

**А.А.Сохацкий, А.Л.Чайка, А.Г.Шевелев**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА  
В ШАХТЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОКАЗАТЕЛИ  
ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ**

Целью работы является установление закономерностей и количественная оценка совместного развития теплообменных и газодинамических процессов в шахте доменной печи с учетом тепловой работы системы охлаждения. С использованием блочного метода изучения тепловой работы печи установлены закономерности и дана количественная оценка влияния расхода и состава дутья, температуры горнового газа и давления колошникового газа, порозности и средней крупности шихты на газодинамику, теплообмен в шахте печи и технико-экономические показатели доменной плавки.

**доменная печь, теплообмен, газодинамика, температура, производительность печи, расход кокса, внешние тепловые потери**

**Современное состояние вопроса**

Сложность и многообразие процессов, сопровождающих доменную плавку, выдвигает целый ряд задач, связанных с обеспечением экономической и продолжительной эксплуатации доменных печей. Одной из таких задач является определение рационального тепло-газодинамического режима работы доменных печей с использованием данных о внешних тепловых потерях в сложившихся и перспективных условиях доменной плавки с учетом ограничений, накладываемых на использование энергетических и сырьевых ресурсов.

Фундамент в развитие представлений и методов расчета закономерностей тепловой и газодинамической работы доменной печи был заложен исследованиями Саркисянцева А.С., Похвиснева А.Н., Грум-Гржимайло В.Е., Гулыги В.И., Рамма А.Н., Готлиба А.Д., Павлова М.А., Демина Г.И., Грузинова В.К., Жаворонкова Н.Н., Китаева Б.И., Семикина И.Д., Ярошенко Ю.Г., Хруща В.К., Бородулина А.В., Дмитриева А.Н., Спирина Н.А., И.Г. Товаровского, Шаврина С.В., Швыдкого В.С., Томаша А.А., Тарасова В. П., сотрудников ВНИИМТа, НМетАУ, ИЧМ, МИСИСа, УПИ, работами Ле-Шателье Г., Дипшляга Е., Фурнаса С., Эргана С., Кинни С.

Ведущую роль энергетики в металлургических процессах отмечали многие отечественные ученые: В.Е Грум-Гржимайло, Н.Н. Доброхотов, И.П. Бардин, И.Г. Казанцев, М.А. Глинков, Г.П. Иванцов, Б.И. Китаев, Н.Ю. Тайц, Б.И. Лукоянов, В.Н. Тимофеев и другие [1]. Они подчеркивали, что тепловая энергетика печей в значительной мере определяет количество и качество получаемого в печи продукта. Наиболее четко такая позиция лежит в основе энергетической теории печей Н.Е. Скаредова – И.Д. Семикина, сыгравшей выдающуюся роль в развитии печной тепло-техники, и не потерявшей своего научного и методического значения в

настоящее время [1]. Одна из первых отечественных математических моделей, которая основана на классических законах гидроаэродинамики и теплообмена, предложена заведующим кафедрой аэрогидромеханики механико–математического факультета Днепропетровского национального университета доктором физико–математических наук В. К. Хрущем и доктором технических наук А. В. Бородулиным ИЧМ НАНУ [2].

Использование принципов системного анализа и блочного метода изучения тепловой работы доменной печи с привлечением теплогазодинамической и балансовой теплоэнергетической модели, информации о внешних тепловых потерях печи, методов мониторинга ее теплового состояния позволяет углубить знания о тепловой работе доменной печи, более эффективно использовать энергетические ресурсы, совершенствовать теорию и практику производства чугуна. Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных исследований тепловой и газодинамической работы печи, вопросам комплексного изучения совместного развития процессов теплообмена и газодинамики в объеме печи с учетом работы системы охлаждения, внешних тепловых потерь и их влияния на показатели работы печи в сложившихся условиях доменной плавки в науке уделялось недостаточно внимания.

**Методика исследования.** Для прогноза показателей доменной плавки и анализа влияния на них теплогазодинамических процессов целесообразно использовать принципы системного анализа и блочного метода изучения тепловой работы доменной печи, что выполнено на основе синтеза двух моделей: теплогазодинамической [2–3] и теплоэнергетической [1] (рис.1).

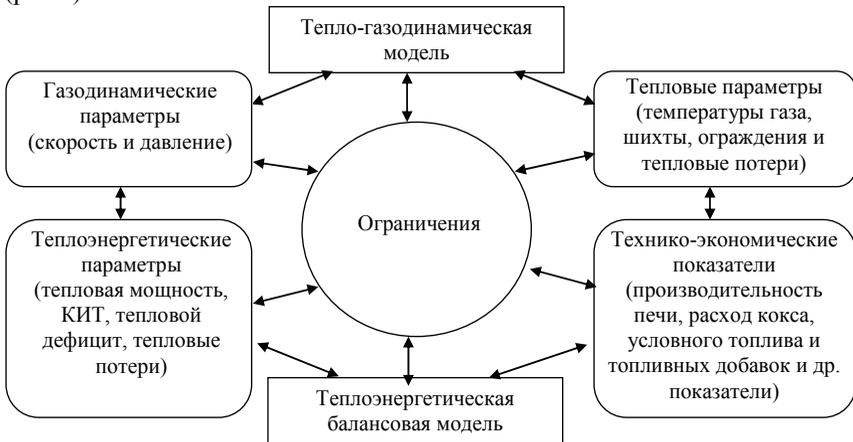


Рис.1. Схема синтеза двух моделей: теплогазодинамической и теплоэнергетической

Использование в едином ключе балансовых и теплогазодинамических моделей позволит более эффективно решать задачи,

