

Методика определения скоростей опускания шихты по сечению колошника доменной печи

Приведены результаты исследований по определению скоростей опускания шихтовых материалов по сечению колошника ДП № 9 с помощью радиолокационной системы измерения профиля поверхности засыпи. Показано, что скорость опускания шихты по сечению колошника ДП № 9 и динамика ее изменения во взаимосвязи с параметрами дутьевого и газодинамического режимов плавки при загрузке печи с постоянной программой загрузки в значительной мере согласуется с изменениями технологического режима работы печи, что свидетельствует о правильности выбранного способа определения скорости опускания шихты по сечению колошника. Полученные значения скоростей опускания шихтовых материалов могут быть использованы как в качестве исходных параметров для математической модели распределения материалов, так и при разработке технологических приемов управления их распределением по сечению печи. Ил. 3. Табл. 4. Библиогр.: 8 назв.

скорости опускания, шихтовые материалы, доменная печь, колошник, система измерения профиля поверхности засыпи

Показатели доменной плавки в значительной степени зависят от условий движения, распределения и взаимодействия встречных потоков газа и шихты в рабочем пространстве печи [1]. В современных условиях улучшение технико-экономических показателей доменной плавки определяется в значительной степени обоснованным выбором управляющих воздействий на основе контроля параметров состояния столба шихтовых материалов, в частности, скорости их опускания по сечению колошника доменной печи. Анализ результатов исследований, приведенный в работе [2] показывает, что на доменных печах различного объема, оснащенных электромеханическими уровнемерами (зондами), измеряется уровень засыпи на периферии печи и по его изменению во времени рассчитывается скорость опускания шихты только в сечении контакта зонда с поверхностью шихты. Характер изменения скоростей опускания по сечению колошника, как правило, представляется авторами с помощью расчетов [3].

В настоящее время в связи с оснащением доменных печей современными средствами измерения профиля засыпи шихты на колошнике разработка и совершенствование технологических приемов управления распределением шихтовых материалов по сечению печи может выполняться с учетом реальных скоростей их опускания на колошнике.

На доменной печи № 9 объемом 5034 м³ ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог», оборудованной двух-

трактовым лотковым загрузочным устройством фирмы «Paul Wurth» (БЗУ), а также оснащенной радиолокационной системой измерения профиля засыпи шихты [4–6] выполнено определение скоростей опускания шихтовых материалов по сечению колошника печи. Установленная на печи радиолокационная система измерения профиля засыпи, состоящая из дискретных измерителей, позволяет непрерывно в процессе плавки измерять уровень поверхности засыпи в четырех кольцевых зонах сечения колошника печи и по их изменению рассчитывать скорости опускания шихтовых материалов. Целью проведенных исследований являлся выбор способа определения скорости опускания шихты по сечению колошника и установление фактического диапазона ее изменения для существующих параметров дутьевого и газодинамического режимов в исследуемые периоды работы печи (табл. 1). Характерной особенностью режима загрузки печи является использование многокомпонентной шихты, а также 9–10-ти порционной циклически повторяющейся программы загрузки шихтовых материалов, предусматривающей выгрузку в осевую зону печи 1–2 порций кокса, а также смеси его с окатышами и отвальным обогащенным шлаком. В исследуемые периоды I–IV работы ДП № 9 загрузка порций шихтовых материалов (А – агломерат; О – окатыши; Шо – шлак отвальный обогащенный; К – кокс) осуществлялась в соответствии с программой: 1 – К 8-4, 2 – АОШо 9-3, 3 – К 8-4, 4 – АОШо 9-3, 5 – КШо 2-1, 6 – К 8-4, 7 – АОШо 9-3, 8 – К 8-4, 9 – АОШо 9-3, 10 – КО 2-1. Загрузка порций из 9-1 – угловых позиций наклона лотка БЗУ, осуществлялась на уровень засыпи 1,2 м, при этом в печь загружалось последовательно 10 порций, составляющих цикл. Масса рудной части подачи (Мр) составляла 104,4–112,1 т, рудная нагрузка – 3,30–3,46 т/т кокса.

Параметры дутьевого и газодинамического режимов работы ДП-9 в исследуемые периоды приведены в табл. 1, где Q_d , P_d и T_d – расход, давление и температура дутья; O_2 – доля кислорода в дутье; $Q_{гп}$ – расход природного газа, вдуваемого в печь; P_k – давление колошниковога газа; $\Delta P_{об}$, ΔP_v , ΔP_n – общий, верхний и нижний перепады давления в печи; $T_{гп}$, $T_{го}$ – температура газа на периферии и в газотопроводах.

