

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

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

### **АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ХОДА ПЕЧИ**

Целью работы является анализ известных способов оценки хода доменной печи для возможного их использования в системах контроля и управления доменной плавкой. Выполнена классификация известных способов оценки газораспределения в доменной печи по основным направлениям совершенствования доменной плавки. Показано, что для оперативной оценки хода печи не может быть использован ни один из известных способов оценки газораспределения. Для разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой необходима разработка нового целевого критерия, который позволит идентифицировать место нарушения процесса и выбрать эффективную меру воздействия. При этом активной мерой воздействия на верхнюю часть печи при неизменных шихтовых условиях может быть изменение распределения материалов. Для воздействия на нижнюю часть печи может быть использовано изменение влажности или температуры дутья, а также расхода природного газа и кислорода

**Ключевые слова:** доменная печь, контроль и управление доменной плавкой, газораспределение, оценка, критерий

**Современное состояние вопроса.** Известно, что высокая эффективность доменного процесса достигается, как правило, при ровном ходе печи, который характеризуется стабильностью и равномерным сходом шихтовых материалов, а также определенным газодинамическим режимом [1]. Одной из важнейших задач управления доменной плавкой является обеспечение рационального для данных шихтовых условий распределения материалов и газов по площади поперечного сечения печи [1]. Как показано в работах К. М. Бугаева [2], И. Г. Товаровского [1], Б. М. Раковского [3], при прочих равных условиях показатели плавки зависят в основном от газораспределения и определяемой им степени использования газов. Общеизвестно, что ровность хода печи определяется газораспределением.

По определению Б. Н. Жеребина основными показателями ровного хода доменной печи являются: плавный и устойчивый сход шихтовых материалов с неодинаковой, но постоянной скоростью в различных зонах горизонтального сечения печи, а также стабильный характер распределения материалов и газового потока [4]. Оценку ровности хода печи производят на основе анализа диаграмм общего перепада давления и работы зондов.

Для обеспечения рационального газораспределения требуется, прежде всего, надежная его оценка. Однако способов непосредственного

контроля распределения газов по сечению печи до сих пор нет. Используемая в настоящее время на предприятиях оценка газораспределения производится по косвенным параметрам (содержанию отдельных компонентов в газе и его температуре по радиусу колошника) и дает лишь качественную картину. В монографии К. М. Бугаева выполнен анализ методов изучения распределения газов, в том числе измерений скоростного напора, расчетных методов определения интенсивности газовых потоков в доменной печи [2].

**Целью настоящей работы** является анализ известных способов оценки хода доменной печи.

**Изложение основных материалов исследования.** Выполненный анализ известных способов оценки газораспределения в доменной печи позволил условно их классифицировать по следующим направлениям:

**1. Расчетные методы определения количества газов в различных сечениях печи.** И. Г. Товаровским отмечено, что разработка методов оценки количества газов, проходящих в различных кольцевых сечениях печи, выполнялась пока лишь в методическом плане [1]. Суть ее заключается в расчете количества газов, проходящих в различных кольцевых сечениях печи, по их составу и температуре на основе решения системы балансовых уравнений.

Б. В. Бокланом показано, что предложено много различных методов определения количественного распределения газа по зонам поперечного сечения печи [5]. К первой группе определения распределения газа по радиальному сечению относится метод измерения скоростного напора газа в различных точках сечения и в зависимости от распределения скоростей газа определяется распределение его количества. Вторая группа – это методы индикации доменного газа парами ртути, гелием, радиоактивными элементами и т.д. В диссертационной работе Б. В. Бокланом предложена методика определения количества газа по зонам радиального сечения колошника, в основе которой – зависимость изменения содержания  $CO_2$  или  $CO$  в общем колошниковом газе от изменения содержания  $CO_2$  или  $CO$  в газе каждой из зон радиального сечения [6].

**2. Для оценки газораспределения используют расчетные показатели**, а именно:

– газовые нагрузки, определяемые отношением объема газа к массе железорудных материалов [7]. При выборе режимов загрузки стремятся к наибольшей равномерности распределения газовых нагрузок по сечению печи при возможно меньшем перепаде давления в столбе шихты.

Проф. В. Н. Ковшовым с соавторами [8] применяются следующие показатели распределения материалов ( $\sigma_{\Pi}$ ) и газов ( $\sigma_{\Gamma}$ ):

$$\sigma_{\Gamma} = \frac{V_{\Pi} + V_C}{V_C + V_{\Pi}}$$

где  $V_{\Pi}$ ,  $V_C$ ,  $V_{Ц}$  – усредненные по высоте слоя значения скоростей газа в равновеликих по площади периферийной, средней и осевой зонах колошника

$$\sigma_{ш} = \frac{\Pi_{\Pi} + \Pi_C}{\Pi_C + \Pi_{\psi}},$$

где  $\Pi_{\Pi}$ ,  $\Pi_C$ ,  $\Pi_{\psi}$  – параметры слоя (толщина слоя, масса шихты и др.) в периферийной, средней и осевой зонах колошника.