связанные с совершенствованием теплообменных процессов и повышением технико-экономических показателей работы доменной печи в различных шихтовых и дутьевых условиях, начиная с ее задувки.

Модернизированная тепло-газодинамическая модель основана на фундаментальных законах теплофизики, которые описаны применительно к доменному производству дифференциальными и интегральными уравнениями: количества движения (1), в котором сила сопротивления прохождение газа через слой вычислялась с использованием зависимости Эргана, неразрывности газа и шихты (2) – (3) (законы сохранения массы), состояния идеального газа (4), энергии для газа (5) и шихты (6), и теплового баланса для воды (7) с граничными условиями (8) – (10) (рис.2).

$$\frac{\partial(\varepsilon p)}{\partial z} = - \left[ 150 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon \cdot d_s \cdot \Phi_s} \mu_g + 1,75 \cdot \rho_g \cdot |u_g - u_s| \right] \frac{1-\varepsilon}{d_s \cdot \Phi_s} (u_g - u_s) + \frac{1}{r \cdot \Phi_w^2(z)} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu_g \cdot r \cdot \frac{\partial u_g}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$M_g = 2\pi \int_0^{R_{bf}} \rho_g \cdot u_g \cdot \varepsilon \cdot \Phi_w^2 \cdot r \cdot dr = \text{const}; \quad (2)$$

$$M_s = 2\pi \int_0^{R_{bf}} \rho_s \cdot u_s \cdot (1-\varepsilon) \cdot \Phi_w^2 \cdot r \cdot dr = \text{const}; \quad (3)$$

$$p = \rho_g R_g (T_g + 273); \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \rho_g \cdot u_g \cdot C_g \cdot T_g \cdot \varepsilon \cdot \Phi_w^2 \right] = \Phi_w^2 \cdot K_v \cdot (T_s - T_g); \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \rho_s \cdot u_s \cdot C_s \cdot T_s \cdot (1-\varepsilon) \cdot \Phi_w^2 \right] = \Phi_w^2 \cdot K_v \cdot (T_g - T_s) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[ (1-\varepsilon) \cdot \lambda_s \cdot r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \right]; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial z} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot \Phi_w^2}{M_w \cdot C_w \cdot \left[ \left( \frac{h}{\lambda} \right)_{\text{gar}} + \left( \frac{h}{\lambda} \right)_p + \left( \frac{h}{\lambda} \right)_{\text{nm}} + \left( \frac{h}{\lambda} \right)_c + \left( \frac{h}{\lambda} \right)_{\text{zc}} + \frac{1}{\alpha_w} \right]} (T_w - T_{s|r=R_{bf}}); \quad (7)$$

$$p|_{z=0} = p_0, \quad T_g|_{z=H} = T_{g,H}, \quad T_s|_{z=0} = T_{s,0}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad -(1-\varepsilon) \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=R_{bf}} - \alpha_g (T_g - T|_{r=R_{bf}}) = q_w(z); \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_g}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad u_g|_{r=R_{bf}} = 0;$$

$$T_w|_{z=z(i)} = (T_w)_i, \quad M_w|_{z=z(i)} = (M_w)_i, \quad i = 1, N_c, \quad (10)$$

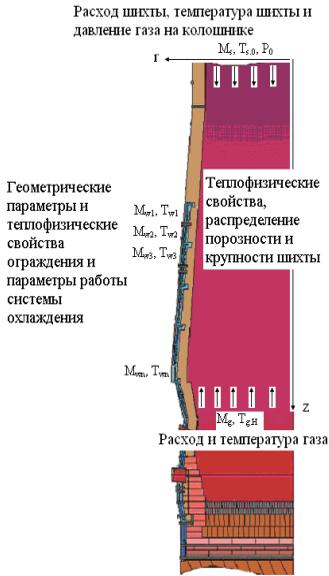


Рис.2. Схематическая постановка граничных условий для расчета теплообмена  
рядом с номером  $i$ .

