

нента калия, то он концентрируется в большей степени в составе полевых шпатов с предположительной формулой  $K_{0,64}(Al_{1,95}Si_{2,38})O_8$  (рис. 2, *д*, сп. 1, 2 в табл. 4). Однако в связи с незначительным общим содержанием калия (см. табл. 1) и его распределением по другим фазам, методом РФА калиевые полевые шпаты не регистрируются.

Таким образом, проведенные исследования структуры красного шлама показали, что с точки зрения железорудного сырья материал представляет собой сложную систему дисперсных и ультрадисперсных кристаллов гематита в окружении железосодержащих фаз в виде кристаллической фазы шамозита и аморфных железоалюмосиликатных фаз. Обогащение такого материала традиционными способами представляется трудно осуществимым.

УДК 669.162

*И.Г. Муравьева, В.И. Большаков, Ю.С. Семенов, Е.И. Шумельчик*

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

## МЕТОД ОЦЕНКИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ, ОСНОВАННЫЙ НА ИНФОРМАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПРОФИДЕМЕРА

Высокие показатели доменной плавки могут быть обеспечены при рациональном распределении газового потока в столбе шихтовых материалов, способствующем равномерному опусканию материалов в шахте доменной печи. Ровный ход печи является признаком нормальной ее работы, главной составляющей которого является стабильное и устойчивое опускание шихты с неодинаковой, но постоянной (стабильной) скоростью в различных сечениях колошника [1 – 4]. Постоянный контроль технологического персонала за сходом шихты в печи и своевременное принятие мер воздействия на него является действенным способом сохранения ровного хода работы печи с высокими технико-экономическими показателями плавки. Известно, что стабильность опускания шихты по сечению печи определяется различной степенью влияния следующих факторов: дутьевого режима, плавления шихты, связанного с химическими и физическими свойствами шихтовых материалов, распределения их и формирования газового потока по сечению печи, состояния профиля печи, выпуска продуктов плавки и т.д. Поэтому скорость опускания шихты в различных сечениях колошника и ее колеблемость во времени отражают суммарное воздействие всех вышеуказанных факторов на стабильность схода шихты по сечению печи и могут быть использованы для определения степени ровности хода печи, выраженной в виде коэффициентов нестабиль-

- ### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК
1. Klauber C., Grafe M., Power G. // Hydrometallurgy. 2011. June. Vol. 108. P. 11 – 32.
  2. Утков В.А., Пацей А.В., Казаков Е.И. Перспективы развития способов переработки красных шламов в СССР и за рубежом. ЦНИИ информации и технико-экономических исследований цветной металлургии. – М.: 1983. – 32 с.
  3. Thakur R.S., Sant B.R. 1983. Vol. 42 (8). P. 456 – 469.
  4. Paramguru R., Rath P., Misra V. // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2005. Vol. 26 (1). P. 1 – 29.
  5. Карамзин В.И. Обогащение руд черных металлов. – М.: Недра, 1982. – 216 с.
  6. Пирогов Б.И., Протон Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н. Технологическая минералогия железных руд. – Л.: Наука, 1988. – 304 с.

© 2012 г. Г.С. Подгородецкий, В.Б. Горбунов,  
В.В. Коровушкин, А.В. Панов  
Поступила 3 февраля 2012 г.

ности опускания шихты в отдельных зонах и по всему сечению колошника.

В ходе исследований, выполненных на доменной печи объемом 2002 м<sup>3</sup> АК «Тулачермет» в период освоения на ней радиоизотопного профиломера РИАП [5], разработан способ оценки ровности хода печи по «плавности» опускания шихты в отдельных кольцевых зонах и всему сечению колошника. При этом сечение колошника разбивалось на равновеликие кольцевые зоны, на границах которых по данным профиломера определялись скорости опускания шихты. Как было показано ранее [6], одним из недостатков сканирующих профиломеров является то, что измерение ими расстояния до поверхности засыпи шихты по радиусу колошника осуществляется не одновременно и поэтому расчет скоростей опускания шихты с использованием их информации является не вполне корректным. В отличие от сканирующих профиломеров, стационарно установленная радиолокационная система измерения профиля засыпи позволяет одновременно определять изменения уровней засыпи в четырех кольцевых зонах сечения колошника и рассчитывать значения скоростей опускания шихты, на основе которых может быть осуществлена оценка ровности хода печи.

