

В.И.Большаков, Н.А.Гладков, В.С.Листопадов
АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ
ПРИ РАЗЛИЧНОМ РАСХОДЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА

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

Впервые получены аналитические зависимости, определяющие взаимосвязи расхода природного газа, позволяющие осуществить оценку состояния текущей плавки на ДП-9 и рассчитывать варианты плавки при взаимосвязанном изменении параметров комбинированного дутья и состава шихты.

Проектными условиями [1] предусмотрена работа доменной печи № 9 на комбинированном дутье высоких параметров при концентрации кислорода 35 % и соответствующем расходе природного газа, обеспечивающем стабильный и устойчивый ход печи. Выбор в качестве дополнительного топлива природного газа, в сравнении с другими видами добавок, обусловлен изначально низкой его ценой, простотой его ввода в печь, небольшими капитальными затратами на систему его подачи, составляющими около 10 % затрат на систему подготовки и подачи ПУТ [2], меньшей требовательностью к качеству шихтовых материалов. Положительные особенности развития процессов в печи при использовании комбинированного дутья на основе природного газа (увеличение количества фурменного газа с высоким управляемым восстановительным потенциалом и возможностью регулирования в широких пределах температурно-теплого состояния горна) способствовали увеличению расхода природного газа. Результаты исследований [2–9] показали, что величина расхода газа определяется в конкретных условиях плавки тепловыми, газодинамическими и физическими процессами у фурм, в значительной мере обусловленными качеством исходной шихты. Анализ технологических особенностей применения в доменной плавке разных добавок к дутью, показал [7], что расход природного газа и, следовательно, экономия кокса, обуславливаются термодинамическими факторами, зависящими от уровня теоретической температуры газа у фурм, состава, свойств и нагрева шихтовых материалов, определяющими физическими характеристиками шлака. При рациональных значениях этих показателей обеспечивается нормальный с достаточной скоростью дренаж жидких продуктов плавки и противоток горновых газов, стабильность плавки и высокая ее эффективность [3,7,9]. Взаимосвязь расхода газа и вязкости шлака четко проявляется при нормальном тепловом состоянии горна [7,10].

Заметное отличие в расходах и эффективности использования комбинированного дутья на различных металлургических предприятиях отрасли в зависимости от качества проплавленных шихтовых материалов следует из анализа и обобщения опыта их работы [6]. В статье [8] показано, что

важным фактором повышения эффективности использования природного газа в сочетании с кислородным дутьем является подготовка качественных шихтовых материалов, что следует из сравнения работы в близких условиях печей объемом 2000 м^3 Череповецкого и Криворожского металлургических заводов, проплавлявших разные агломераты. Показано, что только при использовании высококачественной шихты оптимальное содержание кислорода в дутье составляет 30 % при расходе природного газа $150\text{--}155 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна. Расход кокса при этом уменьшается до $380\text{--}390 \text{ кг/т}$ чугуна. [8].

Установлено [9,10] несоответствие предполагаемой и действительной эффективности технологического режима с высоким расходом природного газа, что обусловлено следующими факторами: уровень расчетной температуры у фурм не увеличивается и тепловое состояние горна не изменяется пропорционально расходу природного газа вследствие возрастающего термического разложения углеводородов перед фурмами; коэффициент замены кокса природным газом уменьшается до $0,3\text{--}0,5 \text{ кг/м}^3$; увеличивается колеблемость состава чугуна ввиду ухудшения свойств шлака за счет образования на нем плохо проницаемых пленок сажистого углерода; возникает заграфичивание горна; уменьшаются стабильность плавки и ее управляемость.

На металлургических предприятиях Украины расход природного газа в 2007 году $82,2 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна. Увеличение стоимости природного газа обусловило поиск путей улучшения использования достоинств природного газа в доменной плавке, главным образом, путем совершенствования устройств ввода его в фурму, одновременно начались исследования возможности уменьшения его расхода. При этом заметно меняется технологический режим, сохранение эффективности которого на достигнутом уровне требует: оптимизации интенсивности плавки; установления рациональной (в частности, по температурно-тепловым параметрам) геометрии фурменной зоны); использования шихтовых материалов надлежащего состава и качества и корректировки шлакового режима, увеличивающего эффективность применения комбинированного дутья.

