

Большаков В. И. /д. т. н./, Лебедь В. В.,
Жеребецкий А. А.
ИЧМ НАН Украины

Методика расчета параметров потока шихтовых материалов

Представлены методические основы расчета параметров потока шихтовых материалов при сходе их с лоткового распределителя бесконусного загрузочного устройства. Полученные результаты использованы для разработки усовершенствованной инженерной методики расчета показателей распределения шихты по кольцевым зонам колошника доменной печи. Ил. 7. Табл. 4. Библиогр.: 5 назв.

Ключевые слова: доменная печь, бесконусное загрузочное устройство, методика, лотковый распределитель, параметры потока, показатели распределения, шихтовые материалы, кольцевые зоны

Methodological bases for calculation of parameters of charge materials flow during their turnoff from chute distributor of bell-less top are presented. The results obtained are used for development of improved engineering calculation practice for indicator of distribution of burden materials across the annular zones of blast-furnace mouth.

Keywords: blast furnace, bell-less top, methodology, chute distributor, flow parameters, indicators of distribution, charge materials, annular zones

Современное состояние вопроса

Бесконусные загрузочные устройства (БЗУ) с лотковыми распределителями обладают широкими возможностями управления распределением шихтовых материалов на колошнике [1]. Для рационального и оперативного использования этих возможностей необходимо совершенствовать методические основы расчета показателей распределения шихты в доменной печи. Достоверная информация о фактическом распределении шихты по сечению печи необходима для обоснованного выбора управляющих воздействий на ход плавки путем создания и обоснования рациональной программы загрузки.

В начале 80-х гг. в Институте черной металлургии были разработаны основные положения методики расчета [1], которые в настоящее время преобразованы в инженерную методику расчета показателей распределения шихтовых материалов по радиусу колошника. Методика позволяет на основе параметров программы загрузки оперативно оценить характер распределения шихтовых материалов по радиусу колошника доменной печи, оборудованной БЗУ. Расчет показателей распределения ведется по данным о количестве различных шихтовых материалов, выгружаемых в печь из определенных угловых позиций лоткового распределителя. Эффективность и целесообразность применения рассчитанных по инженерной методике показателей распределения для сравнительной оценки программ загрузки подтверждены практикой [2, 3].

Основными факторами, влияющими на точность результатов расчета, являются ширина

потока материалов при движении от лотка до поверхности засыпи, распределение интенсивности (плотности) потока по его сечению, формирование засыпи вблизи колошниковой защиты, движение материалов по откосу поверхности засыпи и смещение кокса при выгрузке на него железорудных материалов и др.

Для учета ширины потока исследователями ИЧМ в алгоритме инженерной методики при расчете показателей распределения было принято допущение (на основе результатов предпусковых исследований на доменной печи полезным объемом 5000 м³ с радиусом колошника 5,4 м), что ширина потока материалов является постоянной для всех угловых положений лоткового распределителя (и составляет около 1,0 м), а плотность потока в горизонтальном сечении распределена равномерно [4]. Однако, установка БЗУ на доменные печи значительно меньшего объема, а также увеличение вариантов конструктивных исполнений загрузочного аппарата и распределительного лотка, привели к необходимости уточнения данного параметра.

В настоящей работе рассмотрены вопросы расчета ширины потока шихтовых материалов и распределения его плотности.

Изложение основных материалов исследований

Ширина потока определяется расходом шихтовых материалов при выгрузке их из бункера, конструктивными особенностями лотка и его футеровки, скоростью вращения и углом наклона лотка, и другими факторами.

На рис. 1 представлено схематическое движение материала по распределительному лотку.