Приведенный в работе [5] способ оценки «плавности» опускания шихты был усовершенствован и адаптирован к условиям использования на доменных печах

стационарных систем измерения профиля поверхности засыпи шихты и особенностям измерения ими профиля поверхности засыпи шихты [7]. Оценка изменения колеблемости скорости опускания шихты на колошнике осуществляется по величине среднеквадратичного отклонения скоростей в различных зонах колошника и по всему его сечению после выгрузки каждой порции шихтовых материалов, образующих цикл загрузки. На основе рассчитанных средних за цикл в каждой кольцевой зоне значений –  $\sigma_m^{V_{ш.п.п.ш.ц}}$  и по сечению колошника –  $\sigma_m^{V_{ш.п.п.ш.ц}}$  определяются коэффициенты неустойчивости опускания шихты на уровне колошника для каждой зоны:

$$K_{3m} = \left| 1 - \frac{\sigma_{cp}^{V_{3m}}}{\sigma_{cp}^{V_k}} \right| \quad (1)$$

и всего сечения колошника:

$$K_k = \frac{\sum_1^m K_{3m}}{m}, \quad (2)$$

где  $K_{3m}$  – коэффициент неустойчивости опускания шихты в кольцевой зоне сечения колошника, ед.;  $K_k$  – коэффициент неустойчивости опускания шихты по всему сечению колошника, ед.;  $m$  – количество зон колошника;  $\sigma_{cp}^{V_{3m}}$  – среднее значение среднеквадратичного отклонения скорости опускания шихты в кольцевой зоне за цикл загрузки, м/мин;  $\sigma_{cp}^{V_k}$  – среднее значение среднеквадратичного отклонения скорости опускания шихты по сечению колошника за цикл загрузки, м/мин.

Среднее значение среднеквадратичного отклонения скорости опускания шихты в кольцевой зоне  $\sigma_{cp}^{V_{3m}}$  рассчитывается в соответствии с выражением

$$\sigma_{cp}^{V_{3m}} = \frac{\sum_1^i \sigma_{3mi}}{i}, \quad (3)$$

где

$$\sigma_{3m} = \sqrt{\frac{\sum (V_{3m} - V_{3m}^{cp})^2}{i-1}}, \quad (4)$$

$i$  – количество порций в цикле загрузки;  $V_{3m}$  – скорость опускания шихты в кольцевой зоне сечения колошника после выгрузки каждой порции цикла загрузки, м/мин;  $V_{3m}^{cp}$  – средняя скорость опускания шихты в кольцевой зоне сечения колошника за цикл загрузки, м/мин.

Среднее значение среднеквадратичного отклонения скорости опускания шихты по сечению колошника  $\sigma_{cp}^{V_k}$  рассчитывается в соответствии с выражением

$$\sigma_{cp}^{V_k} = \frac{\sum_1^i \sigma_{ki}}{i}, \quad (5)$$

где

$$\sigma_{ki} = \sqrt{\frac{\sum (V_k - V_k^{cp})^2}{i-1}}, \quad (6)$$

$V_k$  – скорость опускания шихты по сечению колошника после выгрузки каждой порции цикла загрузки, м/мин;  $V_k^{cp}$  – средняя скорость опускания шихты по сечению колошника за цикл загрузки, м/мин.

Уменьшение величины коэффициентов  $K_{3m}$ ,  $K_k$  и выполнение условия  $K_{3m}, K_k \rightarrow \min$  указывает на уменьшение степени неустойчивости опускания шихты в отдельных зонах и по всему сечению колошника для конкретных условий плавки.

Для оценки газодинамического режима работы доменной печи использована величина выхода колошникового газа на 1 м<sup>2</sup> сечения колошника ( $S_k$ ) при установленном давлении колошникового газа ( $P_k$ ) –  $V_{кр}^{S_k, P_k}$ . Показатель  $V_{кр}^{S_k, P_k}$  характеризует соотношение между расходом, составом комбинированного дутья и давлением газа под колошником. Выход колошникового газа вычисляется в соответствии с выражением [8]

$$V_{кр} = \frac{Q(1-\omega)}{N_2}, \quad (7)$$

где  $Q$  – расход дутья, нм<sup>3</sup>/мин;  $\omega$  – содержание кислорода в дутье, доли ед.;  $N_2$  – содержание азота в колошниковом газе, доли ед.

Показатель  $V_{кр}^{S_k, P_k}$  определяется из выражения:

$$V_{кр}^{S_k, P_k} = \frac{V_{кр}}{S_k(P_k + 1)}, \text{ нм}^3/\text{мин} \cdot \text{м}^2, \quad (8)$$

где  $S_k$  – сечение колошника печи, м<sup>2</sup>;  $P_k$  – давление колошникового газа, ата.

По опытным данным [8] оптимальные газодинамические условия в шахте доменной печи, при которых выравнивается газораспределение по сечению печи (увеличивается количество и восстановительная способность газа, проходящего через «ребень» рудных материалов), а также сохраняется устойчивость слоя шихты на колошнике (исключается переход шихты во взвешенное состояние) достигаются при скорости газа 0,8 – 0,9 м/с на полное сечение колошника и обеспечиваются фактическим расходом газа  $V_{кр}^{S_k, P_k} = 48 - 50$  нм<sup>3</sup>/мин на 1 м<sup>2</sup> сечения колошника при установленном давлении колошникового газа  $P_k$ .