Таблица 1. Параметры дутьевого и газодинамического режимов работы ДП-9 в исследуемые периоды

период работы печи	Q_d , м ³ /мин	T_d , °С	P_d , ати	O_2 , %	P_k , ати	$Q_{гп}$ м ³ /мин	$\Delta P_{об}$, ати	ΔP_v , ати	ΔP_n , ати	$T_{го}$, °С	$T_{гп}$, °С
I	8584	1097	3,34	30,8	1,40	581	1,94	0,5	1,44	107	267
II	8634	1097	3,35	30,9	1,40	583	1,95	0,49	1,46	101	249
III	8662	1098	3,43	29,9	1,49	581	1,94	0,46	1,48	85,9	269
IV	8663	1114	3,24	28,6	1,30	527	1,94	0,34	1,6	75,6	124

Значения скорости опускания поверхности шихты определялись в каждой точке измерения уровня засыпи по четырем радиусам колошника, расположенным вдоль осей электромеханических уровнемеров (зондов) ЭМ31 – ЭМ34. Скорость опускания шихты на колошнике ($v_{ш}$) определялась тремя способами:

1. Отношением разности ежесекундных значений уровней в измеряемых точках поверхности засыпи ко времени, которое соответствует периоду между выгрузками порций (на графиках обозначена как скорость ежесекундная 1).

2. Отношением разности ежесекундных значений уровней в измеряемых точках поверхности засыпи, причем каждое последующее сравнивается с предыдущим, ко времени, которое соответствует периоду между выгрузками порций (на графиках обозначена как скорость ежесекундная 2).

3. Отношением разности уровней в измеряемых точках поверхности засыпи к интервалу времени, соответствующему периоду после и перед выгрузкой каждой очередной порции («по событию»).

Анализ массивов рассчитанных значений скоростей опускания поверхности засыпи в различных сечениях колошника показал, что в цикле загрузки, состоящем из 10 последовательно выгружаемых порций, формирование профиля поверхности засыпи и характер ее опускания в каждой из зон различны, что обусловлено в значительной мере движением газового потока. На рис. 1 приведены графики изменения скоростей опускания шихты по радиусу колошника после выгрузки последовательно каждой порции для I-го периода работы печи № 9. Для остальных исследуемых периодов характер изменения скоростей качественно такой же, различаются лишь абсолютные значения скоростей. Из приведенных графиков следует, что при опускании первой порции кокса, выгруженного из позиций лоткового распределителя (8-4), газовый поток интенсифицируется в осевой зоне печи, где над поверхностью образуется взвешенный слой из мелких фракций кокса, что идентифицируется отрицательными значениями скоростей опускания в этой зоне. При этом в периферийной зоне шихта опускается с большой скоростью. После выгрузки второй порции цикла АОШ₀ (9-3) характерным является опускание с большими скоростями поверхности засыпи в осевой зоне печи и с меньшими, по сравнению с 1-ой порцией, скоростями на периферии, что свидетельствует о преимущественном развитии потока газа в этой зоне. После загрузки 3-ей порции К (8-4) усиление газового потока в периферийной зоне сохраняется. Распределение скоростей опускания поверхности засыпи после выгрузки 4-ой порции АОШ₀ (9-3) вызвано, по-видимому, выходом из цилиндрической части колошника выгруженной в центр печи 10-ой порции кокса КО (2-1) предыдущего цикла, при этом резко возрастает скорость опускания поверхности шихты в осевой зоне. После выгрузки 5-ой порции КШ₀ (2-1) газовый поток в осевой зоне «запирается» коксом, и скорость опускания в ней

шихты уменьшается. Уменьшение скорости опускания наблюдается и в периферийной зоне, что вызвано, по-видимому, перераспределением газового потока и движением большего его количества по периферии. Указанный характер распределения скоростей опускания аналогичных последующих порций в цикле загрузки повторяется, что подтверждается практически совпадающими кривыми, описывающими изменение скоростей после выгрузки этих порций, что приведено на рис. 1.