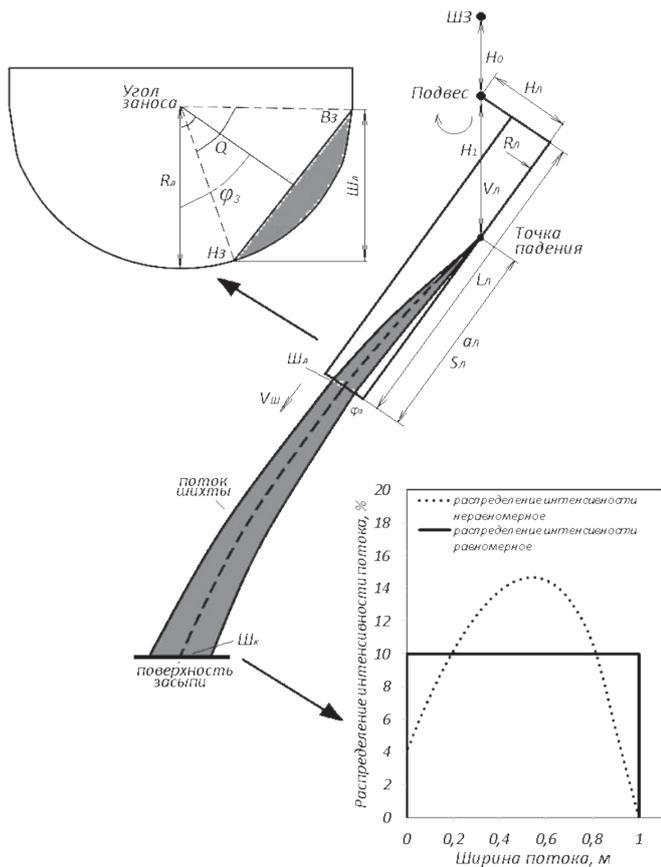


Рис. 1. Схематическое представление движения потока материалов по распределительному лотку: Ш_л – ширина потока на выходном торце лоткового распределителя; Ш_к – ширина потока на поверхности засыпи колошника; H_з, B_з – нижняя и верхняя границы потока материалов, который заносится на борт лотка; Q – угол между границами потока шихтовых материалов; ШЗ – шихтовый затвор; H₀ – высота от ШЗ до подвеса лоткового распределителя; H_л – высота лотка; R_л – радиус лотка; L_л – длина лотка; H₁ – высота от подвеса лотка до точки падения материала на его поверхность; S_л – расстояние от точки падения материала на лоток до его выходного торца; а_л – ускорение движения материала на отрезке лотка S_л; φ₃ – угол заноса материала на борт лотка; V_ш – скорость отрыва шихтовых материалов с выходного торца лотка

Для определения распределения плотности потока по его ширине на поверхности засыпи колошника было принято допущение, что характер этого распределения соответствует особенностям распределения плотности на выходном торце распределительного лотка. При этом, зная ширину потока на распределительном лотке (Ш_л) можно определить ее величину на рабочем уровне засыпи на колошнике (Ш_к) путем использования коэффициента расширения потока материалов (k_{рп}), который по визуальным на-

блюдениям на многочисленных предпусковых исследованиях составляет ~ 2:

$$k_{рп} = \frac{Ш_к}{Ш_л} = 2.$$

Известно, что материал, движущийся по поверхности лоткового распределителя, под действием кориолисовой силы заносится на борт лотка противоположного направлению вращения. Угол заноса материала на борт лотка (φ₃), прежде всего, зависит от длины лотка (L_л) и угла его наклона (α_л). На рис. 2 представлены зависимости угла заноса материала на борт лотка от угла его наклона и длины, которые были получены с помощью математической модели ИЧМ [5]. Для упрощения расчетов эти зависимости были аппроксимированы полиномами второй степени по 3 точкам, координаты которых определяются как функция, зависящая от длины лотка и угла наклона:

$$[x_{m_n}; y_{m_n}] = f(L_l; \alpha_l).$$

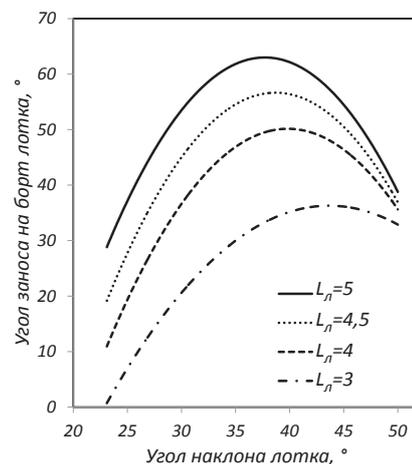


Рис. 2. Зависимость угла заноса материала на борт лотка от угла его наклона

Зная координаты указанных точек, используя метод наименьших квадратов, определялись коэффициенты A₀, A₁, A₂ полинома. Таким образом, угол заноса на борт лоткового распределителя (для определенной длины лотка) определяется как