Как показано в работе [8], при изменении параметров дутьевого режима плавки давление под колошником  $P_k$  необходимо устанавливать в соответствии с выражением

$$P_k = \frac{q(1-\omega)}{(48-50)N_2}, \quad (9)$$

где  $q$  – расход дутья на 1 м<sup>2</sup> сечения колошника, нм<sup>3</sup>/мин·м<sup>2</sup>;  $P_k$  – давление колошникового газа, ати;

48 – 50 – норма выхода (оптимальное количество) колошниковога газа на 1 м<sup>2</sup> сечения колошника при установленном давлении колошниковога газа, нм<sup>3</sup>/мин.

Как показано в работах [8 – 10], работа печи с оптимальным газодинамическим режимом в шахте характеризовалась улучшением технико-экономических показателей плавки, в частности, уменьшением расхода кокса на выплавку чугуна.

Задачей настоящего исследования являлось установление возможности использования для оценки газодинамического режима плавки коэффициентов нестабильности опускания шихты в отдельных зонах и по всему сечению колошника. Для этого изменения коэффициентов нестабильности опускания шихты в печи, определенных по колеблемости скоростей опускания шихтовых материалов в различных сечениях колошника и рассчитанных на основе данных радиолокационного профилемера при изменяющихся параметрах работы печи, в частности, режима загрузки, и различных соотношениях расхода, состава комбинированного дутья и давления колошниковога газа, сопоставлялись с изменением регламентированного технологической инструкцией ТИ 228-Д2-44-2001 по ведению доменной плавки на ДП № 9 ПАО «Арселор-Миттал Кривой Рог» показателя газодинамического режима плавки.

Выполненные исследования были направлены также на уточнение величины нормы выхода колошниковога газа. Ограниченная диапазоном 48 – 50 м<sup>3</sup>/мин·м<sup>2</sup> рациональная величина нормы выхода колошниковога газа [8] была установлена и предложена для существовавших ранее сырьевых условий и технологических параметров доменной плавки и не сопоставлялась с изменением состояния поверхности засыпи шихты на колошнике и ровностью ее опускания в ходе плавки при различных режимах загрузки.

Оценка хода печи с использованием коэффициентов нестабильности опускания шихты на колошнике, рассчитанных в соответствии со способом оценки ровности хода печи, адаптированным к условиям ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» была выполнена для двух периодов ее работы: первый период – январь 2008 г.; второй – май 2008 г. Причем в первом и втором периодах печь работала с близкими программами загрузки. Величина средней рудной нагрузки за цикл подач в указанные периоды изменялась от 3,09 до 3,65 т/т кокса при массе рудной части подачи 102,4 – 106,7 т.

В исследуемые периоды ДП № 9 работала с основными параметрами дутьевого и газодинамического режимов плавки, изменяющимися в следующих пределах: расход подаваемого в печь дутья 7510 – 8463 нм<sup>3</sup>/мин; температура дутья 1023 – 1119 °С; давление дутья 2,99 – 3,68 ати; доля кислорода в дутье 26,0 – 28,3 %; расход природного газа, подаваемого в печь, 494 – 573 нм<sup>3</sup>/мин. Давление колошниковога газа 1,14 – 1,70 ати при верхнем и нижнем перепадах 0,32 – 0,45 и 1,39 – 1,52 ати соответственно. Теоретическая температура горения изменялась в пределах 2091 – 2274 °С.

Для этих периодов в трех кольцевых зонах сечения колошника (1П – периферийно-промежуточная, 2П – промежуточно-центральная, Ц – центральная) были рассчитаны скорости опускания шихты и определены коэффициенты нестабильности опускания шихты в этих зонах и по всему сечению колошника, а также параметры газодинамического режима работы печи. На основе полученных данных установлены взаимосвязи коэффициентов нестабильности опускания шихтовых материалов по сечению колошника, а также в кольцевых зонах его сечения и величины выхода колошниковога газа на единицу площади колошника в диапазонах его изменения 45 – 64 м<sup>3</sup>/мин·м<sup>2</sup> (рис. 1, 2). Из анализа приведенных графиков следует, что для первого и