Особенностью плавки в доменной печи № 9 является использование многокомпонентной шихты [1], характер поведения составляющих которой (реакционная способность, восстановимость, плавкость и др.) оказывает влияние на поведение в фурменной зоне углеводородов природного газа, их энергоотдачу, воздействие на кладку, качество и отработку продуктов плавки. В настоящей работе исследованы особенности определения в условиях многокомпонентной шихты, рационального расхода природного газа и его зависимости от состава и свойств первичного и конечного шлаков, изменяющихся при изменениях состава многокомпонентной шихты. В качестве основных показателей, отражающих состояние плавки и уровень использования природного газа, выбрали:

– C_{ϕ} (кг/т ч. или кг/мин) – количество углерода кокса, сгорающего у фурм. Величина C_{ϕ} отражает эффективность использования углерода кокса при данном расходе природного газа;

– Rd (ед., %) – степень прямого восстановления, отражающая долю кислорода восстанавливающихся в доменной печи оксидов, элементы которых переходят в чугун, от общего количества кислорода, содержащегося в этих оксидах, характеризующая уровень использования природного газа;

– Q_d (м³/т чуг.) – удельное количество дутья, расходуемого на выплавку чугуна, изменяющегося от концентрации в нем кислорода и природного газа;

– $\rho/\Delta\epsilon$ – физико-химический критерий качества шлака [11].

В качестве характеристики качества продуктов плавки выбрали отношения $(MgO)/(Al_2O_3)$ и $(R_2O)/(S)$ в шлаке и отношение доли кремния в чугуне к количеству серы в печи $[Si]/0,5(S)$.

Методический прием, использованный в настоящем исследовании, включал составление полных материального и теплового балансов доменной плавки и определение комплекса параметров (табл.1), наиболее полно характеризующих состояние плавки в доменной печи № 9 на многокомпонентной шихте, включающих в качестве топливных компонентов кокс и антрацит. К рудным составляющим отнесены агломерат НКГОК–2, окатыши СевГОК, шлак обогащенный и доменный скрап. Выполнен анализ показателей 20-ти реальных периодов работы ДП-9 в 2005-2006 годах при расходе природного газа, изменявшегося от нуля до 90 нм³/т чуг. На первой стадии исследований проанализировали изменение показателей плавки в зависимости от концентрации кислорода в дутье (ω_k , ед.) и расхода природного газа (ПГ, нм³/т чуг.). При этом зависимости изменения количества сгорающего у фурм углерода кокса C_{ϕ} , удельного расхода дутья и степени прямого восстановления Rd представлены как функции двух ключевых аргументов ПГ и ω_k , кроме того получено уравнение взаимосвязи между ПГ и ω_k . Результаты анализа представлены в виде аналитических зависимостей (1)–(7) и графиков (рис. 1–3).

Перечень основных аналитических зависимостей представлен уравнениями:

$$C_{\phi} = 9,733\omega_k^2 - 5,2671\omega_k + 0,9634 \quad r=0,858 \quad (1)$$

$$C_{\phi} = 0,000006(ПГ)^2 + 0,0001(ПГ) + 0,2948 \quad r=0,960 \quad (2)$$

$$Rd = -0,000007(ПГ)^2 - 0,0002(ПГ) + 0,3505 \quad r=0,875 \quad (3)$$

$$Rd = -5,0262\omega_k^2 + 1,6003\omega_k + 0,2297 \quad r=0,895 \quad (4)$$

$$ПГ = -12057\omega_k^2 + 6926,7\omega_k - 913,56 \quad r=0,911 \quad (5)$$

$$Q_d = 18294\omega_k^2 - 11467\omega_k + 2850,4 \quad r=0,956 \quad (6)$$

$$Q_d = -0,0068(ПГ)^2 - 1,525(ПГ) - 1255,4 \quad r=0,902 \quad (7)$$

Доля C_{ϕ} нелинейно зависит и от концентрации кислорода в дутье (уравнение (1)), имеет выраженный минимум (рис.1).