$$\phi_3 = A_2 \cdot \alpha_l^2 + A_1 \cdot \alpha_l + A_0.$$

Ширина проекции сечения потока шихтовых материалов на условную плоскость параллельную вертикальной оси лотка (см. рис. 1) Ш_л определяется как проекция отрезка между крайними точками нижней (H_з) и верхней (B_з) границ занесенного потока:

$$Ш = H_з - B_з = R_{л} \cdot \left(\cos \left(\phi_3 - \frac{Q}{2} \right) - \cos \left(\phi_3 + \frac{Q}{2} \right) \right),$$

где R_л – радиус лотка, φ₃ – угол заноса на борт лотка, Q – угол между границами потока ших-

товых материалов на выходном торце лоткового распределителя.

Угол Q и отрезки-радиусы, проведенные от центральной оси лотка до пересечения с его поверхностью, определяют нижнюю и верхнюю границы потока материалов (см. рис. 1). Из вышеуказанного выражения вывести формулу в явном виде для определения угла Q не представляется возможным, поэтому эта величина определяется по эмпирической формуле, которая учитывает объемный расход шихтовых материалов и скорость их движения $V_{ш}$:

$$Q = 109,73 \cdot \left(\frac{2 \cdot m_{пор}}{t_{выгр} \cdot \gamma_{ш} \cdot \sqrt{V_{л}^2 \cdot \tau + 2 \cdot a_{л} \cdot S_{л} \cdot R_{л}^2}} \right)^{0,3546},$$

где $m_{пор}$ – масса выгружаемой порции, $t_{выгр}$ – время выгрузки порции материалов, τ – коэффициент восстановления скорости потока при падении на поверхность лоткового распределителя.

Скорость падения материала на поверхность лоткового распределителя определяется так:

$$V_{л} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(H_0 + \frac{H_{л}}{\sin \alpha_{л}} \right)},$$

где g – ускорение свободного падения, H_0 – высота от ШЗ до подвеса лоткового распределителя, $H_{л}$ – высота лотка.

Расстояние от точки падения материала на лоток до его выходного торца:

$$S_{л} = L_{л} - \frac{H_{л}}{\sin \alpha_{л} \cdot \cos \alpha_{л}}.$$

Ускорение движения материала по поверхности лотка:

$$a_{л} = g \cdot (\sin \alpha_{л} - \mu \cdot \cos \alpha_{л}),$$

где μ – коэффициент трения движения материалов по поверхности лоткового распределителя.

Площадь сечения потока шихтовых материалов определяется по формуле:

$$S_{ш_{л}} = \frac{m_{пор}}{t_{выгр} \cdot \gamma_{ш_{их}} \cdot \sqrt{V_{л}^2 \cdot \tau + 2 \cdot a_{л} \cdot S_{л}}}.$$

Используя приведенные формулы, была определена зависимость ширины проекции потока на борт лотка ($Ш_{л}$) от угла его наклона для доменной печи с радиусом колошника 5 м (рис. 3).

Как видно из рис. 3, значение ширины потока $Ш_{л}$ увеличивается по мере увеличения угла наклона лотка вплоть до 39° , где функция достигает экстремума. Полученная зависимость с достаточной точностью аппроксимируется полиномом 3-й степени, для чего с помощью метода наименьших квадратов определяются его коэффициенты.

