

**В.И.Большаков, В.В.Лебедь**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГАЗОВОГО ПОТОКА ПО РАДИУСУ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

Представлены результаты исследований взаимосвязей параметров газового потока в доменной печи. Рассмотрены основные факторы, влияющие на характер взаимосвязи. Показана возможность использования результатов исследований для практического применения.

### **Современное состояние вопроса.**

Экономичность доменной плавки существенно зависит от эффективности использования теплового и восстановительного потенциалов газового потока по сечению печи [1]. При этом характер газораспределения, при прочих равных условиях, определяется распределением шихтовых материалов. Для разработки адекватных управляющих воздействий на ход доменной плавки технологическому персоналу необходима оперативная информация о распределении газового потока, которая может быть представлена показаниями термовизоров, термопар на стационарных балках и на периферии, а также результатами зондирования столба шихты с отбором проб газа (распределение химического состава газа по радиусу печи).

Для доменного производства стран СНГ наиболее распространенным средством контроля газораспределения является радиальное зондирование печи газоотборными машинами, результаты которого представляют собой диаграмму радиального распределения диоксида углерода  $\text{CO}_2$ . Для контроля распределения газов в печи применяются также стационарные балки с термопарами. Отбор проб радиального газа, даже при полной или частичной его автоматизации, является трудоемким и дорогостоящим способом, а периодичность его осуществления (обычно 1 раз в сутки) для оперативной оценки хода печи недостаточна. Установка стационарных балок, оснащенных термопарами, на колошнике над поверхностью засыпи шихты при их исправной работе позволяет осуществлять непрерывный контроль распределения температуры газа в печи. В настоящее время существует тенденция при реконструкции доменных печей оснащать стационарными термобалками комплекс средств контроля АСУ ТП, при этом радиальные газоотборные машины могут отсутствовать. Поэтому весьма актуальными являются задачи изучения особенностей работы указанных средств контроля и исследования взаимосвязей их показаний.

На доменной печи (ДП) №4 ОАО «Северсталь» объемом  $2830 \text{ м}^3$  в наборе средств контроля газораспределения используются четыре радиальные газоотборные машины (под поверхностью засыпи шихты) и две стационарные балки с термопарами (над поверхностью засыпи).

### Изложение основных материалов исследования.

Для оценки и обоснования взаимосвязей радиального распределения температуры газового потока и его химического состава предварительно был осуществлен анализ конструктивных особенностей установки средств контроля на ДП №4.

Конструктивной особенностью установки термобалок является их диаметрально *подкупольное* расположение под углом  $20^\circ$  к горизонту (рис.1). При такой схеме установки фактором, существенно влияющим на точность отображения распределения температуры газа, является расстояние от «горячих» спаев термопар на стационарных балках до поверхности засыпи шихты. При рабочем уровне засыпи 1,5 м и при глубине осевой воронки профиля засыпи 1,2 м, это расстояние составляет 2,3–2,7 м, что приводит к частичному смешиванию газового потока в смежных кольцевых зонах колошника даже при ламинарном характере его движения. Кроме того, в подкупольном пространстве вблизи газоотводов в значительной мере проявляется влияние горизонтальной составляющей направления движения газов, что также искажает показания термобалок.

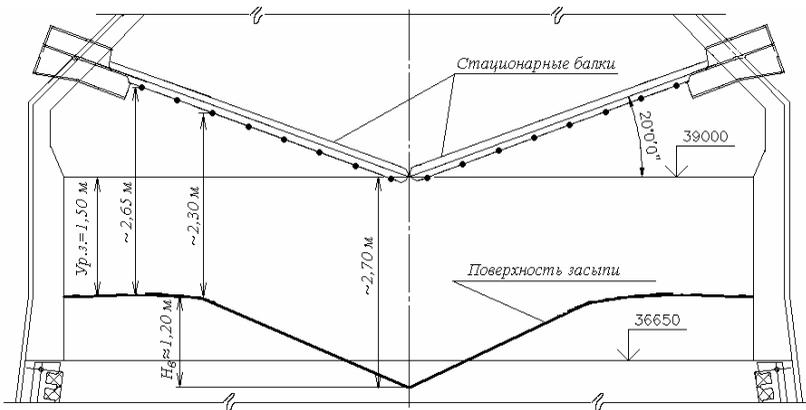


Рис.1. Расположение термопар стационарных балок относительно поверхности засыпи на колошнике ДП №4 ОАО «Северсталь».