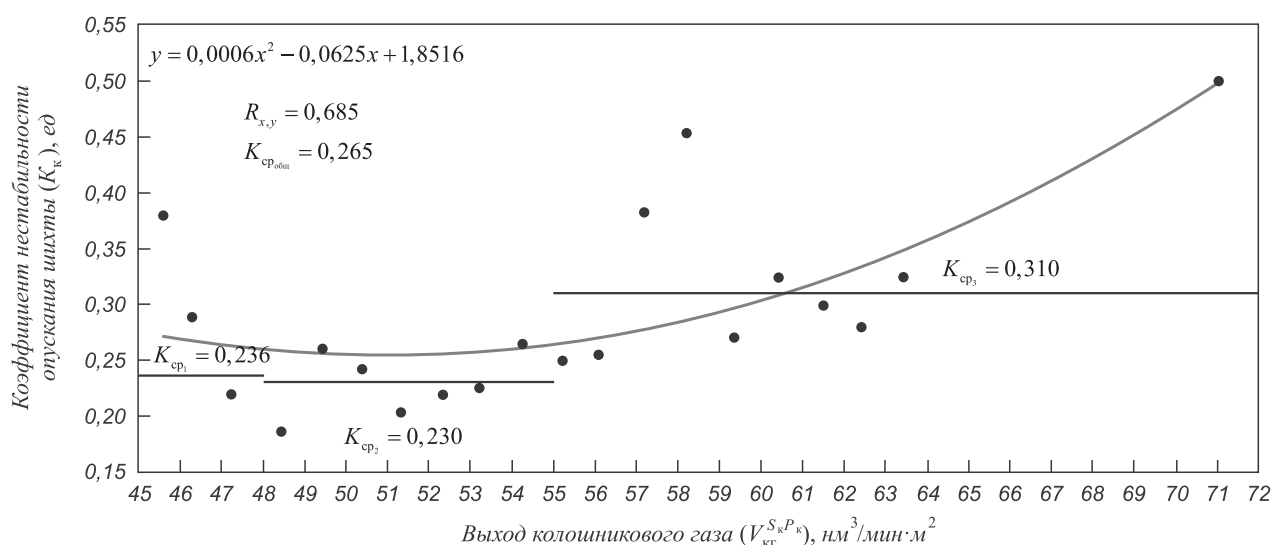


Рис. 1. Тренды изменения коэффициентов нестабильности опускания поверхности шихтовых материалов на колошнике ( $K_k$ ) в зависимости от величины выхода колошниковога газа на 1 м<sup>2</sup> сечения колошника ( $V_{кр}^{S,P}$ ) при установленном давлении под колошником для ДП № 9