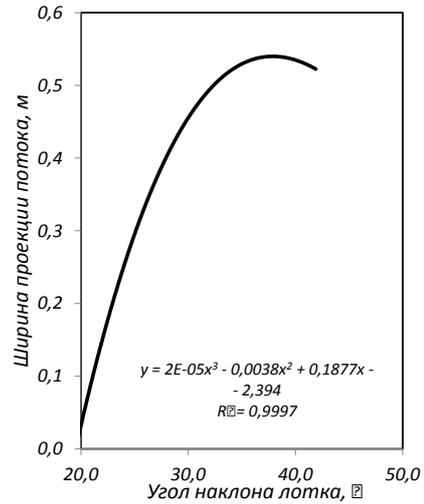


Рис. 3. Зависимость ширины проекции потока на борт лотка от угла его наклона для доменной печи с радиусом колошника 5 м

Для расчета распределения плотности потока по его ширине фигура сечения потока шихтовых материалов разбивается на 10 равных по высоте сегментов (рис. 4а). Каждый сегмент представляет собой фигуру, ограниченную функциями, условно описывающими геометрию выходного торца лоткового распределителя ($y = f(R_{л})$) и потока шихтовых материалов ($y = f(Ш_{л})$), а также отрезками «1-2» и «3-4», определяющими дискретность разбивки фигуры сечения потока. Далее, путем интегрирования на отрезке «x1-x2», определяется площадь каждого из сегментов (рис. 4б).

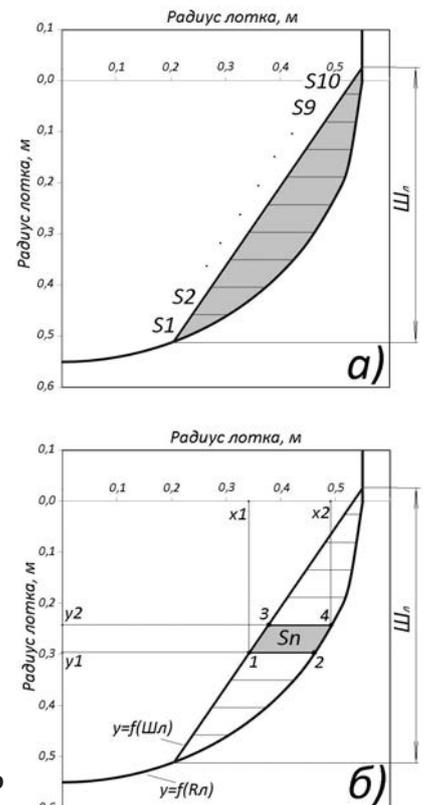


Рис. 4. Принцип (схема) разбивки сечения потока шихтовых материалов для определения его интенсивности

На рис. 5 представлено полученное распределение плотности потока материалов по его ширине при различных углах наклона лоткового распределителя доменной печи с радиусом колошника 5 м. Как видно из рисунка, наибольшая плотность потока приближена к его внутренней границе (по направлению к оси печи).

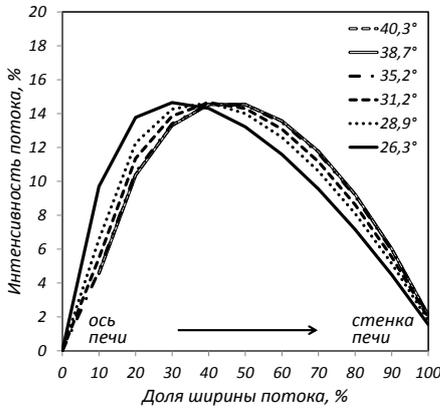


Рис. 5. Распределение плотности потока по его ширине при различных углах наклона лотка для доменной печи с радиусом колошника 5 м

Пример применения разработанной методики расчета параметров потока шихтовых материалов

На основе зависимости ширины потока от углового положения лотка и распределения его плотности по ширине, можно определить распределение материалов по кольцевым зонам колошника при выгрузке порций шихты из различных угловых позиций лоткового распределителя (матрица «позиция лотка – зона колошника» [4]). В табл. 1 и 2 приведены матрицы «позиция лотка – зона колошника», соответствующие полученному и равномерному распределению плотности потока. Следует отметить, что в данных вариантах матриц принято, что части потока материалов, попадающие в колошниковую защиту из положений лотка 10 и 9, размещаются в 10-й кольцевой зоне.