Следует отметить, что по результатам предпусковых исследований, проведенных на ДП №4, стационарные балки существенно влияют на параметры потока загружаемой в печь шихты в секторах их расположения. Это приводит к искажению в указанных секторах радиального и окружного распределения шихты, что проявляется в возникновении после выгрузки порций шихты на поверхности засыпи диаметрального углубления, смещенного относительно оси балок на угол  $\approx 6^\circ$  в сторону вращения лоткового распределителя шихты.

Радиальные машины установлены в верхней части шахты (отм. 36000) по двум перпендикулярным диаметрам печи. Отбор газа при горизонтальном зондировании столба шихты осуществляется в 8 точках на различном расстоянии от стенки печи (рис.2).

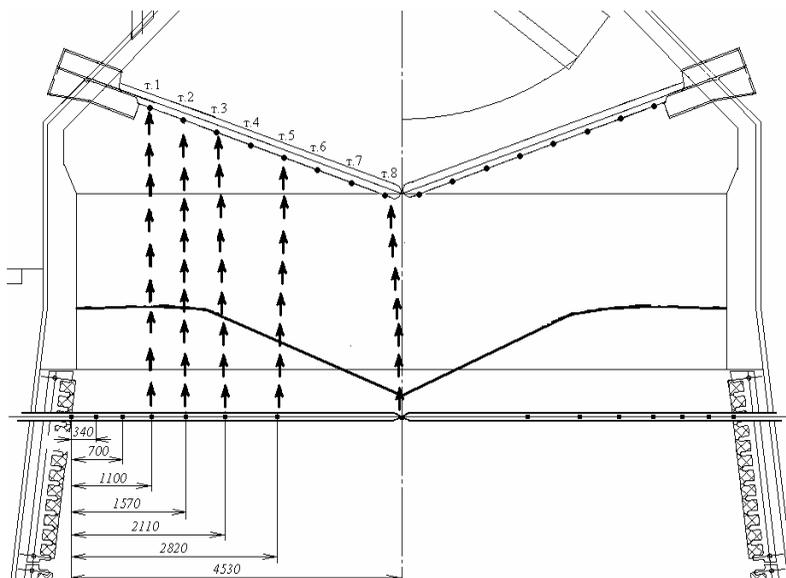


Рис.2. Соответствие точек отбора радиального газа и термопар на стационарных балках.

Пространственное сопоставление расположения точек отбора радиального газа и термопар на стационарных балках показало, что точкам отбора газа соответствуют только пять точек измерения температуры (рис.2 и табл.1). При этом в температурной эюре (диаграмме) имеется «слепая» пристеночная кольцевая зона шириной около 1 м, над которой термопары отсутствуют.

Таблица 1. Соответствие точек отбора радиального газа и термопар на стационарных балках.

Расстояние от точки отбора газа до стенки печи, мм	4350	2820	2110	1570	1100
Номер соответствующей термопары	1.8 (2.8)	1.5 (2.5)	1.3 (2.3)	1.2 (2.2)	1.1 (2.1)

На рис.3 представлена схема оборудования ДП №4. Как видно из рисунка, в горизонтальной плоскости сечения печи по отношению к оси

стационарных балок (СБ) наименее смещены оси газоотборных машин М1 и М3 (под СБ1 и СБ2, соответственно), а оси зондов машин М2 и М4 смещены более существенно, при этом М2 ближе к СБ2, а М4 – к СБ1.

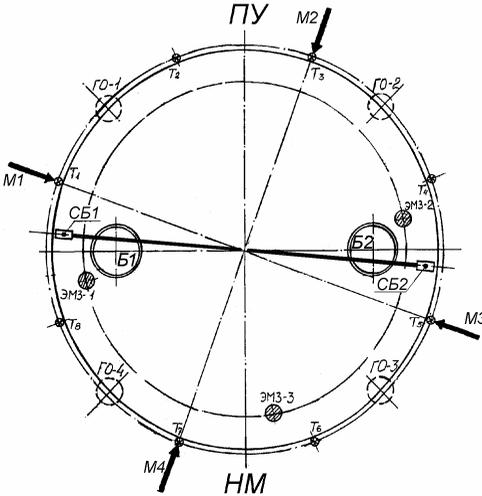


Рис.3. Схема расположения оборудования для измерения температуры над поверхностью засыпи:

СБ1, СБ2 – стационарные балки для измерения температуры над поверхностью засыпи;

↑ М1...М4 – машины для отбора радиального газа;

⊗ Т1...Т8 – термпары периферийного газа; ПУ, НМ, Б1, Б2 – пылеуловители, наклонный мост, бункер БЗУ;

ЭМЗ-1...3 – электромеханические зонды (уровнемеры);

ГО-1...4 – газоотводы печи.