Данная модель модернизирована усилением расчетного модуля (блока) теплового состояния периферийной зоны, модулем распределения геометрических и теплофизических свойств шихты и газа в печи, запрограммирована и переведена на современный язык. Это расширило возможности применения модели, в различных условиях работы печи начиная с ее задувки. Перед использованием теплогазодинамической модели была выполнена ее апробация. Для апробации математической модели выполнены расчеты и сопоставление с экспериментальными исследованиями С. Р. Киппеу [4], Л. А. Бялого [5], японцев [6] и Б. И. Китаева [7] о распределении температур при задувке печи, П. Г. Васильева [8] о распределении температур в периферийной зоне, внешних тепловых потерь, аналитическими зависимостями А. А. Томаша [9] о распределении давления в шахте печи, которые показали хорошую сходимость. Теплогазодинамическая модель прошла апробацию на задувке доменной печи №9 ОАО «АМКР» на что получен акт о внедрении

### Изложение основных материалов исследований

С использованием усовершенствованной теплогазодинамической модели (1)–(10), описывающей теплообменные процессы в противотоке газов и шихтовых материалов в шахте печи, проведены расчеты для установления влияния параметров газового потока и параметров шихты на изменение температуры газа и шихты, теплового состояния ограждения печи, скорости и давления газа.

По результатам численных расчетов установлена и дана количественная оценка влияния расхода горнового газа, его температуры, давления колошникового газа, порозности и среднего размера куска (диаметра) шихты на изменение температуры газа и шихты, давления и скорости га-

где индексы  $g, s$  и  $w$  – газ, шихта и вода,  $z, r$  – цилиндрические координаты;  $\varepsilon$  – порозность,  $p, u$  и  $T$  – давление, скорость и температура,  $\rho$  – плотность,  $\mu_g$  – динамический коэффициент вязкости газа, вычисляемый по зависимости Саттерлэнда;  $\Phi_w = 1 + z \cdot \operatorname{tg} \alpha$  – выражение для преобразования координат;  $\alpha$  – угол конусности шахты печи;  $d_s$  и  $\Phi_s$  – средний диаметр и коэффициент формы твердых частиц соответственно;  $M_g$  и  $M_s$  – массовые расходы газа и шихты;  $R_g$  – газовая постоянная;  $C$  – теплоемкость;  $K_v$  – объемный коэффициент теплоотдачи между газом и шихтой, вычисляемый по зависимости Б.И. Китаева;  $R_0$  – радиус колошника;  $\lambda_s$  – коэффициент теплопроводности твердых частиц,  $\alpha_w$  – коэффициент теплоотдачи от стенок холодильника к воде;  $h_{газ}, h_p, h_{шт}, h_c, h_{жс}, \lambda_{газ}, \lambda_p, \lambda_{шт}, \lambda_c, \lambda_{жс}$  – толщина и коэффициент теплопроводности гарнисажа, футеровки, набивной массы, тела и трубки змеевика холодильника соответственно;  $M_w$  – массовый расход воды горизонтального ряда холодильников;  $N_c$  – число горизонтальных рядов охлаждения на рассматриваемом участке печи;  $(T_w)_i$  – температура воды на входе в холодильники

за, и тепловых потерь в шахте доменной печи №6 ОАО «АМКР» объемом 2000 м<sup>3</sup>, на которой было проведено обследование ее теплового состояния и получены экспериментальные данные о характере ее работы (рис. 3, таблица 1).

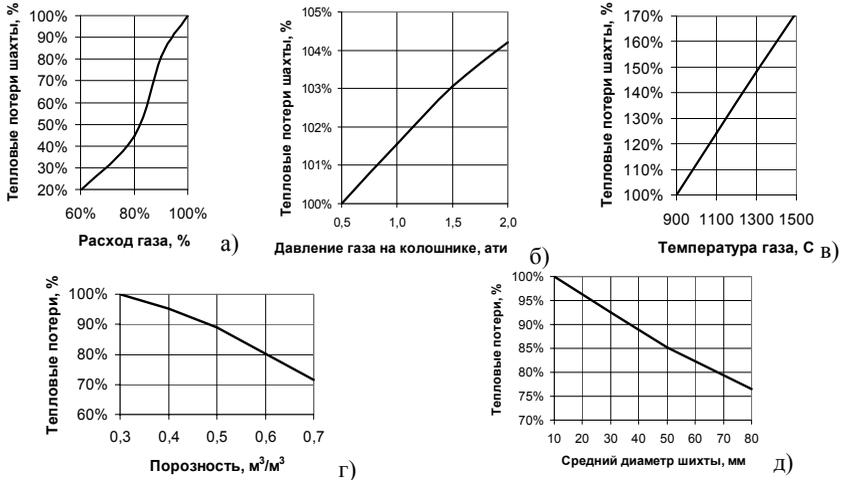


Рис. 3. Влияние расхода и температуры газа на входе в шахту печи, давления колошниковога газа, порозности и среднего куска (диаметра) шихты на тепловые потери шахты печи