– для оценки газораспределения В. М. Паршаковым и сотрудниками ВНИИМТ предложено использовать коэффициент радиальной неравномерности ( $K_p$ ) [9]:

$$K_p = \frac{t_n}{t_{\psi}} = \frac{0,4(t_1 + t_2) + 0,2t_3}{0,2t_3 + 0,4(t_4 + t_5)},$$

где  $t_n$  и  $t_{\psi}$  – средняя температура газа в периферийной и центральной части колошника соответственно;  $t_{1-5}$  – температура газа в контролируемых сечениях колошника.

– в работе [10] Е. Г. Донсковым с соавторами для оценки влияния распределения газового потока и шихтовых материалов по радиусу колошника на ход и основные показатели работы печи предложен показатель, определяемый согласно выражению:

$$K_{\Delta} = \frac{(CO_{2_{cp}} - CO_{2_n})(1 - \rho)}{(CO_{2_{cp}} - CO_{2_{\psi}})}$$

$$\rho = R_{p,z} / R_{кол},$$

где  $CO_{2_{cp}}$ ,  $CO_{2_n}$ ,  $CO_{2_{\psi}}$  – содержание  $CO_2$  в радиальном газе в районе рудного гребня, у стен и в центре печи соответственно;

$\rho$  – показатель, характеризующий распределение шихтовых материалов по радиусу колошника;

$R_{p,z}$  – расстояние от оси печи до рудного гребня (максимума  $CO_2$ );

$R_{кол}$  – радиус колошника;

$K_{\Delta}$  – комплексный показатель, характеризующий распределение газа и шихты по радиусу колошника, уменьшающийся с подгрузкой периферийной части и увеличивающийся с подгрузкой центральной части печи.

– наиболее известен показатель, предложенный В. К. Дурновым и названный им коэффициентом аэродинамической устойчивости слоя, который характеризует соотношение поверхностных и массовых сил в противотоке [11]:

$$N_y = \frac{\Delta P}{gH\rho}.$$

В дальнейшем Н. А. Спирин с коллегами преобразовали этот коэффициент в критерий устойчивости слоя шихты в печи при

воздействии на него газового потока, в качестве которого принимается степень уравнивания (СУ) шихты газом [12]:

$$CY = \frac{10\Delta P}{H_{AYH} \gamma_H^{\text{III}}},$$

где СУ – степень уравнивания шихты газовым потоком, доли, ед.

$H_A$  – высота «активной» части слоя шихты (высота слоя шихты от уровня воздушных фурм до уровня шихты в печи), м;  $\Delta P$  – перепад давления газов по высоте «активной» части слоя шихты, кг/см<sup>2</sup> (атм);

$\gamma_H^{\text{III}}$  – насыпная масса шихты, т/м<sup>3</sup>.

Как показывает практика, при достижении значения СУ=55–60% наступает изменение в ходе шихтовых материалов: режим плавного их движения сменяется режимом неровного схода материалов с появлением внутри слоя локальных разрыхлений и пустот, в которых развиваются явления разделения шихты на отдельные составляющие в соответствии с их крупностью и плотностью. Таким образом, происходит нарушение установленного при загрузке значения рудной нагрузки с развитием похолодания доменной плавки вследствие прихода в нижнюю часть печи материалов с увеличенной рудной нагрузкой.

**3. Оценка газораспределения по результатам математического моделирования.** Наиболее значимые исследования по моделированию газодинамического режима доменной плавки выполнены во ВНИИМТ [1, 13].

В. К. Дурновым и коллегами в 70-х годах предложена математическая модель для определения оптимального дутьевого режима, включающая уравнение Кармана, а также критерий газодинамической устойчивости в виде [14]:

$$Du_{opt} = \frac{dp}{dh} \cdot \frac{1}{\rho_{\text{III}}} = 0,5 - 0,6; \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dh} = f \frac{W_{\Gamma}^2 \rho_{\Gamma}}{d_{\text{III}} g \Phi} \cdot \frac{1-g}{g^3} \cdot \frac{(t_{\Gamma} + 273)}{(\rho_{\Gamma} + 1)273}; \quad (2)$$

$$\frac{1}{d_{\text{III}}} = \frac{V_{\kappa}}{\left( V_{\kappa} + V_p \frac{\rho_{\kappa}}{\rho_p} \right) d_{\kappa}} + \frac{V_p}{\left( V_p + V_{\kappa} \frac{\rho_p}{\rho_{\kappa}} \right) d_p}; \quad (3)$$

$$\rho_{\text{III}} = \frac{V_p \left( 1 - \frac{G_{\varphi}}{V_p} \right) + V_{\kappa} \left( 1 - \frac{G_{\kappa}}{V_{\kappa}} \right)}{\frac{V}{\rho_p (1 - k_p)} + \frac{V_{\kappa}}{\rho_{\kappa} (1 - \varepsilon_{\kappa})}}; \quad (4)$$