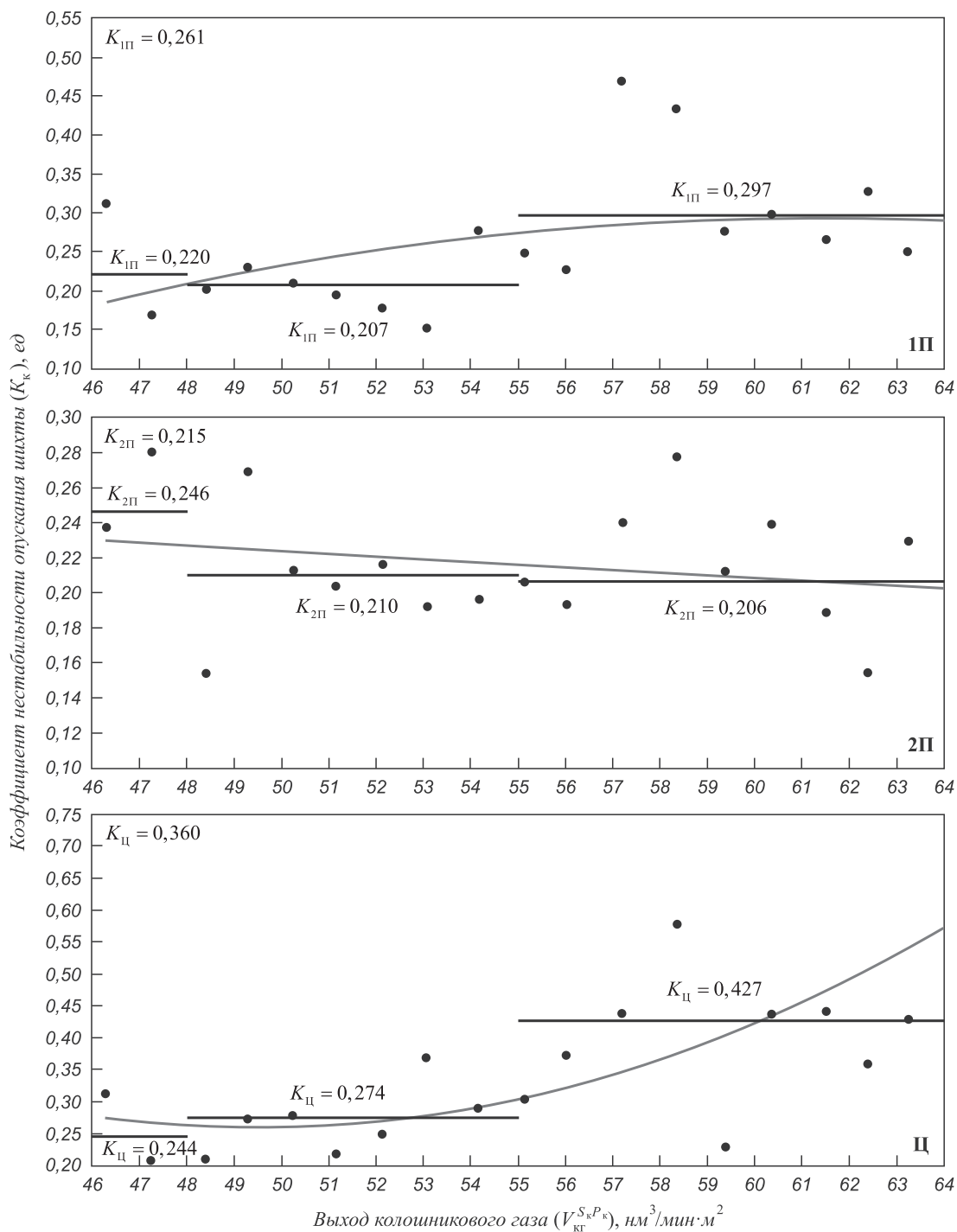


Рис. 2. Тренды изменения коэффициентов неустойчивости опускания поверхности шихтовых материалов в зонах сечения колошника ( $K_{1П}$ ,  $K_{2П}$  и  $K_{Ц}$ ) в зависимости от величины выхода колошникового газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника при установленном давлении под колошником ( $V_{kr}^{S, P_k}$ ) для ДП № 9 (средние значения для первого и второго периодов)

второго периодов работы печи со средними значениями параметров состояния поверхности засыпи, радиального распределения материалов и газового потока наиболее плавное опускание шихтовых материалов с коэффициентом неустойчивости  $K_k$ , изменяющимся в пределах 0,20 – 0,25 ед. (см. рис. 1), соответствует изменению величины выхода колошникового газа на единицу площади колошника в пределах от 48,0 до 55,0  $\text{м}^3/\text{мин}$  на  $1 \text{ м}^2$  (скорость газа в пустой шахте

0,8 – 0,92 м/с). Значительное уменьшение плавности опускания шихты по всему сечению колошника в ходе плавки, характеризуемое увеличением коэффициента неустойчивости  $K_k$  от 0,20 – 0,25 до 0,35 – 0,50 ед., отмечалось при изменении выхода колошникового газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника в пределах 55 – 64  $\text{м}^3/\text{мин}$  (скорость газа 0,92 – 1,07 м/с), что согласно данным [8] связано с неустойчивостью слоя шихты при переходе его во взвешенное состояние. При выходе колошниково-

вого газа 45 – 47  $\text{нм}^3/\text{мин}$  (скорость газа 0,75 – 0,78 м/с), при котором может развиваться каналный ход газа [10], коэффициент неустойчивости опускания шихты  $K_k$  увеличивался до 0,30 – 0,40 ед.

Указанные изменения диапазонов коэффициентов неустойчивости опускания шихты по сечению колошника и удельного выхода колошникового газа согласуются с данными, приведенными на рис. 2. Так, при увеличении показателя  $V_{\text{кг}}^{S_k P_k}$  от 55 до 64  $\text{нм}^3/\text{мин} \cdot \text{м}^2$ , наибольшая неустойчивость опускания шихты отмечалась в центральной зоне сечения колошника, где из-за минимальной рудной нагрузки наиболее вероятен переход слоя шихты во взвешенное состояние, коэффициент  $K_{11}$  увеличивался от минимального его значения 0,20 – 0,30 до 0,35 – 0,55 ед. (см. рис. 2). При этом коэффициенты неустойчивости опускания шихты  $K_{11}$  и  $K_{21}$  были меньше и изменялись, соответственно, в пределах 0,25 – 0,35 и 0,20 – 0,30 ед., а минимальные их значения составляли 0,17 – 0,25 и 0,190 – 0,220 ед. (см. рис. 2).

Уменьшение показателя  $V_{\text{кг}}^{S_k P_k}$  от 48 до 45  $\text{нм}^3/\text{мин} \cdot \text{м}^2$  сопровождалось преимущественно увеличением неустойчивости опускания шихты в периферийно-промежуточной и промежуточно-центральной зонах, в которых коэффициенты  $K_{11}$  и  $K_{21}$  увеличивались, соответственно, от 0,15 – 0,20 и 0,20 ед. до 0,30 и 0,24 – 0,28 ед., что обусловлено возможным образованием газовых каналов в этих зонах, несмотря на повышенную рудную нагрузку по отношению к центральной зоне печи, где коэффициент  $K_{11}$  изменялся от 0,20 – 0,25 до 0,30 ед. (см. рис. 2).