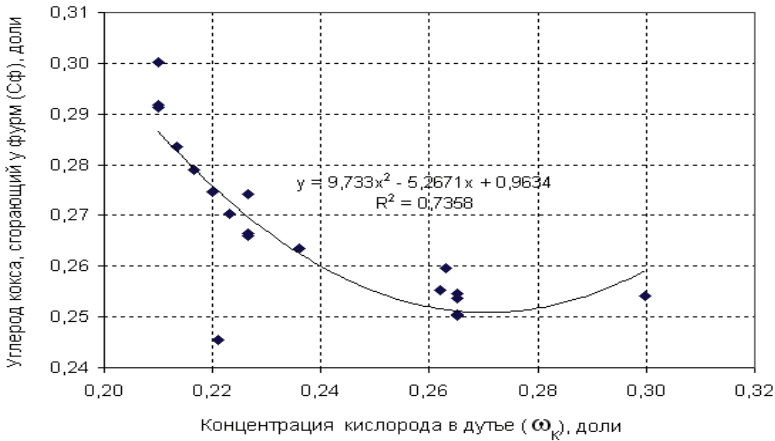


Рис.1. Зависимость изменения расхода углерода кокса, сгорающего у фурм (C_{ϕ}) и концентрации кислорода в дутье

Из графика следует, что при существующих условиях наиболее экономичная (при минимальном $C_{\phi} = 0,25$) плавка реализуется (уравнение (2), (5)) при концентрации кислорода в дутье 26,5 % и расходах природного газа 70-75 $\text{нм}^3/\text{т}$ чугу. и дутья (уравнения 6 и 7) порядка 1100 $\text{нм}^3/\text{т}$ чугу. При этих условиях расход кокса может составлять 380-445 $\text{кг}/\text{т}$ чугу. (рис.2).

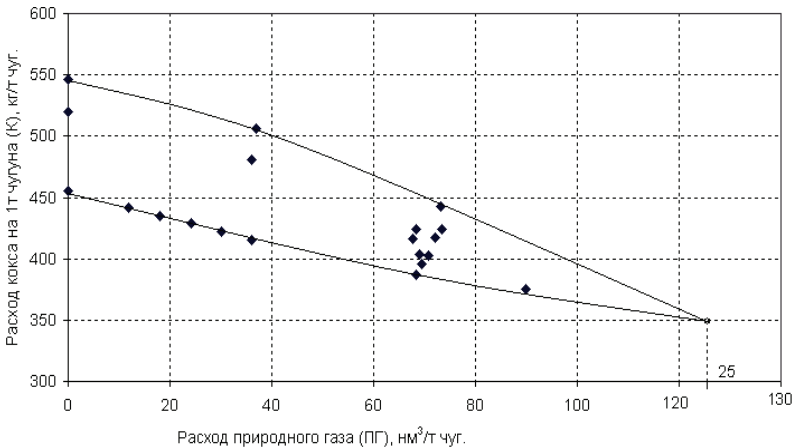


Рис.2. Изменение расхода кокса на выплавку чугуна (K) от расхода природного газа (ПГ).

Заметный разброс величин расхода кокса определяется соотношением компонентов шихты и увеличением степени прямого восстановления R_d до 0,32–0,035 (уравнения 3 и 4).

Зависимости (1)–(7) позволяют оценивать состояние плавки на ДП-9 её при изменении параметров комбинированного дутья и состава шихты.

Результаты исследования позволяют оценить величины наиболее информативных показателей, определяющих качество комбинированного дутья при увеличении расхода природного газа до максимальных пределов (180 $\text{нм}^3/\text{т}$ чугуна), известных в литературе [2] и обоснованных теоретически [9]. На рис.3 приведены соответствующие аналитические и графические зависимости для изменяющихся в широких пределах (табл.1) параметров комбинированного дутья: O_2 – концентрация кислорода в дутье, %; D – доля природного газа в дутье, ед.; σ – расход вдуваемого топлива на 1 кг C_f ; ПГ – расход природного газа, $\text{нм}^3/\text{т}$ чугуна.