Результаты зондирования столба шихты радиальными машинами в условиях ДП №4 в основном представлены диаграммой распределения по радиусу объемной доли диоксида углерода  $CO_2$  в %. Полный химический анализ проб радиального газа осуществляется крайне редко, поэтому в качестве химического показателя распределения газового потока принято распределение  $CO_2$ .

Сопоставление показаний термобалок и данных газовых диаграмм осуществлялось по точкам радиуса печи, приведенным в табл.1.

На рис.4,а представлен типичный график зависимости содержания  $CO_2$  в газе от температуры газа на примере результатов отбора радиального газа 05.07.06г. Как видно из рис.4,а, взаимосвязь имеет линейный характер, то есть зависимость  $CO_2=f(T)$  можно представить в виде уравнения вида  $y=kx+b$ . Для всех отборов радиального газа в линейных аппроксимирующих уравнениях  $CO_2=k \cdot T_{СБ}+b$  получены различные коэффициенты  $k$  и  $b$  при определенных коэффициентах корреляции  $r_{xy}$ . Основные результаты статистического анализа представлены в табл.2 в виде матрицы коэффициентов корреляции.

Как следует из табл.2, взаимосвязь содержания  $CO_2$  и температуры газа характеризуется достаточно высокими значениями коэффициентов корреляции ( $r_{xy}^{средн}=0,887 \pm 0,949$ ) при этом большие значения  $r_{xy}$  соответствуют взаимосвязям  $CO_2$  с температурой газа, измеренной и усредненной за 1 час перед отбором радиального газа. В большей степени доля  $CO_2$  взаимосвязана с показаниями термпар СБ1. Это подтверждает влияние расстояния от термпар до поверхности засыпи на точность отображения

распределения температуры газа, так как под СБ1 фактический уровень засыпи выше, чем под СБ2 на  $\sim 0,25$  м.

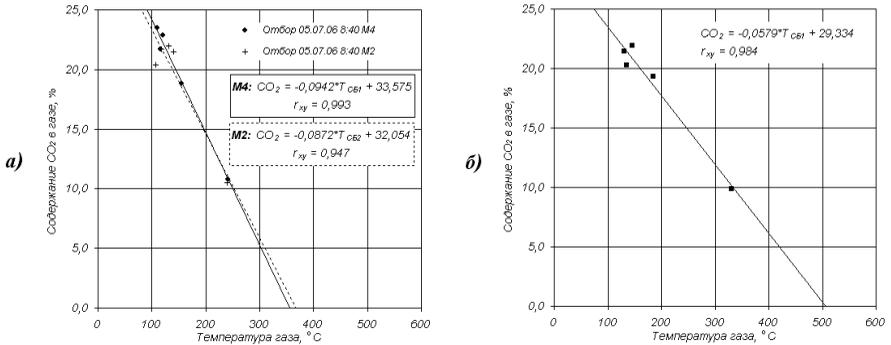


Рис. 4. Зависимость содержания CO<sub>2</sub> в газовом потоке от его температуры для отбора радиального газа 05.07.06г. (а) и усредненная за весь исследовательский период (б).

Таблица 2. Средние значения коэффициентов корреляции  $r_{xy}$  взаимосвязей содержания CO<sub>2</sub> в газе и его температуры.

Газоотборная машина	Период усреднения показаний термодпар на СБ перед отбором радиального газа			
	1 час		4 часа	
	СБ1	СБ2	СБ1	СБ2
M1	0,943	0,906	0,944	0,892
M2	0,915	0,903	0,927	0,891
M3	0,949	0,912	0,931	0,898
M4	0,918	0,887	0,912	0,892

На рис.4,б представлена усредненная за весь период исследований зависимость содержания CO<sub>2</sub> в газе от его температуры, измеренной термодпарами СБ1. Приведенная зависимость характеризуется также высоким коэффициентом корреляции  $r_{xy}=0,984$ .

Различие величин коэффициентов  $k$  и  $b$  в аппроксимирующих уравнениях  $CO_2=k \cdot T_{CB}+b$  для различных газовых диаграмм вызвано влиянием совокупности факторов, среди которых можно выделить следующие:

а) параметры дутьевого режима, в частности, теоретическую температуру горения, определяющую распределение температурных полей в столбе шихты, а также температуру колошникового газа [2, 3];

б) состав шихты и свойства ее компонентов (восстановимость железорудных материалов, реакционная способность кокса), влияющие на хи-

мическое равновесие  $CO \leftrightarrow CO_2$  в системе «газ–шихта» в верхней части столба шихты;

в) фактический уровень засыпи шихты, влияющий на температуру колошника и на точность отображения термобалками распределения температуры колошниковога газа;

г) нетехнологические факторы, в частности, влияние системы охлаждения купола печи азотом, подача которого в подкупольное пространство приводит к искажению показаний термопар стационарных балок.