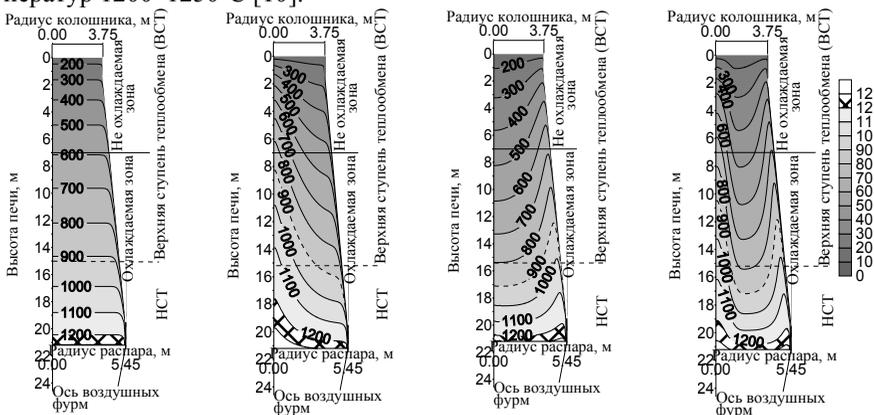
Из полученных результатов (рис.3, табл.1) следует, что наибольшее влияние на тепловые потери и среднюю температуру оказывает расход горнового газа на входе в шахту печи, определяемый параметрами дутья. Параметры шихтовых материалов (порозность, крупность) наиболее сильное влияние оказывают на перепад давления.

Таблица 1. Влияние параметров газового потока и шихтовых материалов на тепло–газодинамические параметры (+ увеличение; – уменьшение)

Факторы	Тепловые потери в шахте / средняя температура шихты, %	Верхний перепад давления / перепада давления в шахте, %	Температура газа в шахте/ на колошнике	Скорость газа в шахте/ на колошнике
Уменьшение расхода горнового газа на 10% в интервале				
100÷90%	-19%/-20%	-32%/-24%	-19%/-32%	-20%/-28%
90÷80%	-37%/-38%	-35%/-29%	-38%/-30%	-31%/-23%
80÷60%	-12%/-10%	-9%/-13%	-10%/-2%	-7%/-11
Увеличение давления колошниковога газа на 0,5 ати в интервале:				
0,5÷1,0ати	+2%/+3%	-36%/-32%	+1%/-1	-15%/-26%
1,0÷1,5 ати	+2%/+2%	-18%/-18%	+2%/-2%	-13%/-15%

1,5÷2,0 ати	+1%/+1%	-10%/-11%	+3%/-3%	-10%/-10%
Увеличение температуры газа на входе в шахту печи каждые 100°С в интервале:				
900÷1500 °С	+12%/+10%	+6%/+5%	+11%/+10%	+6%/+5%
Увеличение порозности шихты на каждые 0,1 м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> в интервале:				
0,2÷0,3 м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	-3%/-4%	-60%/-58%	-3%/+2%	-4%/-32%
0,3÷0,4 м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	-5%/-5%	-22%/-22%	-3%/+2%	-10%/-16%
0,4÷0,5 м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	-6%/-6%	-9%/-10%	-3%/+3%	-12%/-10%
0,5÷0,7 м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	-8%/-13%	-6%/-7%	-2%/+7%	-9%/-5%
Увеличение среднего куска (диаметра) шихты на 20 и 30 мм соответственно в указанном диапазоне:				
10÷30	-7%/-14%	-60%/-56%	-8%/+6%	+6%/+4%
30÷50	-7%/-9%	-15%/-16%	-3%/+8%	+1%/+5%
50÷80	-9%/-9%	-9%/-10%	-1%/+13%	+2%/+8%

Для исследования влияния неравномерности распределения порозности шихты по радиусу печи на протекание теплогазодинамических процессов рассматривались четыре типичных варианта распределения шихтовых материалов в печи (порозности), обеспечивающие равномерное, центральное, периферийное и неравномерное газораспределение. Для четырех рассматриваемых вариантов распределения материалов среднее значение порозности в соответствующих горизонтальных сечениях, а соответственно, на колошнике и в шахте печи были равны между собой. Изотермы шихты, соответствующие рассмотренным вариантам распределения порозности, показаны на рис.4, здесь же штриховой линией нанесена граница верхней ступени теплообмена (ВСТ) и нижней ступени теплообмена (НСТ), находящаяся на средней температуре шихты в 900°С. Вероятные границы формирования вязкопластичной зоны показаны на рис.4 заштрихованной областью, которая соответствует интервалам температур 1200–1250°С [10].



а – равномерное      б – центральное      в – периферийное      г – неравномерное

Рис. 4. Изменение температуры шихты в доменной печи при различном радиальном распределении порозности и газораспределения

Установлено, что распределения газового потока, при прочих равных условиях, влияет на изменение средней в сечении или объеме температуры газа и шихты, давления и скорости газа на  $\sim 1\text{--}5\%$ , тепловых потерь на  $\sim 10\div 20\%$ . Тепловые потери при центральном газораспределении ниже на 22% по сравнению с периферийным, и на 7% в сравнении с равномерным распределением газового потока. Влияние расхода горнового газа на газодинамическое сопротивление столба шихтовых материалов в шахте печи при различном давлении колошникового газа и средней величине порозности шихты в шахте показано на рис.5. Областью 1 на рис.5 (а, в) показан рабочий диапазон перепада давления в шахте печи, который изменяется от 0 (расход газа равен 0) до максимальной величины. Максимальная величина рабочего диапазона по перепаду давления в шахте печи, определяется как  $\Delta P = P_{\text{дуг}} - P_{\text{кол}} - \Delta P_{\text{фурмы-распар+зр}}$ , давление дутья ( $P_{\text{дуг}}$ ) составляло 2,5 ати, давление колошникового газа ( $P_{\text{кол}}$ ) варьировалось от 0,5 до 1,5 ати. Перепад давления газа на участке фурмы – распар и зона размягчения ( $\Delta P_{\text{фурмы-распар+зр}}$ ) по данным работы В. М. Щедрина [11] и А. А. Томаша [9] составляет порядка 0,5–0,7 ати.