Таблица 1. Значения параметров комбинированного дутья для исследованных вариантов

№	Параметр комбинированного дутья			
	ПГ, $\text{нм}^3/\text{т}$	σ	O_2 , %	D
1	150	0,5071	27	0,1181
2	140	0,4611	31,5	0,1231
3	151	0,469	37,5	0,1416
4	156	0,5257	38	0,1551
5	157	0,5115	35	0,1436
6	180	0,2226	40	0,1826
7	98,6	0,3087	23,8	0,071
8	139,6	0,4601	29,1	0,1158
9	110	0,3461	26,7	0,086
10	153	0,5167	34,7	0,1438
11	140	0,4611	31,5	0,1231
12	156	0,5257	38	0,1551
13	82,8	0,2701	26,3	0,069
14	85,7	0,279	26,3	0,071
15	70,73	0,2482	26,4	0,063
16	0	0	21	0

Выполнен анализ и установлены особенности изменения результатов работы печи на многокомпонентной шихте при изменении параметров комбинированного дутья (табл.2). Проанализированы периоды плавки без природного газа (ПГ) на атмосферном дутье (21 % O_2) и при последовательном увеличении в дутье доли кислорода и природного газа соответственно 21,33–21,99 % O_2 и 11,9–24 $\text{м}^3/\text{т}$. ч. ПГ; 22,65 % O_2 и 35,95–37,0

м³/т. ч. ПГ; 26,2–26,5 % O₂ и 68,4–77,2 м³/т. ч. ПГ; O₂ – 29,98 % и ПГ – 89,84 м³/т. чугу.

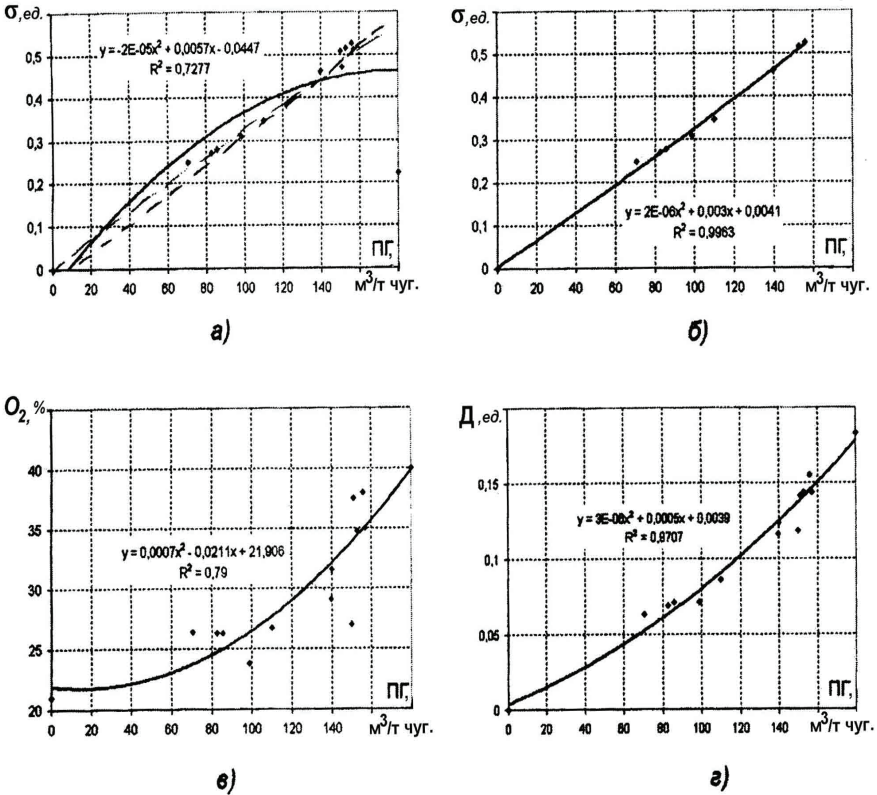


Рис.3. Блок-карта параметров комбинированного дутья:

а, б – зависимости $\sigma = f(\text{ПГ})$ для вариантов 1-16 и 7-16 соответственно; в, г – зависимости $O_2 = f(\text{ПГ})$ и $D = f(\text{ПГ})$ для вариантов 1-16 (табл.1)

Выполнен анализ и установлены особенности изменения результатов работы печи на многокомпонентной шихте при переменных параметрах комбинированного дутья (табл.2). Проанализированы периоды плавки без природного газа (ПГ) на атмосферном дутье (21 % O₂) и при последовательном увеличении в дутье доли кислорода и природного газа соответственно 21,33–21,99 % O₂ и 11,9–24 м³/т. ч. ПГ; 22,65 % O₂ и 35,95–37,0 м³/т. ч. ПГ; 26,2–26,5 % O₂ и 68,4–77,2 м³/т. ч. ПГ; O₂ – 29,98 % и ПГ – 89,84 м³/т. чугу.