В целом, процесс формирования столба шихтовых материалов из последовательно выгружаемых порций шихтовых материалов может быть охарактеризован средними их значениями за выбранный период усреднения в измеряемых сечениях колошника. Как показали исследования, период усреднения скоростей, равный 8 ч, является достаточным и характеризует ход печи при установившихся его параметрах. Усредненные значения скоростей опускания шихтовых материалов для 16 и 24 часовых интервалов отличаются незначительно, что дает основание для принятия 8-ми часового интервала в качестве базового периода усреднения скоростей. При этом уменьшается объем выборки статистических данных, подлежащих обработке при усреднении для выполнения условия получения достоверных данных о ско-

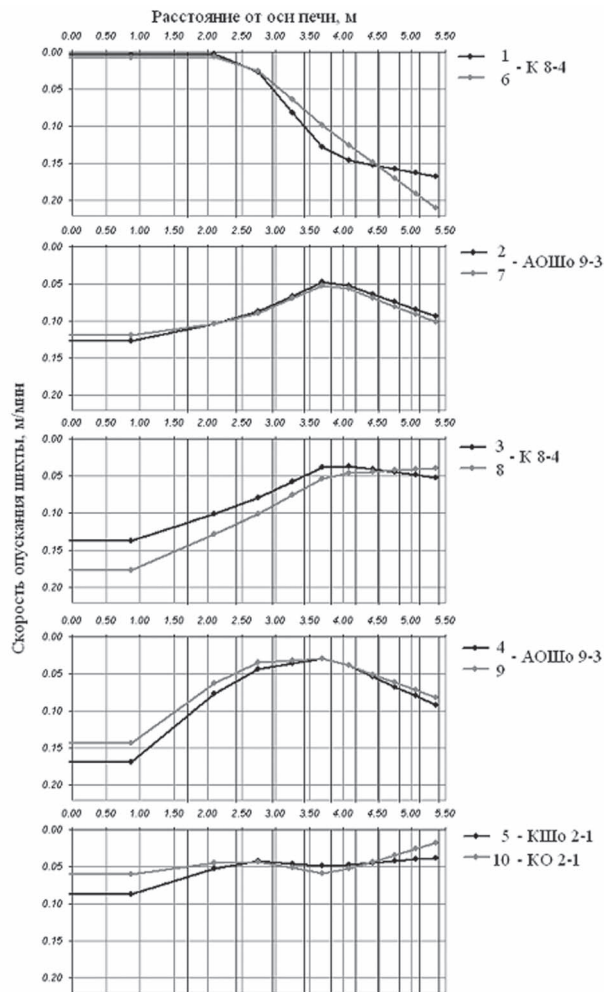


Рис. 1. Распределение скоростей опускания шихты по радиусу колошника печи после выгрузки порций в цикле загрузки для I-го исследуемого периода (1-10 – номер порции выгружаемого материала)

Таблица 2. Изменение скорости опускания шихты по диаметрам колошника печи № 9

Период	Радиус	Скорость опускания шихты, м/мин								Радиус
		Расстояние от оси печи до точки измерения уровня засыпи, м								
		5,05	3,8	2,5	1,0	1,0	2,5	3,8	5,05	
I - 5.10.06 г.	ЭМЗ-1	0,078	0,058	0,066	0,089	0,106	0,065	0,067	0,088	ЭМЗ-3
	ЭМЗ-2	0,084	0,058	0,053	0,100	0,102	0,044	0,051	0,082	ЭМЗ-4
II - 6.10.06 г.	ЭМЗ-1	0,087	0,062	0,070	0,086	0,101	0,058	0,059	0,092	ЭМЗ-3
	ЭМЗ-2	0,099	0,054	0,052	0,097	0,107	0,040	0,046	0,080	ЭМЗ-4
III - 17.10.06 г.	ЭМЗ-1	0,094	0,074	0,138	0,164	0,118	0,082	0,066	0,102	ЭМЗ-3
	ЭМЗ-2	0,099	0,037	0,079	0,113	0,124	0,074	0,072	0,096	ЭМЗ-4
IV - 26.10.06 г.	ЭМЗ-1	0,083	0,066	0,095	0,103	0,124	0,083	0,079	0,089	ЭМЗ-3
	ЭМЗ-2	0,091	0,076	0,080	0,115	0,116	0,125	0,057	0,080	ЭМЗ-4

Таблица 3. Диапазоны изменения средней скорости опускания шихты на колошнике печи № 9