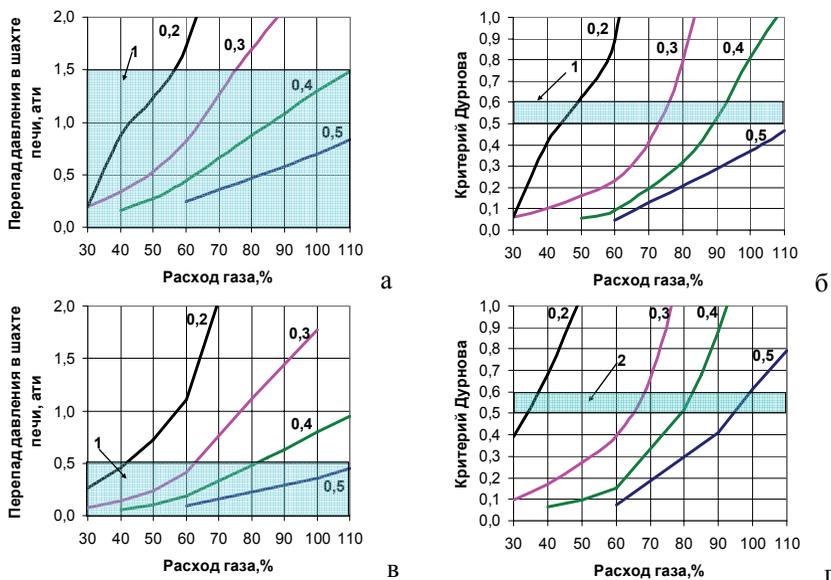


Рис.5. Влияние расхода газа на газодинамическое сопротивление столба шихты в шахте печи при давлении колошникового газа 0,5 (а–б); и 1,5 (в–г) ати и различной порозности шихтовых материалов: 1 – рабочий диапазон по перепаду давления в шахте печи; 2 – область оптимальной величины критерия газодинамической устойчивости  $Du=0,5\text{--}0,6$

Зависимость критерия газодинамической устойчивости Дурнова от

расхода горнового газа при различной порозности шихты построенная для тех же вариантов расчета показана на рис.5 (б, г), на котором область 2 показана оптимальная величина критерия газодинамической устойчивости  $Du=0,5\div 0,6$  [12]. При достижении условия  $Du>0,5\div 0,6$  затрудняется сход шихтовых материалов [12], что вызывает необходимость снижения расхода дутья, что согласуется с возможным перепадом давления в шахте печи. Установлено, что увеличение давления колошникового газа, при прочих равных условиях, приводит к уменьшению рабочего диапазона по: перепаду давления в шахте печи, порозности шихты, расходу горнового газа (дутья) и увеличению величины критерия газодинамической устойчивости Дурнова. При низкой газопроницаемости шихтовых материалов для устойчивой газодинамической работы печи, целесообразно организовывать работу на пониженном давлении колошникового газа или снизить расход дутья (выход горнового газа).

С использованием выполненного синтеза двух моделей (рис.1) и информации о внешних тепловых потерях дана количественная оценка влияния параметров газового потока и шихтовых материалов при прочих равных условиях на изменение производительности и расхода кокса в печи объемом  $2000 \text{ м}^3$  (табл.2).

Таблица 2. Влияние параметров газового потока и шихтовых материалов на изменение производительности и расхода кокса (+ увеличение; – уменьшение)

№	Параметры	Производство, %			Кокс, %		
1	Уменьшение расхода горнового газа на каждые 10% в интервале:						
1а	100÷90%	–5%			–3%		
1б	90÷80%	–5%			–4%		
1в	80÷60%	–9%			–3%		
2	Увеличение давления колошникового газа на 0,5 ати в интервале:						
2а	0,5÷1,0 ати	0%	–	+5÷10% [14]	0%	–	–0,5÷2,5% [14]
2б	1,0÷1,5 ати	+0,1%	+5%		–0,02%	–	
2в	1,5÷2,0 ати	+0,2%	[13]		–0,1%	1% [13]	
3	Увеличение температуры газа на входе в шахту на каждые 100°С в интервале:						
3а	900÷1500 °С	–1,8%			+0,7%		
4	Увеличение порозности шихты на каждые $0,1 \text{ м}^3/\text{м}^3$ в интервале:						
4а	$0,2\div 0,3 \text{ м}^3/\text{м}^3$	–0,6%/			–0,02%		
4б	$0,3\div 0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$	+0,1%			–0,1%		
4в	$0,4\div 0,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$	+0,1%			–0,04%		
4г	$0,5\div 0,7 \text{ м}^3/\text{м}^3$	–0,1%			+0,1%		
5	Увеличение средней крупности размера (диаметра) куска шихты на 20 и 30 мм соответственно в интервале:						
5а	10÷30 мм	–0,1%			+0,04%		
5б	30÷50 мм	–0,3%			+0,1%		
5в	50÷80 мм	–0,7%			+0,3%		