где  $Du$  – критерий газодинамической устойчивости слоя;

$dp/dh$  – градиент давления по высоте печи, кг с/м<sup>3</sup>;

$\rho$  – плотность (для материалов – насыпной вес), кг/м<sup>3</sup>;

$f$  – коэффициент сопротивления слоя;

$W_{\Gamma}$  – условная скорость газа при нормальных условиях, м/с;

$t$  – температура, °С

$p$  – избыточное давление, ат;

$d$  – средневзвешенный диаметр материалов, м;

$g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$\Phi$  – коэффициент формы материалов;

$\varepsilon$  – порозность слоя на колошнике;

$Re$  – критерий Рейнольдса;

$\eta_r$  – динамическая вязкость газа, кгс/м с);

$V$  – расход, м<sup>3</sup>/мин (для газов при нормальных условиях) и кг/мин (для материалов);

$F$  – площадь поперечного сечения печи, м<sup>2</sup>;

$\varphi$  – степень восстановления рудной части шихты;

$C$  – кислород руды, связанный с железом, кг/мин;

$\left(1 - \frac{G\varphi}{V_p}\right)$  – поправка на изменение рудной части шихты по высоте,

обусловленная ее восстановлением;

$G_{\kappa}$  – количество газифицированного кокса, кг/мин;

$\left(1 - \frac{G_{\kappa}}{V_{\kappa}}\right)$  – поправка на изменение расхода кокса по высоте печи,

Коэффициент сопротивления слоя в уравнении (2) определяется согласно выражению Эгона

$$f = 1,75 + \frac{150(1 - \varepsilon)}{Re}; \quad (5)$$

где

$$Re = \frac{W_{\Gamma} d_{\text{ср}} p_r \Phi}{\eta_r (1 - \varepsilon)} \quad (6)$$

Уравнение (1) отражает условие оптимального дутьевого режима доменной плавки, согласно которому в случае затруднения нормального схода материалов ( $Du > 0,5 \div 0,6$ ) необходимо уменьшить расход дутья. В результате решения уравнений (2)–(6) для данных сырьевых условий плавки можно получить расчетные параметры газодинамического режима доменной печи, при этом разность ( $Du_{\text{расч.}} - Du_{\text{опт.}}$ ) будет указывать на отклонение расчетного режима относительно оптимального. Итерационным сведением этой разности к нулю одним из регулирующих параметров определяется оптимальное его значение. Из уравнений (1) и (2) следует, что в качестве регулирующих воздействий на величину

критерия  $Du$  могут быть использованы следующие параметры: расход дутья для оперативного регулирования, давление газа под колошником и отсев мелочи из загружаемой шихты.

Выполненные в последние годы исследования ВНИИМТ по моделированию газодинамического режима доменной плавки изложены в монографии Н. А. Спирина [12]. Моделирование газодинамического режима доменной плавки предусматривает:

- расчет газодинамических характеристик слоя шихтовых материалов;
- оценку изменения перепадов давления и степени уравновешивания шихты в отдельных зонах печи при изменении расхода дутья;
- оценку изменения перепадов давления и степени уравновешивания шихты в отдельных зонах печи при изменении параметров загружаемой шихты.

Поскольку, как следует из литературных данных, примерно 60% потерь давления в печи приходится на нижнюю зону [15], математическое моделирование газодинамических закономерностей слоя шихты в печи выполняется раздельно для нижней и верхней частей слоя шихты.

Приведенные выше способы оценки газораспределения в доменной печи не могут быть использованы для оперативного управления доменной плавкой. На практике газодинамическим показателем хода печи является перепад давления газа в слое шихты ( $\Delta P$ ). Как указывает Н. И. Красавцев, сопротивление столба материалов протеканию газов было бы наиболее правильно характеризовать фактической скоростью газа, однако в связи с отсутствием возможности ее определения используют косвенную характеристику – потери напора (перепад давления) газа на пути его через слой материалов [16]. В практике управления ходом доменной печи широко используют величины перепадов давлений по высоте печи – верхнего и нижнего [13]. В. П. Тарасовым предложено в качестве газодинамического индекса вместо  $\Delta P$  использовать соотношение  $V_d / \Delta P$  (расход дутья к потере напора) [17].