Период	Диапазон изменения средней скорости (минимум – максимум), м/мин	Значение средней скорости опускания шихты, м/мин
	$v_{ш}^{min} - v_{ш}^{max}$	$v_{ш}^{cp}$
I – 5.10.06 г.	0,044–0,106	0,075
II – 6.10.06 г.	0,040–0,107	0,074
III – 17.10.06 г.	0,037–0,164	0,096
IV – 26.10.06 г.	0,057–0,125	0,092

Таблица 4. Средние значения скоростей опускания шихтовых материалов по сечению колошника (¹ – ПФ, 1П, 2П, Ц – периферийная, промежуточные, центральная зоны сечения колошника) ($v_{ш}^{cp}$) ДП № 9 за время загрузки циклов порций шихтовых материалов

Период работы печи, программа загрузки (количество циклов)	Скорость опускания шихты ($v_{ш}^{cp}$), м/мин. (м/ч)				Средняя
	Зоны сечения колошника				
	ПФ ¹	1П	2П	Ц	
I - 5.10.06 г. (10)	0,083 (4,98)	0,059 (3,54)	0,057 (3,42)	0,099 (5,94)	0,075 (4,5)
II - 6.10.06 г. (10)	0,09 (5,4)	0,055 (3,3)	0,055 (3,3)	0,098 (5,88)	0,074 (4,44)
III - 17.10.06 г. (10)	0,098 (5,88)	0,062 (3,72)	0,093 (5,58)	0,13 (7,8)	0,096 (5,76)
IV - 26.10.06 г. (10)	0,086 (5,16)	0,07 (4,2)	0,096 (5,76)	0,115 (6,9)	0,092 (5,52)

ростях. Средние скорости за выбранный период времени усреднения могут являться исходными для задания в математическую модель радиального распределения шихтовых материалов на колошнике печи при расчете параметров их распределения для условий использования аналогичных программ загрузки.

На рис. 2 и 3 представлены распределение и изменение усредненных за 8 ч работы печи в исследуемые периоды I, II и IV скоростей опускания шихты по двум взаимоперпендикулярным диаметрам колошника: ЭМЗ-1 – ЭМЗ-3 и ЭМЗ-2 – ЭМЗ-4. Как следует из графиков, скорости, определенные как отношение разности ежесекундных значений уровней в измеряемых точках поверхности засыпи ко времени, которое соответствует периоду между выгрузками порций (скорость ежесекундная 1) и скорости «по событию», практически, не отличаются друг от друга. Скорости, определенные как отношение разности ежесекундных значений уровней в измеряемых точках поверхности засыпи, причем каждое последующее сравнивается с предыдущим, ко времени, которое соответствует периоду между выгрузками порций (на графиках обозначена как скорость ежесекундная 2) значительно превышают значения ско-

ростей, определенных способами, дающими практически одинаковые результаты. Кроме того, определение скоростей «по событию» не требует архивации в системе большого массива ежесекундных данных об измеряемых значениях уровней засыпи, что дает основание для использования в дальнейших расчетах скоростей опускания шихты в различных зонах сечения колошника этого способа. Величины средних скоростей опускания поверхности шихты по двум диаметрам колошника за 8 ч загрузки печи ($v_{ш}^{cp}$), полученные в исследуемые периоды работы печи приведены в таблице 2, а средние скорости опускания шихты по сечению печи – в табл. 3.

Полученные значения скоростей усреднялись для каждой из четырех зон установки измерителей уровня засыпи: ПФ – периферийная зона (0,35 м от стенки колошника); 1П – первая промежуточная зона (1,6 м); 2П – вторая промежуточная зона (2,9 м); Ц – центральная зона (4,5 м) и приводились к среднему значению для указанных четырех радиусов колошника (табл. 4).

Из анализа данных, приведенных на рис. 2 и 3 и в табл. 1–3 следует, что для исследуемых периодов

работы печи соотношение скоростей опускания шихтовых материалов в оси печи и на периферии $v_{ш}^n : v_{ш}^{nf}$ распределяется следующим образом: для 5.10.06 г. – 1,19 ед., для 6.10.06 г. – 1,09 ед., для 17.10.06 г. – 1,33 ед., для 26.10.06 г. – 1,34 ед.