Выполненные аналитические исследования показали, что при прочих равных условиях наибольшее влияние на технико–экономические показатели (производство, расход кокса) оказывает расход горнового газа, который является определяющим фактором и зависит от количества и состава дутья. Со снижением расхода дутья на 10% в интервале 60÷100% и сохранением концентрации кислорода в нем уменьшается общая тепловая мощность печи и несмотря на рост коэффициента использования топлива (КИТ) по печи, производительность печи уменьшается на 4 – 5%, а расхода кокса на 2 – 4% (табл.2).

Оценка влияния повышения давления колошникового газа на изменение производительности печи и расхода кокса по данным Л.А.Сабин – Гуза и Е.Ф.Вегмана [13, 14] приведена в табл.2. А.Н.Рамм [15] и Л.А.Сабин – Гуз [13] в своих работах указывают, что оценка влияния повышения давления колошникового газа на изменение производительности печи и расход кокса крайне затруднительна. Это связано с тем, что перевод работы доменных печей в опытных плавках на повышенное давление на колошнике осуществляется одновременно с рядом других мероприятий (увеличение содержание агломерата в шихте, применение офлюсованного агломерата, увлажнение дутья, повышение его температуры и др.). Это приводит к отличиям в количественной оценке влияния давления колошникового газа на изменение производительности печи и расхода кокса.

Выполненные ручные замеры внешних тепловых потерь на доменных печах №5–7 и измеряемые в автоматизированном на доменной печи №9 ОАО «АМКР» указывают и подтверждают: нестабильность тепловых потерь [16], взаимосвязь теплового состояния печи с газодинамическими режимами работы печи и необходимость использования упомянутых выше принципов системного анализа и блочного метода для исследования тепловой работы печи (рис.6–7).

Расход кокса на покрытие тепловых потерь, вычисленный с использованием теплоэнергетического метода по приближенной формуле И.Д. Семикина [17], показан на рис.6–7. Расход кокса на покрытие внешних тепловых потерь для ДП №5–7 составил 22–38 кг/т чугуна (кривая 4 рис.6). Это на 10–25 кг/т чугуна больше, чем у печей аналогичного объема, работающих с центральным газораспределением. Полученная динамика расхода кокса на покрытие тепловых потерь нестабильна во времени, как и сами тепловые потери, и на остановках печи увеличивается в ~2 раза (рис.7 б).

Приближенная формула И.Д. Семикина для расчета расхода кокса на покрытие тепловых потерь имеет вид [17]:

$$K_{\text{итп}} = \frac{100}{Q_{\text{H}}^{\text{P}} \cdot C_{\text{K}}} \cdot \frac{Q_{\text{ПЗ}} \cdot 3600}{\eta_{\text{З}} \cdot P_{\text{З}}} \cdot 1000 \quad (11)$$

где  $Q_{\text{ПЗ}}$  – потери тепла в отдельной зоне печи или печи в целом, МВт;  $\eta_{\text{З}}$  – кит углерода кокса в соответствующей зоне печи или печи в целом;  $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 33412$  кДж/кг полная теплота сгорания углерода кокса;  $C_{\text{K}}$  – содержание

углерода в коксе, % ( $C_K \approx 85 - 87\%$ );  $P_3$  – производительность зон печи, т/ч.

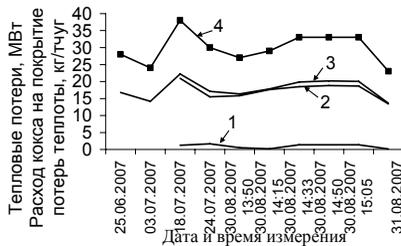
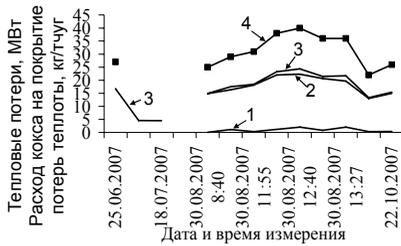


Рис.6. Тепловые потери в системе охлаждения комплекса доменных печей №5, 6, 7 ОАО «АМКР» по данным ручных замеров:

- 1 – воздухонагревателей,
- 2 – доменной печи,
- 3 – общие,
- 4 – расход кокса на их покрытие