Влияние стабильности опускания шихтовых материалов по сечению колошника на технико-экономические показатели работы печи в исследуемые периоды может быть оценено по изменению величины расхода кокса на 1 т выплавленного чугуна. Анализ приведенного на рис. 3 графика изменения расхода кокса и коэффициентов неустойчивости опускания шихтовых материалов показал, что улучшение стабильности опускания ших-

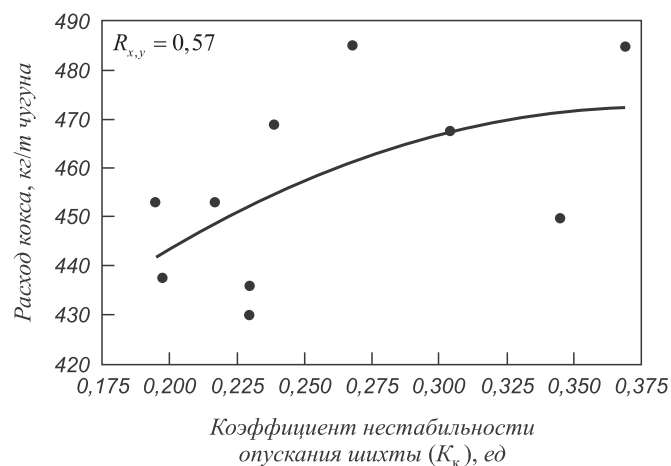


Рис. 3. Изменение удельного расхода кокса в зависимости от коэффициентов неустойчивости опускания шихтовых материалов

товых материалов в доменной печи, характеризуемое уменьшением величины коэффициентов неустойчивости, сопровождается уменьшением расхода кокса на выплавку чугуна. Возможность оперативной оценки неустойчивости опускания поверхности шихтовых материалов с помощью профилемера позволяет более полно раскрыть механизм образования экстремумов, характерных для известной и изучаемой длительное время на доменных печах связи «интенсивность – производительность – расход кокса» [11–14]. Оперативное выявление этой связи с помощью профилемера позволяет повысить эффективность управляющих воздействий.

Приведенные выше результаты исследований соответствовали периодам работы доменной печи № 9 в 2008 г. с характерными шихтовыми условиями и газодинамическими показателями. В 2010 г. (март – апрель) производительность печи была меньше, в среднем, на 1500 т/сут, из железорудной части шихты были полностью исключены окатыши и известняк, в состав шихтовых материалов были включены отходы блюминга, офлюсованные железосодержащие материалы, на 11,4 кг/т чугуна был увеличен расход антрацита, количество мелочи агломерата увеличилось, в среднем, на 20 %. При этом программа загрузки печи была близкой к используемой на печи программе в 2008 г.

В связи с изменившимися технологическими условиями ведения доменной плавки и ухудшением качества шихтовых материалов установленная норма выхода колошникового газа, соответствующая стабильному опусканию шихты с характерными для него диапазонами изменения коэффициентов неустойчивости, потребовала уточнений.

На рис. 4 представлен график изменения коэффициентов неустойчивости опускания шихты в зависимости от выхода колошникового газа на единицу площади колошника, соответствующий периодам работы ДП № 9 в марте – апреле 2010 г. Как следует из рис. 4, стабиль-

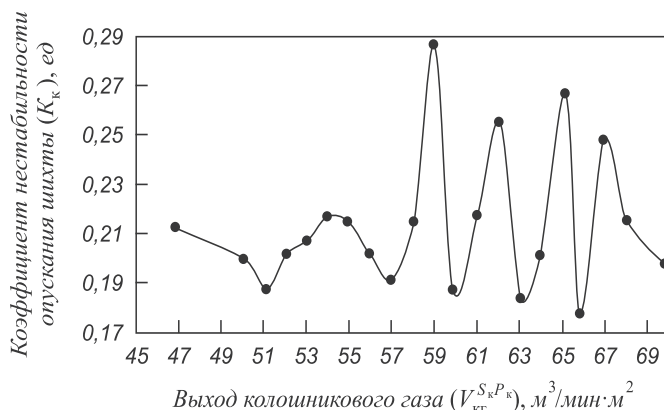


Рис. 4. Изменение коэффициентов неустойчивости опускания поверхности шихтовых материалов на колошнике в зависимости от величины выхода колошникового газа на 1  $\text{м}^2$  сечения колошника ДП № 9 (март – апрель 2010 г.)



ному опусканию шихты в исследуемом периоде с коэффициентами нестабильности, изменяющимися от 0,19 до 0,22 ед., соответствует диапазон величины нормы выхода колошникового газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника  $47 - 58 \text{ м}^3/\text{мин}$  на  $1 \text{ м}^2$ , что свидетельствует о влиянии на норму выхода колошникового газа интенсивности плавки, состава и качества шихтовых материалов.