Полученные для исследуемых периодов факти-

ческие средние скорости опускания шихты (таблица 4) были сопоставлены с расчетными величинами среднесуточной скорости опускания шихтовых материалов ($v_{ш}^{cp}$) в доменной печи № 9 в I и II периоды, определяемыми из выражений для расчетов средней величины времени пребывания шихты

в печи ($\tau_{ш}^{cp}$), ч [7,8]:

$$\tau_{ш}^{cp} = 24[V_{п} / \Pi \cdot v_{ш} \cdot (1 - f)], \quad (1)$$

$$\tau_{ш}^{cp} = 25[V_{п} / \Pi \cdot v_{ш}], \quad (2)$$

где $V_{п}$ – полезный объем печи – 5034 м³; Π – суточная производительность I – 10017 т/сут., II – 9630 т/сут.; $V_{ш}$ – объем шихты (без «уминки») на 1 т чугуна – 1,974 м³/т и 1,954 м³/т; f – коэффициент «уминки» – 0,125 ед.; S – расстояние от технологического нуля до уровня оси леток для чугуна – 33 м; $S_{ф}$ – расстояние уровня засыпи до оси воздушных фурм – 27,5 м. Для третьего и четвертого периодов работы печи среднесуточная скорость опускания шихты не рассчитывалась в связи с длительными простоями печи в эти периоды.

В I и II периоды работы доменной печи среднее расчетное время пребывания шихты в печи ($\tau_{ш}^{cpI}$, $\tau_{ш}^{cpII}$) составило: $\tau_{ш(1)-(2)}^{cpI} = 6,674$ ч и $\tau_{ш(1)-(2)}^{cpII} = 7,024$ ч, а средняя расчетная величина скорости опускания шихты для периодов I и II составила, соответственно,

$$v_{ш(1)-(2)}^{cpI} = 4,78 \text{ м/ч (0,080 м/мин)}$$

$$\text{и } v_{ш(1)-(2)}^{cpII} = 4,54 \text{ м/ч (0,076 м/мин)},$$

при средней фактической (измеренной) скорости $v_{ш \text{ факт.}}^{cpI} = 4,5 \text{ м/ч (0,075 м/мин)}$ и $v_{ш \text{ факт.}}^{cpII} = 4,44 \text{ м/ч (0,074 м/мин)}$.

Относительная разность расчетных и фактических значений (невязка) средней скорости опускания шихты в печи

$$- \Delta_{(1),(2)}^{I,II} = v_{ш(1)(2)}^{cp,II}$$

$$- v_{ш \text{ факт.}}^{cp,II} / v_{ш(1)(2)}^{cp,II} \cdot 100 \% \text{ для}$$

периодов I и II составила, соответственно, 6,3 % и 2,63 %. Полученные результаты указывают на достаточную сходимость расчетных и измеренных средних