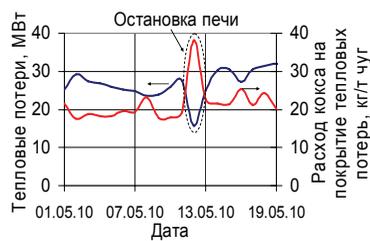
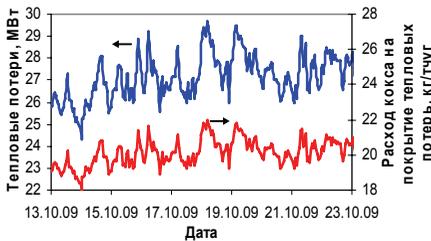


Рис. 7. Тепловые потери доменной печи №9 ОАО «АМКР», измеряемые в автоматизированном режиме и расход кокса на их покрытие по результатам ручных вычислений при постоянной (а) и фактической (б) производительности

Расход кокса на покрытие внешних тепловых потерь, при их варьировании от минимальной до максимальной величины, изменяется в пределах 10–50 кг/т чугуна, что составляет 2–10% от общего расхода кокса (рис.8) [1]. Это сопоставимо с эффектом от других энергосберегающих мероприятий: подогрев дутья, нагрев природного газа, увеличения степени металлизации шихты, повышения степени использования СО (рис.8).

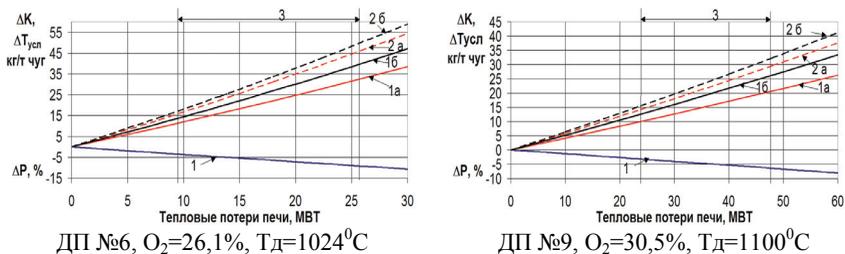


Рис. 8. Влияние внешних тепловых потерь на изменение расхода кокса, условного топлива и производительности печи. Кривая: 1 – по балансовой модели при  $\xi_{\text{CO}}=\text{const}$ ; 2 – расход кокса на покрытие тепловых потерь по формуле И.Д. Семикина; 3 – практика работы печей характерная для данного объема; а – изменение расхода кокса; б – изменение расхода условного топлива

### Заключение

С использованием блочного метода изучения тепловой работы печи на основании синтеза теплоэнергетической балансовой и теплогазодинамической модели установлены закономерности и дана количественная оценка влияния расхода и состава дутья, температуры горнового газа и давления колошникового газа, порозности и диаметра шихты на протекание процессов газодинамики, теплообмена в шахте печи и технико-экономические показатели доменной плавки.

Установлено, что расход горнового газа, продуваемого через слой шихтовых материалов, по сравнению с другими параметрами газового потока, свойствами и распределением шихтовых материалов оказывает определяющее влияние на их прогрев и температуру газа, изменение давления и скорости газового потока. Уменьшение расхода горнового газа на 10%, при прочих равных условиях, приводит к замедлению теплообменных процессов и уменьшению газодинамического напора в шахте: температура шихты, тепловые потери и перепад давления падает в среднем на 20%, скорость газа на 18%.

Результаты расчета показали, что средний прогрев шихтовых материалов в шахте печи и средняя температура колошникового газа при прочих равных условиях определяется средней порозностью материалов в печи, а тепловые потери и форма вязко-пластичной зоны определяется их распределением в шахте печи.

Установлено, что увеличение давления колошникового газа, при прочих равных условиях, приводит к уменьшению рабочего диапазона по перепаду давления в шахте печи, порозности шихты, расходу горнового газа (дутья) и увеличения величины критерия газодинамической устойчивости Дурнова. При низкой газопроницаемости шихтовых материалов для устойчивой газодинамической работы печи, целесообразно организовывать работу на пониженном давлении колошникового газа или снизить расход дутья (выход горнового газа).

Увеличение температуры газа на входе в шахту печи, при прочих рав-

ных условиях, приводит к росту тепловых потерь и снижению КИТ, и соответственно уменьшению усвоенной тепловой мощности, что снижает производительность печи и увеличивает расход кокса.

Увеличение давления колошникового газа, снижение порозности и крупности шихты, при прочих равных условиях, с одной стороны приводит к росту тепловых потерь, а с другой к увеличению КИТ. И в зависимости от величины прироста этих величин производительность печи и расход кокса либо увеличиваются, либо снижаются.

Внешние тепловые потери доменных печей являются неопределенным параметром, для их определения в системе охлаждения печи разработан метод, схема измерения и контроля данных для последующего их вычисления в ручном и автоматизированном режиме. Это позволило внедрить автоматизированную систему контроля тепловых потерь в системе охлаждения доменной печи №9 объемом 5000 м<sup>3</sup> в составе АСУ ТП.

Результаты аналитических, численных и экспериментальных исследований показывают, что внешние тепловые потери в шахте печи составляют 20–50% от их общей величины в доменной печи, на покрытие которых затрачивается 2–10 кг кокса/т (чуг).