При решении задач прогнозирования хода печи с помощью математических моделей доменной плавки используют аналитические выражения для определения перепада давления газов. обстоятельный анализ известных аналитических зависимостей для определения перепада давления газов при прохождении через пористую среду приведен в монографии В. К. Грузинова [18]. Автором проанализированы зависимости, предложенные Цайсбергом, Л. Н. Рамзиным, О. С. Фернесом, Джозефом, С. Н. Сыркиным, М. А. Шаповаловым и др.

Как отмечает В. К. Грузинов, наибольшее распространение получили следующие выражения для определения потерь напора газового потока:

- зависимость, предложенная Вагнером и др., позволяющая определять перепад давления, отнесенный к единице высоты:

$$\Delta P_1 = \frac{\gamma_i^G}{d_c} \cdot a \frac{w_0}{g_g} \varepsilon, \text{ мм вод.ст.},$$

где  $\gamma_i^G$  – удельный вес газа при температуре  $t^0$ , кг/м<sup>3</sup>;

$d_c$  – средний диаметр смеси материалов, м.

$$d_c = \frac{1}{\frac{q_1}{d_1} + \frac{q_2}{d_2} + \dots + \frac{q_n}{d_n}}$$

где  $q_i$  – объемная доля соответствующей фракции;

$a$  – коэффициент сопротивления, ед.

$w_0$  – скорость газа, отнесенная к свободному сечению, м/с;

$\varepsilon$  – порозность, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

– выражение, предложенное Н. М. Жаворонковым:

$$\Delta P_1 = \frac{4f}{d_3} \cdot \frac{\gamma w_0^2}{2gS_{Ж}}, \text{ кг/м}^2 \text{ или мм вод. ст.},$$

где  $f$  – коэффициент трения, который при  $Re > 60$  равен  $3,8 Re^{-0,2}$ , а при  $Re < 60$  равен  $100/Re$ ;

$S_{Ж}$  – площадь среднего живого сечения в столбе материалов в долях единицы;

$$\text{При этом } R_e = \frac{w_0 d_3 \gamma}{\mu g S_{Ж}}; d_3 = 4 \frac{\varepsilon}{F}; \varepsilon - \text{ порозность, м}^3/\text{м}^3; F -$$

суммарная поверхность кусков в слое, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;

– зависимость для определения перепада давления, предложенная

М.А. Стефановичем:

$$\Delta P_1 = \lambda_{\Sigma} \frac{\gamma w_0^2}{2g \cdot d_n \varepsilon^2},$$

где  $d_n$  – приведенный диаметр пустот  $= 4\varepsilon/S$ ;

$$S - \text{ суммарная поверхность частиц} = K_{\Sigma} \frac{a_i}{d_i} \quad (a - \text{ объемная доля}$$

фракции  $d$ ;  $K$  – коэффициент формы);

$\lambda_{\Sigma}$  – коэффициент сопротивления;

Наибольший интерес и распространение получило уравнение Эгона:

$$\Delta P = \lambda \frac{W^2}{2} \rho \frac{H}{d_3} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{T}{273} \frac{1}{(1+P_r)}, \quad (3.83)$$

где  $\lambda$  – коэффициент, учитывающий форму и шероховатость частиц слоя;

$W$  – скорость фильтрации газового потока;

$\rho$  – плотность газа;

$H$  – высота слоя шихты в печи;

$\varepsilon$  – порозность слоя шихты;

$T$  – температура газа;

$P_{г}$  – избыточное давление газа.

Негативное влияние на ход печи оказывает образование взвешенного слоя шихтовых материалов (так называемая потеря устойчивости слоя), приводящее к разрушению структуры столба. Наиболее значимые результаты исследований этого процесса получены Б. В. Бокланом [6]. Как показано в его диссертационной работе: «Поток газа, проходящий через столб шихтовых материалов, испытывает со стороны последних силы сопротивления, направленные против скорости потока. В зависимости от ориентации потока по отношению к силе тяжести кусков материала, газодинамических характеристик слоя шихты, свойств газового потока и характера взаимодействия слоя шихты и потока газа, подъемная сила потока газа может изменять и даже разрушать структуру столба шихтовых материалов, переводя их во взвешенное состояние. Величину подъемной силы потока газа определяет кинетическая энергия массы газа, а она главным образом зависит от скорости потока. Поэтому в качестве исходного критерия при определении критических условий изменения структуры столба шихтовых материалов следует принимать скорость движения газового потока в столбе материалов». В отличие от ряда исследователей - одних, принимавших в качестве критерия потерю напора газового потока, либо других – предлагающих определить критическую скорость перехода во взвешенное состояние отдельно взятого куска, Б. В. Боклан в диссертационной работе рассматривает условие перехода неподвижного слоя в псевдооживленное состояние и предлагает выражение для определения критической скорости газа, при которой шихта переходит в псевдооживленное состояние. Началу псевдооживления соответствует момент, когда число псевдооживления

$$n = \frac{W_o}{W_o''} > 1,$$

где  $W_o$  – скорость газа, приведенная к свободному сечению кольца;

$W_o''$  – скорость начала псевдооживления.