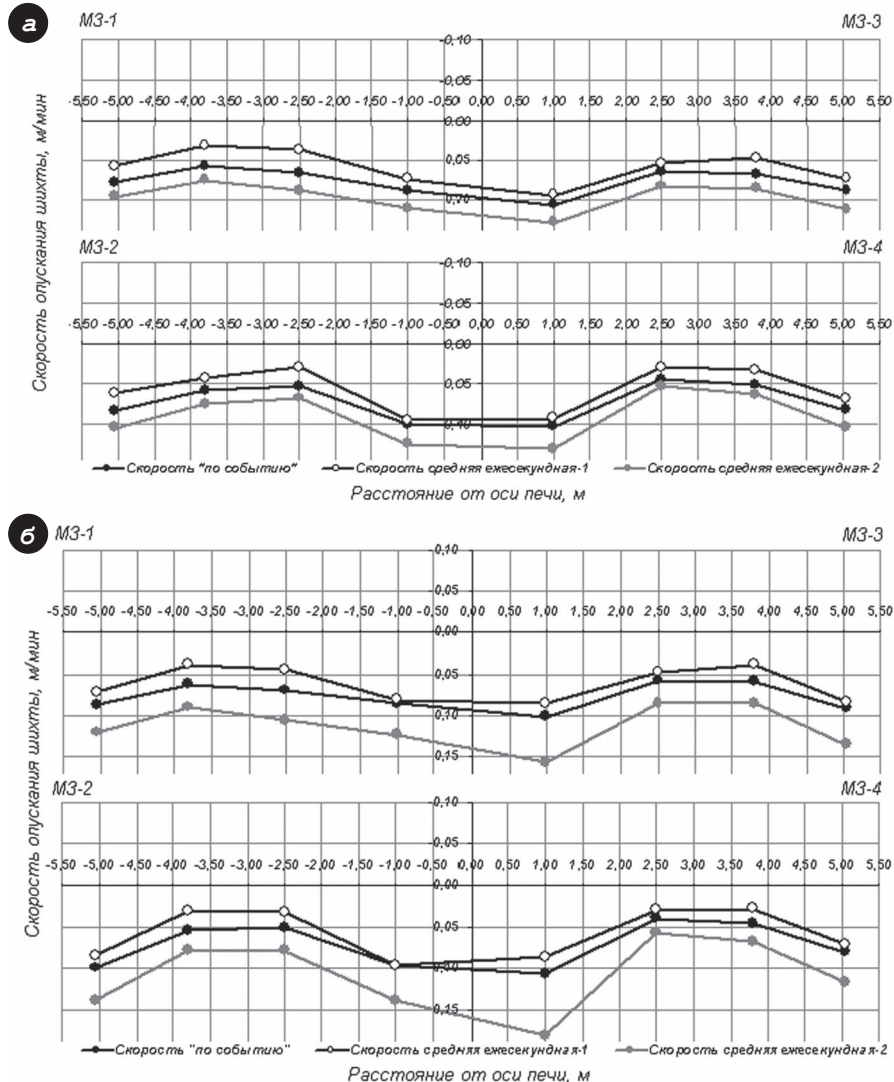


Рис. 2. Изменение скоростей опускания шихты по двум диаметрам колошника за период 8 ч работы печи: а) – I период (5.10.06 г.), б) – II период (6.10.06 г.)

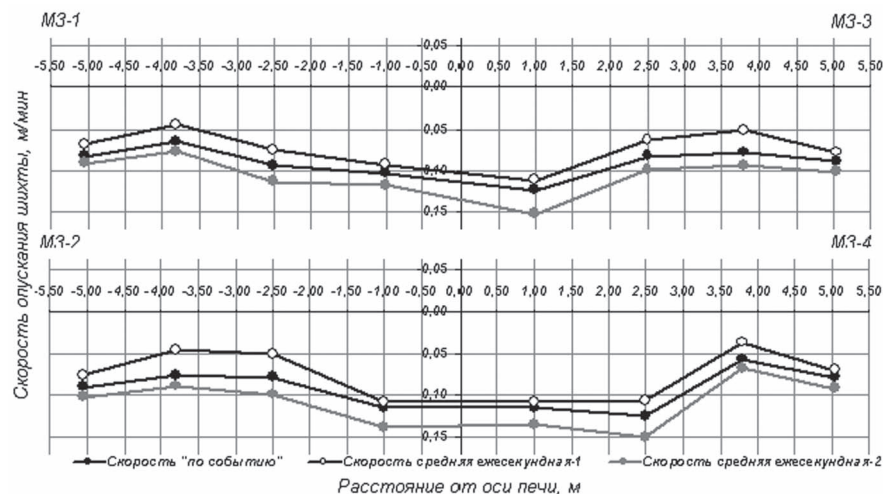


Рис. 3. Изменение скоростей опускания шихты по двум диаметрам колошника за период 8 ч работы печи 26.10.06 г. - IV период

значений скорости опускания шихты в эти периоды работы доменной печи и являются подтверждением правильности выбора методики определения их значений по сечению колошника с помощью профилемера.

Анализ результатов оценки корреляционной

$$\text{взаимосвязи } r_{x,y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - m_x) \cdot (Y_i - m_y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \text{ величин}$$

средней скорости опускания поверхности шихты на колошнике ($v_{ш,Sk}^{cp}$) и в кольцевых зонах его сече-

ния ($v_{ш,ПФ,ЛП,2П,Ц}^{cp}$) с основными параметрами дутьевого и газодинамического режимов плавки в исследуемые периоды I–IV (таблицы 1 и 4) показал следующее.