На атмосферном дутье (№ 1–3 табл. 2) осуществлены 3 варианта плавки: на шихте, состоящей только из агломерата НКГОК–2 (95 %) и окатышей (5 %), затем при введении в эту шихту смеси (135 кг/т) из шлака обогащенного (90 кг/т) и скрапа доменного (45 кг/т) и, наконец, при добавлении к шихте (вариант 3, табл. 2) антрацита (61,8 кг/т ч.). Расход кокса по этим вариантам составлял соответственно (кг/т чугуна): 545,9; 519,7; 454,9. Для доменной печи № 9, согласно этим цифрам, и принимая за базовое значение расхода кокса практически на одном агломерате (95 % в шихте и 5 % окатышах) – 545,9 кг/т чугуна, эффективность на атмосферном дутье металлургических материалов (в смеси шлака со скрапом содержится 45,15 % $Fe_{мет}$), составит: $545,9 - 519,7 = 26,2$ кг/т ч. и, следовательно, $26,9 : 135,67 = 0,193$ кг кокса на 1 кг металлургической смеси. Эффективность антрацита, при введении его в шихту аналогичным счетом определится величиной 1,05 кг кокса на 1 кг антрацита.

При расходе природного газа $37,02$ м³/т чугуна и увеличении концентрации кислорода в дутье на 1,65 % до 22,65 % обеспечена теоретическая температура газа у фурм ($T_{ф}$) – 2105 °С. Расход кокса составил 505 кг/т чугуна и уменьшился по сравнению с вариантом 1 на 40 кг/т чугуна или на 1,08 кг на 1 м³ ПГ. Ввод в шихту № 5 дополнительно 135,1 кг смеси шлака обогащенного и скрапа при сохранении концентрации кислорода (22,65 %) обусловил уменьшение расхода ПГ до 35,99 (на 1,03 м³/т чугуна). При этом расход кокса уменьшился на 24,7 кг/т. Учитывая, что уменьшение расхода ПГ привело к увеличению расхода кокса на 1,13 кг/т чугуна, введение 135,7 кг/т чугуна смеси обогащенного шлака и скрапа обеспечило уменьшение расхода кокса на 25,84 кг/т или 0,19 кг/т кокса на каждый килограмм смеси.

Из рассмотренных (варианты 1–6 табл. 2) случаев технологического режима при сравнительно небольшом содержании кислорода в дутье (21 – 22,65 %) и ограниченном расходе природного газа (до 37 м³/т чугуна) следует, что при постоянном составе комбинированного дутья эффективность плавки определяется рациональным соотношением компонентов шихты, при котором могут быть получены меньшие расходы кокса и дутья. Так, при концентрации кислорода в дутье 22,65 % и расходе природного газа около 36 м³/т чугуна может быть достигнут расход кокса 415 кг/т чугуна при ограниченном дутье порядка 1184 м³/т чугуна, если состав шихты представлен характерными для этого периода плавки величинами (кг/т чугуна): антрацит – 61,85; смеси шлака и скрапа 135,67 и отношении агломерата к окатышам 95 : 5 % (соответственно 1498 и 87,19 кг/т чугуна). Производство чугуна (8290 т/сут) определит величину КИПО – 0,6123 (при проектном объеме печи). Исключение же из такой шихты антрацита (61,85 кг/т чугуна) обусловит увеличение расхода кокса до 480,5 кг/т чугуна и уменьшение КИПО до величины 0,5899 (8600 т/сут. чугуна).