На рис. 6 представлена схема распределения доли массы порции по кольцевым зонам колошника при условии, что весь материал, выгруженный на каждой заданной позиции лотка, попадает целиком в соответствующую кольцевую зону (рис. 6а) и с учетом ширины потока с различными вариантами распределения его плотности (рис. 6б, в). Порция шихтовых материалов загружалась по программе:

Угловая позиция лотка	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Доля массы порции, %	-	15	23	15	15	15	15	-	-	-

Как видно из рис. 6, при учете ширины потока значительная часть материалов попадает

Таблица 1

Распределение ширины потока по равновеликим кольцевым зонам колошника при неравномерном распределении плотности потока по его ширине для доменной печи с радиусом колошника 5 м

Номер угловой позиции лотка	Номер кольцевой зоны									
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
10	0,73	0,27	0,01							
9	0,31	0,39	0,30	0,01						
8	0,03	0,25	0,44	0,28	0,01					
7		0,01	0,26	0,43	0,29					
6			0,01	0,23	0,49	0,26				
5					0,22	0,50	0,28			
4						0,13	0,66	0,21		
3							0,06	0,82	0,12	
2									1,00	
1										1,00

Таблица 2

Распределение ширины потока по равновеликим кольцевым зонам колошника при равномерном распределении плотности потока по его ширине для доменной печи с радиусом колошника 5 м

Номер угловой позиции лотка	Номер кольцевой зоны									
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
10	0,65	0,25	0,10							
9	0,42	0,25	0,30	0,05						
8	0,10	0,25	0,30	0,30	0,05					
7		0,05	0,30	0,30	0,35					
6			0,05	0,30	0,35	0,30				
5					0,30	0,35	0,35			
4						0,30	0,45	0,25		
3							0,25	0,50	0,25	
2								0,20	0,65	0,15
1										1,00

в соседние зоны. Однако, несмотря на это, характер распределения массы порции при различных вариантах распределения плотности (рис. 6б, в) отличается. Так, при постоянной ширине потока в 1 м и равномерной плотности потока, доля материалов, выгруженная в 8 зону колошника равна долям, выгруженным в 6 и 7. Количество материала попавшего в 10 зону, практически совпадает с количеством в 9 зоне. При переменной ширине потока и неравномерном распределении плотности по ширине доля материала выгруженного в 8-ю зону больше чем в зоны 4, 5, 6 и 7. При этом количество материалов в этих зонах распределено достаточно равномерно. Стоит также отметить, что доля материалов, попавших в 10-ю зону, значительно меньше, чем в 9-й.

Это объясняется тем, что при учете переменной ширины потока и неравномерного распределения плотности по его ширине увеличивается доля материала, выгружаемая из углового положения лотка, соответствующего номеру зоны

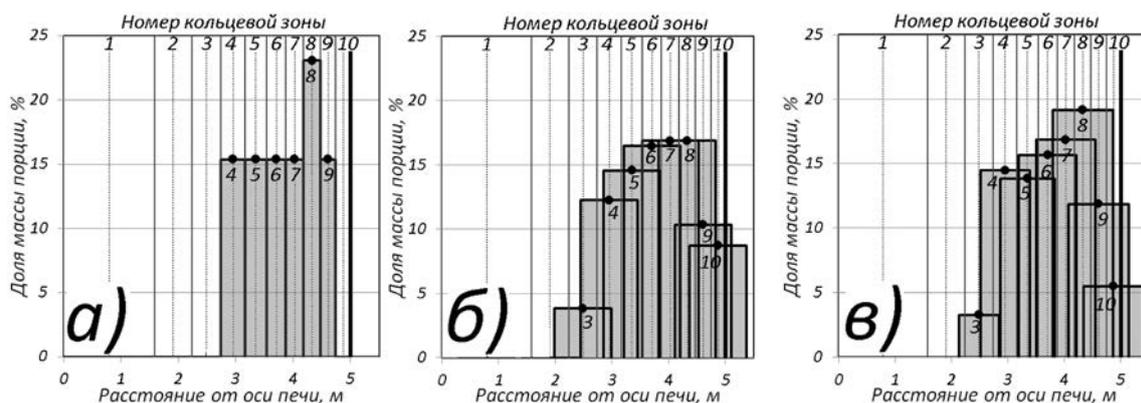


Рис. 6. Распределение массы порции шихты по кольцевым зонам колошника без учета (а) и с учетом ширины потока при равномерном (б) и неравномерном (в) распределении его плотности

