зонах сечения колошника и отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса, который может быть использован для оперативного контроля радиального распределения шихты и газового потока в печи.

1. *Большаков В.И.* Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки / Большаков В.И. – К.: Наукова думка, 2007. – 412 с.
2. *Регулирование* газового потока в доменной печи с использованием измерителя профиля засыпи и горизонтального зонда в столбе шихты / F. Bordemann, W.H.Hartig, H.I.Grisse, e.a. // – Новости черной металлургии. – 1996. – №4. – С.35–40.
3. *Повышение* производительности доменных печей / В.Хартиг, К.Лангнер, Г.Б. Люнген, К.П.Штрикер.– Черные металлы. – 1996. – №12. – С.17–25.,
4. *Заявка № а 2010 03948.* Способ ведения доменной плавки от 06.04.2010 г.

*Статья рекомендована к печати канд.техн.наук Н.М.Можаренко*

**Большаков В.И., Муравйова И.Г., Семенов Ю.С., Шутилев Ф.М.**

**Метод оперативної оцінки розподілу матеріалів у зонах перерізу колошника на основі даних профілемера**

Рекомендовано метод оцінки розподілу матеріалів по радіусу колошника з використанням даних профілемера, заснований на взаємозв'язку розподілу рудного навантаження у зонах перерізу колошника і відносини висот шарів залізовмісних матеріалів і коксу, який може бути використаний для оперативного контролю радіального розподілу шихти та газового потоку в печі.