Оценка взаимосвязи коэффициентов нестабильности опускания шихтовых материалов в зонах сечения колошника при различных технологических условиях показала, что с помощью предложенного метода могут быть определены значения нормы выхода колошникового газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника, обеспечивающие рациональный газодинамический режим плавки и максимальную стабильность опускания шихты по сечению печи. Это позволит уточнить и внести изменения в технологическую инструкцию ведения плавки на ДП № 9, в которой величина нормы выхода колошникового газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника зафиксирована в диапазоне  $48 - 50 \text{ м}^3/\text{мин}$  на  $1 \text{ м}^2$  [8] и не предусматривает оценки взаимосвязи газодинамического режима плавки и изменений распределения шихтовых материалов по сечению колошника при используемых программах загрузки печи.

По данным выполненных исследований разработан метод оценки газодинамического режима работы печи с использованием информации радиолокационного профилемера, включающий:

- Определение коэффициентов нестабильности опускания шихты на уровне колошника для каждой зоны и всего сечения колошника для выбранного интервала времени работы печи при постоянных сырьевых условиях и программах загрузки шихты в соответствии с выражениями (1) и (2).
- Установление нормы выхода колошникового газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника для условий плавки, при которых достигается наиболее стабильный сход шихты, характеризующийся минимальными значениями коэффициентов нестабильности ее опускания в каждой зоне сечения колошника.
- По изменению коэффициентов нестабильности опускания шихты в сторону их уменьшения или увеличения при выбранных технологических параметрах дутьевого режима и сопоставлению с величиной выхода колошникового газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника, ограниченной установленным диапазоном допустимых ее значений, производится оценка отклонения ровности хода печи от нормального (характеризующегося стабильным опусканием шихтовых материалов с минимальными значениями коэффициентов нестабильности) с последующей корректировкой соотношения расхода, состава комбинированного дутья и давления газа под колошником

с учетом изменений в распределении шихтовых материалов по сечению печи.

Предложенный метод оценки газодинамического режима плавки опробован в условиях работы ДП № 9 и может быть реализован в составе АСУ доменных печей, оснащенных стационарными системами измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике.

**Выводы.** Показано, что на основе динамики изменения колеблемости скорости опускания шихты могут быть определены показатели стабильности ее опускания, выраженные в виде коэффициентов нестабильности опускания шихты для отдельных зон и всего сечения колошника.

Для условий работы доменных печей, оснащенных бесконусными загрузочными устройствами и стационарными системами измерения профиля поверхности засыпи шихты, усовершенствован способ оценки стабильности опускания шихты. Согласно способу, оценка изменения колеблемости скорости опускания шихты на колошнике осуществляется по величине среднеквадратичного отклонения скоростей опускания шихты в каждой зоне и по сечению колошника и представляется в виде коэффициентов нестабильности опускания шихты на уровне колошника для каждой зоны и всего радиального сечения колошника.

Определены диапазоны изменения величины параметра газодинамического режима плавки – выхода колошникового газа на единицу площади колошника, обеспечивающие стабильность схода шихты и ровный ход печи. Установлено, что для условий доменной плавки на ДП № 9 при постоянных сырьевых условиях норма выхода колошникового газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника, при которой достигается стабильный сход шихты, составляет  $48 - 55 \text{ м}^3/\text{мин} \cdot \text{м}^2$ .

Разработан метод оценки газодинамического режима работы печи, включающий:

- определение для выбранного интервала времени работы печи при постоянных сырьевых условиях и программах загрузки шихты БЗУ показателей стабильности опускания шихты на уровне колошника для каждой зоны и всего сечения колошника;
- установление для существующих условий плавки, при которых достигается наиболее стабильный сход шихты, минимальных значений коэффициентов нестабильности ее в каждой зоне сечения колошника и нормы выхода колошникового газа на  $1 \text{ м}^2$  сечения колошника;
- оценку отклонения ровности хода печи от нормального и корректировку соотношения между расходом и составом комбинированного дутья и давлением газа под колошником с учетом изменений распределения шихтовых материалов по сечению печи по изменению коэффициентов нестабильности опускания шихты в сторону их уменьшения или увеличения при выбранных

технологических параметрах дутьевого режима и по сопоставлению с величиной выхода колошниковога на 1 м<sup>2</sup> сечения колошника, ограниченной установленным диапазоном допустимых ее значений.