Таблица 2. Показатели плавки при различных параметрах комбинированного дутья

Показатели	Численные значения показателей по вариантам №№												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	21,0	21,0	21,0	22,7	22,7	22,7	23,6	26,2	26,5	26,5	26,5	26,5	30,0
2	0	0	0	37,0	36,0	35,9	73,2	72,0	73,3	70,7	69,5	68,4	89,8
3	0	0	61,9	0	0	61,9	27,6	34,2	43,6	43,6	57,1	57,1	61,9
	0	135,7	135,7	0	135,1	135,1	105,3	132,8	43,6	43,6	69,5	68,4	135,7
	545,0	519,7	454,9	505,0	480,5	415,8	442,0	417,2	424,0	402,4	396,2	386,7	375,3
	1630,3	1496,0	1497,1	1639,0	1497,0	1498,0	1450,3	1348,2	1342,0	1343,1	1336,0	1336,0	1499,1
	94,9	87,1	87,1	95,0	87,1	87,2	154,2	226,6	244,1	245,0	245,5	245,6	87,3
4	1283,2	1246,2	1244,5	1220,7	1186,0	1184,4	1128,0	1112,7	1158,4	1088,4	1096,3	1079,2	1050,0
5	1786,7	1720,7	1716,2	1715,3	1652,7	1648,3	1742,4	1567,3	1612,1	1538,2	1548,4	1516,1	1463,7
	18,85	18,64	18,66	18,97	18,75	18,76	16,83	19,02	18,24	19,95	19,49	20,28	20,87
	0,770	0,771	0,771	0,771	0,771	0,770	0,654	0,723	0,563	0,771	0,734	0,790	0,770

6	Расход углерода кокса на фурмах, Сф, кг/мин т чугу.	0,300	0,292	0,291	0,274	0,263	0,266	0,264	0,255	0,260	0,254	0,255	0,251	0,254	
7	Доля CO, % в горновом газе в колошн. газе	35,43	35,43	35,43	35,43	35,43	35,43	34,90	37,53	37,64	37,64	37,95	37,95	40,25	
		24,47	24,19	24,21	24,62	24,33	24,35	25,72		26,31	27,79	25,88	26,55	25,67	27,09
8	Степень прямого восстановл. R _d , ед.	0,365	0,352	0,352	0,340	0,326	0,326	0,322	0,301	0,328	0,297	0,305	0,291	0,249	
9	Выход шлака, кг/т чуг.	432,5	448,0	445,3	426,4	442,3	439,0	405,0	403,8	412,0	410,0	406,2	405,1	433,1	
10	Соотношение MgO/Al ₂ O ₃	0,616	0,965	0,710	0,366	0,717	0,730	0,759	0,792	0,321	0,333	0,323	0,329	0,754	
		0,129	0,139	0,140	0,130	0,141	0,141	0,141	0,145	0,150	0,146	0,146	0,146	0,140	
		1,389	1,509	1,455	1,482	1,600	1,569	1,067	1,111	1,111	1,096	1,428	1,127	1,143	1,296
11	Физ.хим парам.	ρ	0,717	0,717	0,716	0,717	0,717	0,720	0,718	0,721	0,721	0,719	0,718	0,717	
		ρ'-Δε	0,306	0,306	0,308	0,308	0,306	0,306	0,307	0,306	0,308	0,310	0,305	0,305	
12	Свойства расп- лава ΔH, ккал/кг	1833,1	1830,1	1830,0	1832,5	1829,7	1829,5	1829,4	1829,6	1830,3	1831,7	1828,3	1828,4	1829,0	
		σ ₁₅₀₀	0,304	0,323	0,323	0,313	0,323	0,323	0,359	0,334	0,373	0,373	0,346	0,334	0,323
		σ ₁₅₀₀	426,4	423,8	423,1	426,3	423,4	423,1	423,1	422,1	423,3	424,1	425,5	421,8	422,6
	κ _п	0,623	0,605	0,687	0,606	0,590	0,612	0,839	0,647	0,602	0,585	0,612	0,604	0,557	