(табл. 3). Кроме того, уменьшается количество материала, попадающего в 10-ю кольцевую зону из смежных угловых положений лотка (8 и 9), что объясняется особенностью распределения плотности потока (см. рис. 5), при которой наибольшая плотность находится ближе к внутренней границе (по направлению к оси печи) потока материалов.

Таблица 3

Доля материала в зонах колошника, выгружаемая из углового положения лотка, соответствующего номеру зоны

Угловое положение лотка	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Зона колошника										
Ширина потока переменна	0,72	0,39	0,44	0,43	0,49	0,5	0,66	0,82	1	1
Ширина потока постоянна	0,65	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,45	0,50	0,65	1
Δ	0,07	0,14	0,14	0,13	0,14	0,15	0,21	0,32	0,35	0

Использование этого расчета в алгоритме инженерной методики не приводит к его существенному усложнению, но при этом дает ряд преимуществ. Учет переменной ширины потока и неравномерного распределения плотности по его ширине позволяет увеличить точность результатов расчета распределения материалов на колошнике, а также выполнять оценку влияния на его особенности различных параметров распределителя загрузочного устройства (длину, высоту, радиус и угол наклона лоткового распределителя).

В качестве исходных данных для расчета показателей распределения были приняты программы загрузки (база и опыт), применявшиеся на доменной печи объемом 4291 м³ с радиусом колошника 5 м. В табл. 4 представлены результаты расчета распределения рудных нагрузок по инженерной методике с учетом различной ширины потока.

На рис. 7 представлены распределения расчетных рудных нагрузок и содержания CO₂ в соответствующих периодах работы печи. Как видно из рис. 7, распределение рудных нагрузок для обоих периодов, рассчитанное с учетом постоянной и переменной ширины потока, достаточно похоже. Тенденции изменения расчетных рудных нагрузок соответствуют изменению фактического распределения доли CO₂ в газе по радиусу печи. Однако распределение рудных нагрузок с учетом переменной ширины потока имеет более тесную взаимосвязь с распределением газового потока, о чем свидетельствует значение коэффициентов корреляции между ними: в базовом периоде $r = 0,65$ – при расчете с переменной шириной и $r = 0,62$ – при расчете с постоянной шириной потока; в опытном периоде – $r = 0,72$ и $r = 0,65$, соответственно. Несмотря на небольшое отличие в значениях коэффициентов корреляции, тенденция их увеличения при использовании нового подхода свидетельствует о его корректности.

Таблица 4

Распределение рудных нагрузок в базовом и опытном периодах, полученное с помощью инженерной методики с учетом различной ширины потока

Рудная нагрузка по периодам		Номер кольцевой зоны									Ср	
		10	9	8	7	6	5	4	3	2		1
База	поток равн, т/т	6,01	6,25	6,17	5,79	5,50	4,61	3,56	1,04	0,00	0,00	3,96
	поток неравн, т/т	5,92	6,16	6,29	5,93	5,36	4,92	3,75	0,87	0,00	0,00	3,96
Опыт	поток равн, т/т	9,90	7,92	5,71	4,55	3,77	3,91	4,09	2,48	0,00	0,00	3,96
	поток неравн, т/т	11,81	8,28	6,08	4,50	3,63	3,67	4,66	2,38	0,00	0,00	3,96