На основе предложенного метода выполнена оценка ровности хода доменной печи № 9 в исследуемые периоды ее работы по показателям стабильности опускания шихты по сечению колошника, показавшая, что в период работы печи, характеризующийся наименьшими значениями коэффициентов нестабильности опускания шихты  $K_k = 0,20$  ед., были достигнуты согласованные параметры дутьевого режима печи и давления газа под колошником, обеспечивающие близкий к рациональному газодинамический режим плавки, что сопровождалось уменьшением расхода кокса на выплавку чугуна.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Металлургия чугуна: Учеб. для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. / Под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.*
2. *Жеребин Б.Н. Практика ведения доменной печи. – М.: Металлургия, 1980. – 248 с.*
3. *Пыжов В.Т. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1984. № 4. С. 5 – 9.*
4. *Готлиб А.Д. Доменный процесс. – Гостехиздат УССР, 1958. – 165 с.*
5. *Шулико С.Т., Воронин Г.Ю., Бузоверя М.Т., Хомяков Э.С. // Металл и литье Украины. 1994. № 9 – 10. С. 6 – 8.*

6. *Большаков В.И., Муравьева И.Г., Семенов Ю.С., Шулико С.Т. Анализ результатов исследований скоростей опускания шихты в доменных печах. // Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». 2006. Вып. 12. С. 109 – 117.*
7. *Пат. 93975 С2 UA. Способ ведения доменной плавки / Большаков В.И., Шулико С.Т., Муравьева И.Г. // Бюл. изобретений. 2011. № 6.*
8. *А.с. 827545 СССР. Способ ведения доменной плавки / Некрасов З.И., Бузоверя М.Т., Хомич И.Т. // Бюл. изобретений. 1981. № 17.*
9. *Бузоверя М.Т., Шулико С.Т., Попов В.Н. Влияние повышенного давления колошниковога на работу горна доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup>. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Вып. 5. – К.: Наукова думка, 1986. С. 36 – 39.*
10. *Бузоверя М.Т., Ульянов А.Г., Почекайло Н.Е. и др. Бюл. ин-та «Черметинформация». Черная металлургия. 1995. № 12. С. 47 – 48.*
11. *Товаровский И.Г. Доменная плавка. 2-е изд. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 768 с.*
12. *Бочка В.В., Иващенко В.П., Ковшов В.Н. и др. Некоторые особенности работы доменной печи при повышении интенсивности плавки. // Новини науки Придніпров'я, збірка наукових доповідей до науково-практичної конференції, присвяченої 100-річчю Г. А. Воловика, 2010. С. 50 – 53.*
13. *Бочка В.В. // Сталь. 1999. № 3. С. 4 – 7.*
14. *Рамм А.Н. О влиянии интенсивности плавки на производительность доменных печей и относительный расход кокса // Сб. Исследование доменного процесса. – М.: Изд. АН СССР, 1957. С. 85 – 87.*

© 2012 г. *И.Г. Муравьева, В.И. Большаков, Ю.С. Семенов, Е.И. Шумельчик*  
Поступила 12 декабря 2011 г.

УДК. 041:66.012.37

*В.В. Курносков, Л.А. Шульц*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

### КАМЕРНАЯ РЕКУПЕРАТИВНАЯ ПЕЧЬ С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ РАЗДЕЛЕНИЕМ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ БЕЗОКСИДНОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА СТАЛИ В КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Безокислительный нагрев стали открытым пламенем, в случае применения в качестве топлива природного газа, до температуры обработки ее давлением предполагает нагрев металла в продуктах неполного горения при коэффициенте расхода воздуха  $n$  не выше 0,5. Доля выделенной химической энергии природного газа при коэффициенте расхода необогащенного кислородом воздуха  $n = 0,48 – 0,5$  в равновесных условиях составляет всего около 35 %, а калориметрическая температура – 1300 °С. Естественно, приблизиться как по энергоэффективности, так и по скорости и температуре

нагрева металла к печам с обычным полным сжиганием топлива в таких условиях возможно только в случае стадийного сжигания топлива в них с аэродинамическим разделением рабочего пространства, т.е. открытым для нагрева металла излучением пламени не только первичного, но вторичного сжигания (дожигания) топлива [1]. Если же иметь в виду рекуперативные традиционные печи, достичь сравнимых с ними результатов по интенсивности и экономичности нагрева в условиях безокислительного нагрева в печах с аэродинамическим разделением возможно только при равнозначном с обычным нагревом использовании тепла отходящих газов.

Учитывая известные трудности при температуре подогрева газов выше 600 °С [2], связанные либо со стойкостью металлических рекуператоров, либо со сложностью работы с регенераторами, либо с образованием

<sup>1</sup> Работа выполнена по гранту (2010 – 2012 г.) «Создание сквозной энергосберегающей технологии термообработки ответственных изделий атомной энергетики на основе энергоэффективного оборудования» в соответствии с постановлением Правительства РФ № 218 от 09.04.2010 г.