Авторы выражают свою благодарность д.т.н. А.В.Бородулину за научное руководство, постановку задачи и помощь при подготовке материалов статьи.

1. *Домна* в энергетическом измерении / [А.В.Бородулин, А.Д.Горбунов, В.И.Романенко, Г.И.Орел.]. – Кривой Рог: СП «Мир», 2004. – 412 с.
2. *Моделирование* теплообмена и газодинамики в шахте доменной печи / А.Ф.Авцинов, А.В.Бородулин, В.К.Хрущ [и др.] // *Сталь*. – 1996. – №8. – С. 4–9.
3. *Сохацкий А.А.* Математическое моделирование и анализ процессов теплообмена и газодинамики в верхней зоне доменной печи с целью обеспечения надежной работы ограждения / А.А.Сохацкий, И.А.Лукьяненко, Г.Т.Цыганков, А.Л.Чайка, А.Г.Шевелев // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр.* – Днепропетровск, 2007. – Вып. 14. – С. 50–59.
4. *Kinney S. P.* Движение шихты и газов в доменной печи / S.P.Kinney. // *Домез*. – 1930. – № 5(11). – С.89–106.
5. *Бялый Л.А.* Исследование процессов восстановления в шахте доменной печи при работе на комбинированном дутье / Л.А.Бялый, А.П.Котов // *Сталь*. – 1966. – №12. – С. 1075–1081.
6. *Кутнер С.М.* Технология задувки доменных печей за рубежом. М., 1984 // *Обзорная информация, ин-т «Черметинформация», сер. «Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна», вып.1, 43с.*
7. *Китаев Б.И.* Теплообмен в доменной печи / Б.И.Китаев, Ю.Г.Ярошенко, Б.Л.Лазарев. – М.: Металлургия, 1966. – 356 с.
8. *Васильев П.Г.* Разработка методики расчета температур газов околофутеровоч-

- ной области доменных печей / П.Г.Васильев, Д.В.Ризун А.И.Васюченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1996. – № 1. – С. 67–68.
9. *Томаш А.А.* Структура зернистого слоя и движение газов в доменных печах: дис. ... доктора технических наук: 05.16.02 / А.А.Томаш. – Донецк, 2004, – 406 с.
  10. *Тихомиров Е.Н.* О формировании жидкой фазы в доменной печи / Е.Н.Тихомиров // *Сталь*. – 1996. – №11. – С. 9 – 14.
  11. *Щедрин В.М.* Теория доменной плавки под давлением / Щедрин В.М. – М.: *Металлургиздат*, 1962. – 454 с.
  12. *Мойкин В.И.* *Металлургическая теплотехника. Тематический отраслевой сборник ВНИИМТа / В.И.Мойкин, В.К.Дурнов, Н.М.Бабушкин // Анализ газодинамического режима доменной плавки с использованием математической модели.* – №3. М.: *Металлургия*. – 1974. – С.21–25.
  13. *Каган И.С.* Применение корреляционного метода для выявления эффективности повышения давления газа на колошнике доменной печи / И.С.Каган, Л.А.Сабин – Гуз // *Металлургия и коксохимия (межвузовский сборник)*. – Киев: *Техника*. – 1966. – №1. – С. 115 – 120.
  14. *Металлургия чугуна / [Е.Ф.Вегман, Б.Н.Жеребин, А.Н.Похвиснев, Ю.С.Юсфин и др.]; под. ред. Ю.С.Юсфина.* – [3-е изд. перераб. и доп.] – М.: *ИКЦ «Академкнига»*, 2004. – 774 с.
  15. *Рамм А.Н.* Современный доменный процесс. / А.Н.Рамм – М.: «*Металлургия*», 1980. – 304 с.
  16. *Кожух В.Я.* Контроль потерь тепла в доменной печи / В.Я.Кожух // *Сталь*. – 1965. – №4. – С. 298–301.
  17. *Тепловые потери и тепловая работа доменных печей / И.Д.Семикин, Г.Т.Цыганков, А.В.Бородулин [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия.* – 1972. – № 8. – С.159–163.

*Статья рекомендована к печати  
докт.техн.наук И.Г.Муравьевой*

***О.А.Сохацький, О.Л.Чайка, О.Г.Шевельов***

**Дослідження процесів тепломасообміну в шахті доменної печі та їх вплив на показники плавки**

Метою роботи є встановлення закономірностей та кількісної оцінки сумісного розвитку теплообмінних і газодинамічних процесів в шахті печі з урахуванням теплової роботи системи охолодження і їх вплив на показники доменної плавки. З використанням блочного методу вивчення теплової роботи печі на основі синтезу теплоенергетичної балансової та тепло-газодинамічної моделі, встановлено закономірності і дана кількісна оцінка впливу витрат і складу дуття, температури горнового газу і тиску газу на колошнику, порозності та середньої крупності шихти на газодинаміку, теплообмін в шахті печі та техніко-економічні показники доменної плавки.