На рис.5 показано влияние уровня засыпи в печи на взаимосвязь распределения температуры и химического состава газа. При упущенном уровне засыпи (рис.5,б) уменьшается разница между максимальной и минимальной температурой газа, так как в данном случае термопарами на балках измеряется температура смешанного колошниковога газа, что выражается в увеличенном наклоне прямой, аппроксимирующей взаимосвязь  $CO_2 = f(T)$ .

На точность измерения термобалками температуры колошниковога газа влияет подача технического азота в рабочее пространство печи для охлаждения купола. Для определения степени влияния данного фактора был проведен эксперимент с отключением азота на 40 мин (рис.6). Как видно из рисунка, охлаждающий азот наиболее существенно влияет на показания термопар, расположенных в осевой зоне печи.

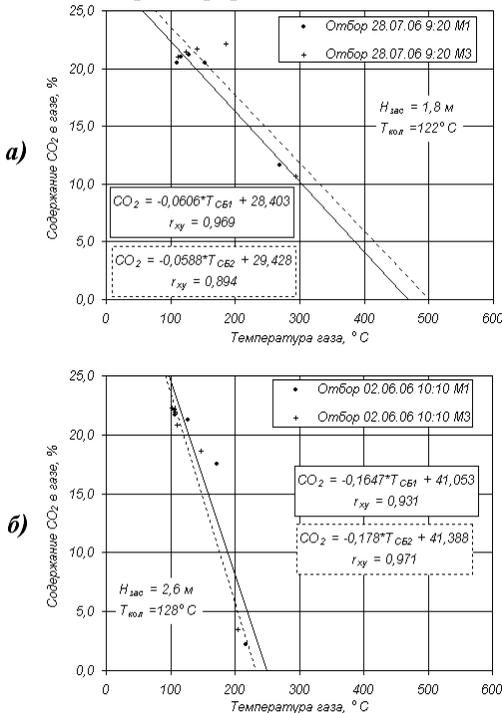


Рис.5. Влияние уровня засыпи шихты на характер взаимосвязи температуры газа и содержания в нем диоксида углерода.

Высокая степень корреляции показаний стационарных термобалок и распределения доли  $CO_2$  в газе по радиусу печи является основанием для практического применения результатов исследований.

Как отмечалось выше, отбор радиального газа осуществляется с периодичностью, недостаточной для оперативной оценки хода доменной плавки. Показания же тер-

мопар, установленных на стационарных балках на колошнике над поверхностью засыпи, позволяют технологическому персоналу непрерывно контролировать распределение газового потока. На основе взаимосвязей, полученных в результате осуществления исследований, представляется возможным аналитический расчет распределения содержания  $CO_2$  в газе по данным распределения температуры газового потока.

В рамках настоящих исследований разработана математическая модель оценки распределения доли  $CO_2$  по радиусу печи и ее электронная версия, которая передана технологическому персоналу для практического применения. Для повышения точности оценки в модели учтена температура колошникового газа. Содержание  $CO_2$  в периферийной зоне печи, в которой на балках термопары отсутствуют, определяется по показаниям периферийных термопар, установленных по окружности печи на отм. 36620. Проверка адекватности модели показала, что результаты аналитической оценки распределения содержания  $CO_2$  достаточно близки к фактическим значениям, полученным по результатам отбора газа. В качестве примера сопоставления фактического и аналитического распределения  $CO_2$  по радиусу печи, на рис. 7 приведены расчетные значения содержания  $CO_2$ , полученные при помощи математической модели по результатам последнего отбора проб газа, и его фактические значения через четверо суток.

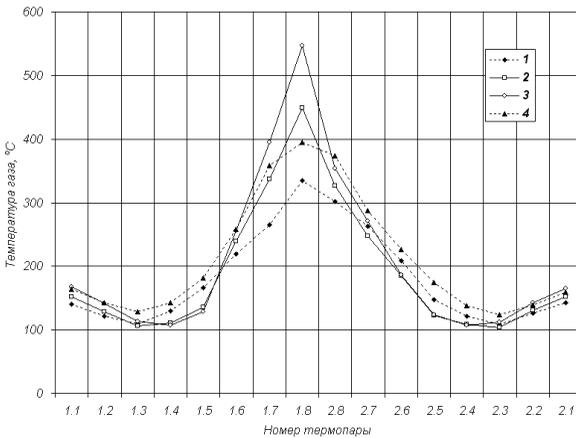


Рис.6. Влияние азота, подаваемого на охлаждение купола ДПЛ№4, на распределение температуры газового потока по диаметру колошника. Распределение температуры колошникового газа: 1 – перед отключением азота купольного охлаждения ( $Q_{N_2} \approx 2000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ); 2 – через 15 мин после отключения азота; 3 – через 30 мин после отключения азота; 4 – через 15 мин после возобновления подачи азота.