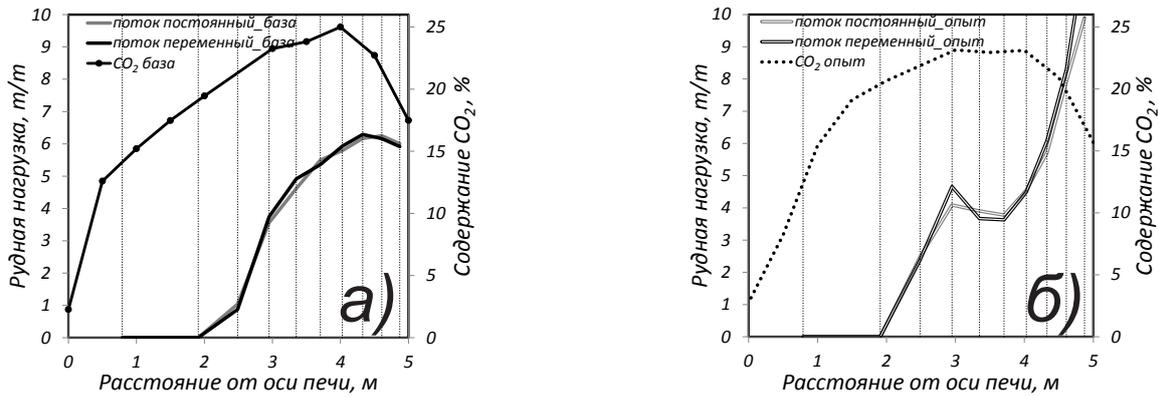


Рис. 7. Расчетное распределение рудных нагрузок и фактическое распределение доли CO₂ в газе по радиусу колошника исследованной печи в базовом (а) и опытном (б) периодах

Выводы

В Институте черной металлургии была разработана инженерная методика расчета показателей распределения, которая позволяет оперативно оценивать программы загрузки до их установки в системе управления технологическим процессом. Простота алгоритма расчета имеет ряд преимуществ перед математическими моделями.

В настоящее время инженерная методика продолжает совершенствоваться. Разработан новый способ (метод) расчета ширины потока и распределения его плотности в горизонтальном сечении, который основан на учете угла заноса материала на борт лотка, расчете площади поперечного сечения занесенного потока материалов на выходном торце лотка и использовании интегрального исчисления для определения распределения его интенсивности (плотности). Использование этого расчета в алгоритме инженерной методики не приводит к его существенному усложнению и при этом дает ряд преимуществ. Учет переменной ширины потока и неравномерного распределения плотности по его ширине (сечению) позволяет повысить точность результатов расчета распределения материалов на колошнике, а также выполнять оценку влияния на его особенности различных параметров распределителя загрузочного устройства (длину, высоту, радиус и угол наклона лоткового распределителя). Разработанный метод особенно актуален при расчете распределения материалов для доменных печей небольшого объема (до 1500 м³), на которых поток материалов может перекрывать около 4-5 зон колошника.

По результатам предварительной оценки, использование разработанного расчета параметров потока в алгоритме инженерной методики ИЧМ увеличивает тесноту взаимосвязи распределения шихтовых материалов с распределением газового потока, что свидетельствует о его корректности.

Библиографический список

1. Большаков В. И. Теория и практика загрузки доменных печей. – М.: Металлургия, 1990. – 256 с.
2. Большаков В. И., Шутылев Ф. М., Лебедь В. В. Инженерная методика расчета показателей распределения шихты для доменных печей, оснащенных БЗУ // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2006. – № 2. – С. 76-80.
3. Большаков В. И., Лебедь В. В. Применение инженерной методики для оценки и выбора программ загрузки доменной печи // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2006. – № 4. – С. 36-39.
4. Большаков В. И., Лебедь В. В. Расчет показателей распределения шихтовых материалов на колошнике с учетом ширины потока // Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2007. – Вып. 15. – С. 54-66.
5. Большаков В. И., Зарембо А. Ю., Сало А. С. Методика расчета параметров схода шихты с распределительного лотка // Вопросы производства чугуна в доменных печах / МЧМ СССР (ИЧМ). – М.: Металлургия, 1984. – С. 60-64.

Поступила 25.03.2014