Следовательно, наличие в шихте указанного количества антрацита приводит к уменьшению расхода кокса (на 1,04 кг на 1 кг антрацита), но уменьшает производство чугуна примерно на 400 т/сутки. Последнее связано с изменением шлакового режима, характеризующегося показателями соответственно с антрацитом и без него: отношения MgO / Al_2O_3 - 0,7298 и 0,7169; $R_2O / 0,5 (S)$ - 1,2353 и 1,260; $[Si] / 0,5 (S)$ - 1,5686 и 1,600; $\rho/-\Delta e$ - 0,3056 и 0,3059 при выходе шлака 439,91 кг/т ч. и 442,29 кг/т ч. Небольшие изменения при этом имеют место и в параметрах плавки: S_{ϕ} - 0,2661 и 0,2664, R_d - 0,3262 и 0,3259 и в выходе колошникового газа: 1648,3 и 1652,7 м³/т чугуна.

Влияние металлизированных материалов на эффективность (применение) комбинированного дутья можно оценить при рассмотрении вариантов плавки 7–12 (табл. 2). При наиболее технологичной концентрации кислорода в дутье (24–26 %) высокие расходы природного газа (68,5–77,2 м³/т чугуна) имеют место при увеличении расхода смеси шлака обогащенного и скрапа, изменяющихся от 43,7 до 135,4 кг/т чугуна. При этом в условиях многокомпонентной шихты максимальный расход природного газа не обязательно обуславливает наибольшую эффективность плавки по коксу. Как следует из анализа вариантов 7–10 эффективность плавки определяется рациональным сочетанием компонентов шихты. Так, при увеличении расхода антрацита от 27,6 м³/т чугуна до 43,7 кг/т чугуна и при практически постоянном (70,7–73,3 м³/т чугуна) расходе природного газа, расход кокса уменьшается с 442,6 до 402,4 кг/т чугуна. в условиях стабильной доли окатышей в шихте 15,5 %. При умеренном расходе природного газа (варианты 11–12) (68–70 м³/т чугуна) и использовании 68,5–69,5 кг/т чугуна металлизированных материалов, 57,1 кг/т чугуна антрацита и 15,5 % окатышей в шихте расход кокса достигает величины 396,2 – 386,7 кг/т чугуна. Этому способствует уменьшение расхода сырого флюса (14,4–13,6 кг/т), минимальный расход дутья (1079,2–1088,4), активное развитие восстановительного процесса (R_d в пределах 0,3048–0,2912), уменьшение выхода колошникового газа (1548,4–1516 м³/т чугуна), увеличение содержания в нем CO_2 (19,49–20,28 %) и степени использования газа (42,3–44,12 %). Негативное проявление такого технологического режима состоит в высоких значениях КИПО (0,6122–0,6043), определяемых главным образом газодинамическим режимом, обусловленным многокомпонентностью шихты, нестабильностью гранулометрического и химического состава ее компонентов.

Анализ рассмотренных вариантов плавки свидетельствует, что при увеличении расхода природного газа (90 м³/т чугуна и более) и соответствующем обогащении дутья кислородом (30 %), хорошем качестве компонентов шихты достигаются высокие показатели плавки при рациональном уровне ее параметров. Это следует из данных работы доменной печи № 9, представленным вариантом 13 в табл. 2. Низкий расход кокса (375,26 кг/т чугуна) и высокое производство 9100 т/сут при КИПО 0,5571 достигается за счет эффективного использования высоких параметров комбинированно-

го дутья, небольшого его расхода ($1050 \text{ м}^3/\text{т чуг.}$), в сочетании с предельными расходами антрацита ($61,85 \text{ кг/т ч.}$), повышенного качества шлака обогащенного (90 кг/т ч.) в смеси с доменным скрапом (45 кг/т чуг.) на базе высокого расхода агломерата (1499 кг/т чуг.) и низкого – окатышей ($87,25 \text{ кг/т чуг.}$). Указанное сочетание компонентов шихты обеспечивало формирование устойчивого состава шлака с рациональным отношением $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,7538 \text{ ед.}$, наиболее высоким значением $\text{R}_2\text{O} / 0,5 (\text{S}) - 1,2963 \text{ ед.}$ и наименьшей величиной $\rho/-\Delta\epsilon - 0,3051 \text{ ед.}$, характеризующих высокую активность шлака, способствующего улучшению дутьевого и газодинамического состояния плавки, о чем свидетельствует уменьшение выхода колошникового газа ($1463,7 \text{ м}^3/\text{т чуг.}$) и высокие значения величин окиси углерода в горновом и колошниковом газах ($40,25$ и $27,09 \%$). Следует подчеркнуть, что высокая концентрация CO в горновом газе ($40,25 \%$) при высокой концентрации CO₂ в колошниковом газе ($20,87 \%$) является косвенным свидетельством хорошего распределения шихты на колошнике. Рациональные величины параметров анализируемого варианта плавки определили высокую степень использования газа (η_{CO}) равную $43,52 \%$ и уменьшенный расход кокса.