По мнению Б. В. Боклана, псевдооживленный слой характерен для осевой зоны печи.

О возможности и условиях возникновения псевдооживленного слоя сказано в монографии В. П. Тарасова [17]. Под руководством В. П. Тарасова в Мариупольском металлургическом институте в ходе выполнения исследований определялись условия перехода зернистого слоя во взвешенное состояние (или состояние кипения) [19]. Одним из основных результатов эксперимента является подтверждение предположения о наличии перетока железорудных материалов в



центральную зону, заполненную коксом, при переходе последнего во взвешенное состояние. Такую возможность следует учитывать при исследовании распределения шихты и газов в доменной печи.

В работе [20] показано, что повышение интенсивности сверх оптимальной, приводящее к разрыхлению шихтовых материалов в шахте печи и происходящее (для противоточного движения материалов и газов) при степени их уравнивания подъемными силами газового потока 0,5-0,6 является одной из основных причин снижения показателей плавки.

В монографии М. А. Стефановича выполнен анализ общих закономерностей движения газа в доменной печи и приведены выражения, описывающие потери напора газа в слое (h) при переходном его движении ( $Re_{сл}$ , меньше 250–350) и турбулентном ( $Re_{сл} > 350$ ) [15]:

$$h_{пер} = \frac{182,5 \gamma^{0,2} \mu^{0,8} \omega^{1,20} H}{g^{0,2} d^{1,8} \varepsilon^{1,20}}; \quad (7)$$

$$h_{турб} = \frac{3,82 \gamma^{0,89} \mu^{0,11} \omega^{1,89} H}{g^{0,89} d^{1,11} \varepsilon^{1,89}}; \quad (8)$$

$$\text{где } R_u = \frac{d\gamma\omega}{g\mu\varepsilon} \quad (9)$$

$\gamma$  – удельный вес газа, кг/м<sup>3</sup> при н.у.;

$\mu$  – динамическая вязкость, кг/сек м<sup>2</sup>;

$\omega$  – приведенная к пустоте скорость, м/сек;

$v$  – средняя скорость в межпустотном пространстве  $v = \omega / \varepsilon$ , м/с;

$g$  – 9,81 м/сек<sup>2</sup>;

$d$  – 4  $\varepsilon / S$  – приведенный размер пустот слоя, м;

$S$  – поверхность кусков слоя, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;

$\varepsilon$  – порозность, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$H$  – высота слоя, м;

$$S = ZK \frac{a}{f} (1 - \varepsilon);$$

здесь  $K$  – коэффициент формы, ед.;  $a$  – объемная доля фракции размером  $f$ ;  $1-\varepsilon$  – доля объема, занятого кусками материала в слое.

Из уравнений (7) и (8) следует, что при одинаковой неравномерности распределения шихты по сечению газовый поток будет равномернее при турбулентном режиме. Результаты расчетов показали, что зона переходного режима охватывает области минимальных скоростей движения газа и максимальных рудных нагрузок. Области переходного режима больше в нижней части шахты, где они занимают до 70% сечения печи. Зона турбулентного режима находится в местах повышенных скоростей движения газа и пониженных рудных нагрузок.

Можно согласиться с утверждением проф. В. П. Тарасова о том, что явления, связанные с потерей стабильности слоя, в настоящее время изучены недостаточно [19].