Изменение средней скорости опускания шихты по сечению колошника печи в значительной степени взаимосвязано с расходом дутья Q_d ($r_{xy} = 0,93$ и средней температурой газа в газоотводах ($r_{xy} = -0,881$), общим перепадом давления $-\Delta P_{общ}$ ($r_{xy} = -0,53$, а также верхним и нижним перепадами ($r_{xy} = -0,569$ и $r_{xy} = 0,546$). Изменение скорости в периферийной зоне печи взаимосвязано с давлением дутья P_d ($r_{xy} = 0,763$), давлением колошниковога газа $-P_{кол}$ ($r_{xy} = 0,761$), и отношением $P_{кол} / \Delta P_{общ}$ ($r_{xy} = 0,758$), а также расходом дутья $-Q_d$ ($r_{xy} = 0,77$). Увеличение расхода дутья сопровождалось повышением скорости опускания шихты в первой, второй промежуточной и осевой зонах ($r_{xy} = 0,95$; $r_{xy} = 0,888$ и $r_{xy} = 0,932$), при этом температура газа в газоотводах уменьшалась ($r_{xy} = -0,91$; $r_{xy} = -0,945$ и $r_{xy} = -0,727$). Повышение давления дутья приводило к увеличению скорости схода шихты в периферийной зоне колошника ($r_{xy} = 0,763$). Увеличение давления колошниковога газа и отношения $P_{кол} / \Delta P_{общ}$ в значительной степени приводило к ускорению опускания шихты в периферийной зоне ($r_{xy} = 0,761$ и $0,758$). Влияние общего перепада давления в печи на скорость опускания шихты проявлялось, в большей мере, в первой и во второй промежуточных зонах печи ($r_{xy} = -0,527$; $r_{xy} = -0,606$), а также в центральной зоне ($r_{xy} = -0,558$).

Анализ результатов оценки взаимосвязи скоростей опускания шихты с основными параметрами дутьевого и газодинамического режимов плавки показал, что при увеличении расхода дутья возрастает средняя скорость опускания шихтовых материалов на колошнике, что подтверждает возможность использования распределения материалов и количества дутья в качестве основных мер воздействия на верхнюю часть печи при разработке систем автоматизированного управления ходом доменной печи. Установленные взаимосвязи скоростей опускания шихты с температурами газа на периферии и в газоотводах являются подтверждением правильности выб-

ранной методики определения скоростей и динамика их изменения во времени, может быть использована в качестве косвенного показателя для оценки характера распределения газового потока по сечению печи.

Заклучение

С помощью радиолокационной системы изменения профиля поверхности засыпи шихты определены фактические скорости опускания поверхности шихты на колошнике для работы доменной печи объемом 5034 м³ с различными параметрами дутьевого и газодинамического режимов плавки. Показано, что определяемая радиолокационным профилемером скорость опускания шихты по сечению колошника ДП № 9 и динамика ее изменения во взаимосвязи с параметрами дутьевого и газодинамического режимов плавки согласуется с изменениями технологического режима работы печи. Это свидетельствует о правильности выбранного способа определения скорости опускания шихты по сечению колошника и создает предпосылки установления влияния дутьевых параметров на характер распределения скоростей по сечению печи. Знания об изменении скоростей опускания шихтовых материалов могут быть использованы как в качестве исходных параметров для математической модели распределения материалов, так и при разработке технологических приемов управления их распределением по сечению печи.

Библиографический список

1. Готлиб А.Д. Доменный процесс. – М.: Металлургия, 1966. – 503 с.
2. Анализ результатов исследований скоростей опускания шихты в доменной печи / В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, Ю.С. Семенов, С.Т. Шулико // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. тр. - Вып. 12. – 2006. – С. 109–117.
3. Пыжов В.Г. Характер схода шихты в доменной печи // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1984. - №4. - С. 5-8.
4. Доменное производство «Криворожстали» /Под ред. В.И. Большакова. - Днепропетровск: ИЧМ, 2004. – 376 с.
5. Технологические особенности автоматизированного измерения профиля засыпи шихты в доменной печи, оснащенной БЗУ / В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, С.Т. Шулико, Ю.С. Семенов, В.С. Листопадов, Г.И.Орел // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2003. – № 2. – С. 112–114.
6. Перспективы использования профилемеров в управлении распределением шихтовых материалов в доменной печи / В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, С.Т. Шулико, Ю.С. Семенов, В.С. Листопадов // Теория и практика производства чугуна: Сб. тр. Международной научно-технич. конференции. - Кривой Рог: 2004. – С. 404–408.
7. Волков Ю.П. Шпарбер Л.Я., Гусаров А.К. Технолог-доменщик. – М.: Металлургия, 1986. – С. 121.
8. Полтавец В.В. Доменное производство. – М.: Металлургия, 1972. – С. 139.

Поступила 04.02.08