отключения азота; 4 – через 15 мин после возобновления подачи азота.

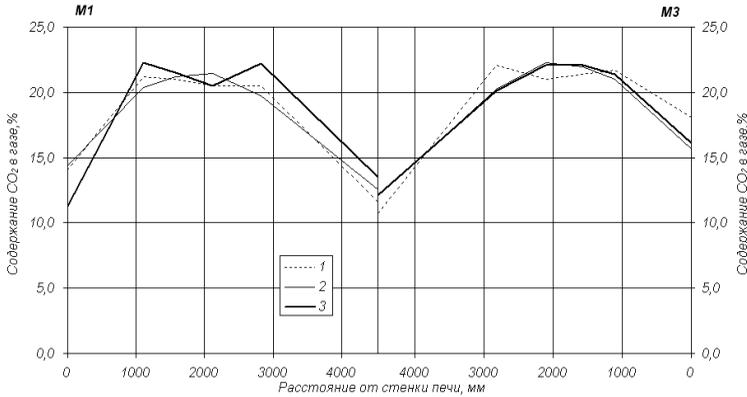


Рис. 7. Сравнительные результаты фактического и расчетного распределения  $CO_2$  по радиусу печи: 1 – фактическое распределение  $CO_2$  в 9:20 28.07.06г.; 2 – расчетное распределение  $CO_2$  в 8:00 01.08.06г. (по параметрам фактического распределения в 9:20 28.07.06г.); 3 – фактическое распределение  $CO_2$  в 8:20 01.08.06г.

Результаты аналитической оценки распределения  $CO_2$  по радиусу печи при наличии возмущений могут использоваться технологом для корректировки программы загрузки печи. Расчет и выбор соответствующей программы загрузки можно осуществить при помощи инженерной методики расчета показателей распределения шихтовых материалов, разработанной в ИЧМ [4].

#### Закключение.

Для эффективного управления ходом доменной плавки технологическому персоналу необходима оперативная информация о распределении газового потока, которая может быть получена с помощью различных средств контроля. В странах СНГ наиболее распространенным средством контроля газораспределения является отбор проб при радиальном зондировании столба шихты под поверхностью засыпи газоотборными машинами, а в последнее время все шире применяется измерение температуры стационарными термобалками над поверхностью засыпи.

Взаимосвязь содержания  $CO_2$  в газе от его температуры характеризуется линейной зависимостью и достаточно высокой корреляцией ( $r_{xy}^{\text{средн}}=0,887\pm 0,949$ ). Различие величин коэффициентов  $k$  и  $b$  в аппроксимирующих уравнениях для различных газовых диаграмм обусловлено влиянием совокупности факторов, некоторые из них существенно влияют на точность показаний термопар (уровень засыпи шихты и система купольного охлаждения).

При оснащении печи во время реконструкции стационарными балками с термопарами, для получения адекватных данных о распределении температуры газового потока необходимо обеспечить установку балок как можно ближе к рабочему уровню засыпи шихты. Кроме того, при проек-

тировании системы охлаждения верха печи необходимо исключить возможность влияния охлаждения купола на термопары.

На основе взаимосвязей, полученных в результате настоящих исследований, разработана математическая модель оценки радиального распределения содержания  $CO_2$  в газе на основе распределения температуры газового потока. Результаты аналитической оценки распределения  $CO_2$  по радиусу печи могут использоваться технологами для оперативной корректировки программы загрузки печи.

1. *Большаков В.И.* Теория и практика загрузки доменных печей. М.: Металлургия. – 1990. – 256 с.
2. *Готлиб А.Д.* Доменный процесс. М.: Металлургия. – 1966. – 503с.
3. *Китаев Б.И.* Управление доменным процессом. Учебное пособие. Свердловск, изд. УПИ. – 1984. – 96 с.
4. *В.И.Большаков, Ф.М.Шутылев, В.В.Лебедь.* Инженерная методика расчета показателей распределения шихты для доменных печей, оснащенных БЗУ // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – №2. – С.76–80.

*Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. И.Г.Товаровским*