Газодинамический режим доменной плавки в значительной степени определяется распределением шихтовых материалов на колошнике печи. Для качественной оценки радиального распределения шихты на колошнике используют кривые распределения  $\text{CO}_2$  в газе. Многочисленными исследованиями подтверждено, что между рудной нагрузкой по сечению печи и содержанием  $\text{CO}_2$  в газе существует довольно тесная связь [22]. Использование кривой распределения  $\text{CO}_2$  для оценки радиального распределения основано на упрощающих взаимосвязь тепло- и массообменных и газодинамических явлений прототока в печи предположениях. По мнению исследователей Ленинградского политехнического института (Л. А. Бялый, Е. И. Райх, К. К. Шкодин и др.) «...в зонах с повышенной температурой низкие концентрации  $\text{CO}_2$  в газе свидетельствуют не столько о пониженных рудных нагрузках, сколько о высокой степени развития реакции взаимодействия диоксида углерода с углеродом кокса. В случаях значительного изменения расхода вдуваемого в горн природного газа оценка распределения материалов и газов по кривой содержания  $\text{CO}_2$  может оказаться ошибочной в связи с тем, что железо восстанавливается не только оксидом углерода, но и водородом. Очень низкое содержание  $\text{CO}_2$  в газе у оси скорее связано не с исчезающее малой рудной нагрузкой, а с высокими температурами газов, обуславливающими существенное развитие реакции газификации углерода кокса». Поэтому, достаточно точное определение распределения рудных нагрузок непосредственно по содержанию  $\text{CO}_2$  в зонах колошника (или по величине температур газа над поверхностью засыпи шихты в этих зонах), не представляется возможным, т.к. может давать существенно искаженные результаты. В ряде случаев для контроля радиального распределения шихтовых материалов и газов используют установленные над поверхностью засыпи шихты на колошнике термобалки. И значения содержания  $\text{CO}_2$  в газе и температур над поверхностью засыпи позволяют лишь качественно оценить характер распределения шихтовых материалов на колошнике печи.

Количественная оценка распределения материалов осуществляется на основе определения показателей распределения шихтовых материалов с помощью расчетных методов (математической модели радиального распределения либо инженерной методики определения рудных нагрузок выгружаемых шихтовых материалов на лотке загрузочного устройства) и последующего анализа результатов в совокупности с параметрами и показателями доменной плавки [23].

Известен также ряд методик количественной оценки распределения материалов. В работе [24] приведена методика количественной оценки

распределения материалов, основанная на измерении содержания  $CO_2$  в семи точках радиуса. Показано, что из семи различных показателей распределения (схема выбора критериев приведена на рис. 1), исследованных авторами, наиболее представительным является критерий  $K_{\Delta}$ , определяемый из выражения:

$$K_{\Delta} = \frac{S_n}{S_{\psi}} = \frac{a_{\max}}{r_{\text{кол}} - a_{\max}} \left( 1 \pm \frac{(\Delta CO_2)_{\psi-n}}{CO_{2\max} - CO_{2\psi}} \right),$$

где  $S_n$  и  $S_{\psi}$  – площади под кривой изменения  $CO_2$  на периферии и в центре;

$a_{\max}$  – абсолютное максимальное содержание  $CO_2$  на радиусе колошника, м;

$r_{\text{кол}}$  – радиус колошника, м;

$CO_{2\max}$ ,  $CO_{2n}$ ,  $CO_{2\psi}$  – содержание углекислоты в точке максимума, на периферии и у оси, %:

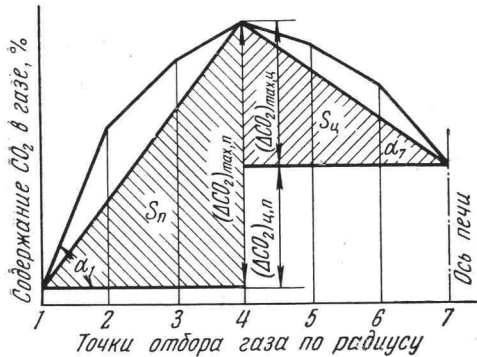


Рис. 1. Схема выбора критериев распределения материалов по радиусу колошника, основанная на изменении содержания  $CO_2$

Методика, применяемая в Днепропетровском металлургическом институте [21] (схема приведена на рис. 2), основана на оценке распределения материалов по трем точкам кривой распределения  $CO_2$  по радиусу колошника. Показателями распределения являются:

$$a = (CO_{2\max} - CO_{2\text{периф.}}) + (CO_{2\max} - CO_{2\text{ось.}});$$

$$d = (CO_{2\text{периф.}} - CO_{2\text{ось.}}) / 2;$$

$$\Delta CO_2 = CO_{2n} - CO_{2\psi}.$$

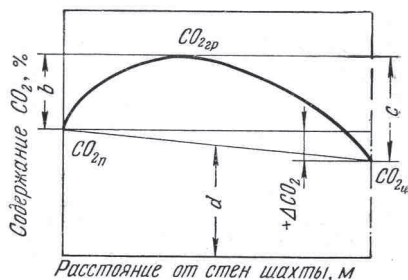


Рис.2. Схема к определению количественных показателей распределения материалов по кривой зависимости содержания  $CO_2$  от радиуса

Показатель  $a$  характеризует неравномерность распределения материалов по радиусу печи – чем больше значение этого показателя, тем неравномернее распределена рудная часть шихты по радиальному сечению печи. Показатель  $d$  характеризует расположение кривой над осью абсцисс, т.е. косвенно содержание  $CO_2$  в общем колошниковом газе. Чем выше этот показатель, тем больше загрузка печи рудой, тем лучше использование газа. Показатель  $\Delta CO_2$  характеризует соотношение нагрузки периферии и центра. При положительном значении  $\Delta CO_2$  периферия нагружена больше центра, при отрицательном – наоборот.

Достоверная оценка распределения шихтовых материалов может быть получена с помощью установленной на ДП №9 стационарной системы контроля поверхности засыпи шихты, на основе измерений которой определяются параметры состояния поверхности засыпи [25]. По мнению Е. И. Райха, «решение задач достоверной оценки распределений расходов газов и материалов вблизи уровня засыпи позволит более обоснованно решать проблему оценки и управления противотоком» [26].

Целенаправленное управление газодинамическим режимом работы печей (противотоком в трактовке Е. И. Райха), способствующее форсированию их хода, возможно лишь при условии получения оперативной и достоверной информации о возникших (или возникающих) нарушениях в газодинамике, локализации места нарушения и достоверной оценке причины нарушения [27]. Однако, при существующих в настоящее время типовых системах контроля газопроницаемости по величине перепадов статического давления газового потока, измеряемых по высоте шахты печи между давлением дутья и в кольцевом воздухопроводе, давлением в средней части печи и в колошниковом пространстве, такое управление возможно лишь с большой степенью «грубости».

**Заключение.** В представленной работе выполнен широкий обзор способов контроля хода печи, из которого следует, что ни один из этих способов не может быть использован в целях оперативной оценки. Решение задач оперативного управления ходом доменной печи является основной целью разрабатываемой интеллектуальной системы поддержки

принятия решений по управлению доменной плавкой. Для этого предусматривается разработка целевого критерия, который позволит идентифицировать (определить) место нарушения процесса и на основе этого выбрать эффективную меру воздействия. При этом активной мерой воздействия на верхнюю часть печи при неизменных шихтовых условиях является изменение распределения материалов. Для воздействия на нижнюю часть печи необходимо изменить влажность или температуру дутья, расход природного газа и кислорода [21].

1. *Товаровский И.Г.* Доменная плавка. Монография. 2-е издание. / И.Г.Товаровский – Днепропетровск: изд. «Пороги», 2009. – 768 с.
2. *Бугаев К.М.* Распределение газов в доменных печах / К.М.Бугаев. – Москва: Metallurgia, 1974. – 176 с.
3. *Раковский Б.М., Ходак Л.З., Фуфаев Г.Д.* Аналитический расчет рациональной формы кривой газораспределения по радиусу колошника доменной печи // Восстановительно-тепловая обработка железорудного и марганцевого сырья: Научные труды института металлургии им. А.А.Байкова. – М.: Наука, 1974. – С.112 – 120.
4. *Жеребин Б.Н.* Практика ведения доменной печи / Б.Н.Жеребин. – М.: Metallurgia, 1980. – 248 с.
5. *Определение* количественного распределения газового потока и материалов по радиальному сечению доменной печи / Б.В.Боклан, Е.Г.Донсков, В.И.Бондаренко, В.А.Шатлов // Metallurgia и коксохимия. – 1974. – № 38. – С. 34–39.
6. *Боклан Б.В.* Исследование распределения потока газа в доменных печах большого объема и разработка методов регулирования их хода: дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук:/ Б.В.Боклан – Днепропетровск, 1970. – 154 с.
7. *Влияние* режима загрузки на распределение газовых нагрузок по сечению доменной печи / В.А.Петренко, В.Н.Ковшов, С.М.Валявин, Н.М.Терещенко // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1984. – № 10. – С. 29–32.
8. *Ковшов В.Н.* Экспериментальные исследования движения шихты / В.Н.Ковшов, В.А.Петренко. – Днепропетровск: Институт технологии. – 1996. – 124 с.
9. *Непрерывный* контроль радиального газораспределения в доменных печах / В.М.Паршаков, В.А.Заболотских, Б.А.Марсуверский [и др.] // Сталь. – 1988. – № 12. – С.15–18.
10. *Донсков Е.Г.* Улучшение показателей работы доменной печи за счет рационального распределения шихты на колошнике / Е.Г.Донсков, Г.А.Воловик, И.Г.Ризницкий, В.П.Лялюк // Вопросы теории и практики производства чугуна: тематический отраслевой сборник. – Москва, 1983. – С.54–60.

11. *Дурнов В.К.* Исследования особенностей механики движения шихты и газа в противотоке в шахтных (в частности, доменных) печах: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.321 «Металлургия черных металлов» / В.К.Дурнов. – Свердловск, 1970. – 24 с.
12. *Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки* / [Н.А.Спирин, В.В.Лавров, В.Ю.Рыболовлев и др.]; под ред. Н.А.Спирина. – Екатеринбург : Изд.НаукаСервис, 2011. – 461 с.
13. *Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки* / [Ю.Н.Овчинников, В.И.Мойкин, Н.А.Спирин, Б.А.Боковилов]. – Челябинск: Metallurgia, 1989. – 120 с. – (Производственное издание).
14. *Анализ газодинамического режима доменной плавки с использованием математической модели* / В.И.Мойкин, В.К.Дурнов, Н.М.Бабушкин. //Металлургическая теплотехника. Темат. сб.науч.тр. /МЧМ СССР (ВНИИМТ). М.: Metallurgia, 1974. – С.21 – 25.
15. *Стефанович М.А.* Анализ хода доменного процесса / М.А.Стефанович. – Свердловск: Metallургиздат, 1960. – 286 с.
16. *Щедрин В.М.* Теория доменной плавки под давлением / В.М.Щедрин. – Москва: Metallургиздат, 1962. – 452 с.
17. *Тарасов В.П.* Газодинамика доменного процесса. Изд.2., / В.П.Тарасов – М.: Metallurgia, 1990. – 216 с.
18. *Грузинов В.К.* Управление газовым потоком в доменной печи программной загрузкой / В.К.Грузинов. – Свердловск: Metallургиздат, 1960. – 214 с.
19. *Исследование массопереноса при потере стабильности граничащих зернистых слоев* / В.П.Тарасов, В.Б.Семакова, А.А.Томаш [и др.] // Сталь. – 1991. – № 9. – С.11–14.
20. *Выбор и достижение оптимального дутьевого режима доменной плавки* / В.М.Паршаков, В.М.Антонов, Н.М.Бабушкин [и др.] // Интенсификация процессов доменной плавки и освоения печей большого объема. – 1979. – № 5. – С. 46–49.
21. *Гиммельфарб А.А.* Автоматическое управление доменным процессом. / А.А.Гиммельфарб, Г.Г.Ефименко – Metallurgia, 1969. – 309 с.
22. *Большаков В.И., Лебедь В.В.* Исследование взаимосвязи распределения температуры и химического состава газового потока по радиусу доменной печи. // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб.науч. тр.ИЧМ. – 2006. – Вып.13. – С.27–35.
23. *Большаков В.И.* Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки / В.И.Большаков – К.: Наук. Думка, 2007. – 412 с.
24. *Воловик А.В.* К вопросу об автоматическом управлении распределением газов по сечению печи с помощью систем загрузки / А.В.Воловик, С.В.Каплун, В.Г.Аносов. // Сталь. – 1966. – № 7. – С.581–584.
25. *Большаков В.И.* Оценка информации, полученной стационарным профилемером. / В.И.Большаков, И.Г.Муравьева, Ю.С.Семенов – // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб.научн.тр. ИЧМ. – 2008. – Вып. 16. – С.372–379.
26. *Райх Е.И.* Контроль противотока материалов и газов в доменной печи / Е.И.Райх, В.В.Гайков, К.К.Шкодин. // Теория и практика современного доменного производства. Всесоюз. науч.-техн. конф., 17-19 мая 1983 г. : Тезисы докл. – Днепропетровск, 1983. – С. 66.

27. *Славинский Ю.Н.* Оперативный контроль и управление газодинамическим режимом доменной печи по информации о газопроницаемости шихтовых материалов в пространстве печи. / Ю.Н.Славинский, К.А.Шумилов. // Теория и практика современного доменного производства: всесоюз. науч.-техн. конф., 17-19 мая 1983 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 1983. – С.69.

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

***В.І.Большаков, І.Г.Муравйова, Ю.С.Семенов, Е.І.Шумельчik,  
Е.А.Білошанка***

#### **Аналіз відомих підходів до оцінки ходу печі**

Метою роботи є аналіз відомих способів оцінки ходу доменної печі для можливого їх використання в системах контролю і управління доменною плавкою. Виконано класифікацію відомих способів оцінки газорозподілу в доменній печі за основними напрямками удосконалення доменної плавки. Показано, що для оперативної оцінки ходу печі не може бути використано жодного з відомих способів оцінки газорозподілу. Для розробки інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень з управління доменної плавкою необхідно розробити новий цільовий критерій, що дасть змогу ідентифікувати місце порушення процесу і вибрати ефективну міру впливу. При цьому активним заходом впливу на верхню частину печі при незмінних шихтових умовах може бути зміна розподілу матеріалів. Для впливу на нижню частину печі може бути використано зміну вологості або температури дуття, а також витрати природного газу і кисню.