Анализ периодов работы доменной печи № 9 при разном расходе кислорода и природного газа на многокомпонентной шихте свидетельствует, что свойства используемых шихтовых материалов оказывают влияние на эффективность применения комбинированного дутья и результаты плавки. Расход природного газа ограничен (при данной концентрации кислорода в дутье) расходом антрацита ввиду дефицита кислорода на полную газификацию обоих видов топлива. Потребность в природном газе возрастает при увеличении доли окатышей в шихте. Уровень параметров комбинированного дутья может быть более высоким при увеличении расхода шлака обогащенного, однако расход его ограничен пределами расхода восстановителей на извлечение связанного в шлаке кислорода, а также значительным расходом тепла на превращение шлака в текучее состояние. Металлизированные материалы, в частности, скрап требуют тепла на расплавление, а не восстановителей. Следовательно, в соответствии со складывающейся ситуацией следует искать рациональные сочетания состава многокомпонентной шихты, количественный состав компонентов которой возможно прогнозировать по данным представленного анализа. При этом для условий многокомпонентной шихты, используемой в настоящее время в доменной печи № 9, могут быть рекомендованы следующие рациональные параметры для двух возможных технологических режимов: 1) концентрация кислорода в дутье $26-27 \%$ и расход природного газа $68-70 \text{ м}^3/\text{т чуг.}$, расход антрацита $55-57 \text{ кг/т чуг.}$ и смеси шлака и скрапа $120-130 \text{ кг/т чуг.}$ при соотношении агломерата и окатышей $87,5:15,5 \%$; 2) концентрация кислорода в дутье 30% , расход природного газа $90-95 \text{ м}^3/\text{т чуг.}$, при расходах антрацита и смеси шлака и скрапа соот-

ветственно 60–62 и 130–135 кг/т чугу. отношении агломерата к окатышам 95:5 %.

При рассмотренных вариантах 11,12,13 (табл. 2) параметров плавки в доменной печи № 9 расход кокса достигает проектной величины 386 кг/т чугу. [1] при ограниченном (70–90 м³/т чугу.) расходе природного газа. Для получения же предусмотренного проектом производства (11200 т/сут) требуется существенное улучшение качества шихтовых материалов и разработка условий рационального их применения, обеспечивающих формирование оптимального шлакового режима.

Заключение

В результате расчетно-аналитических исследований реальных условий работы ДП-9 в 2005–2006 годах при расходе природного газа, изменявшегося от нуля до 90 м³/т чугу., определено рациональное его количество, обеспечивающее приемлемый (0,7–0,8 ед.) коэффициент замены кокса. Показано, что в сложившихся технологических условиях, характеризующихся, в частности, высокой теоретической температурой газа у фурм (порядка 2150 °С), повышенной влажностью дутья (30 г/м³ и более) при концентрации кислорода 26,5 %, расход природного газа в 70–78 м³/т чугу. обеспечивает расход кокса в пределах 390–450 кг/т чугу. Впервые получены аналитические зависимости, определяющие взаимосвязи расхода природного газа, количества дутья, концентрации в нем кислорода, степени прямого восстановления и количества сгорающего у фурм углерода кокса, позволяющие осуществить оценку состояния текущей плавки на ДП-9 и рассчитывать варианты плавки при взаимосвязанном изменении параметров комбинированного дутья и состава шихты.

1. *Сравнительная оценка проектных и существующих показателей работы доменной печи № 9 объемом 5000 м³ / В.И.Большаков, Н.А.Гладков, И.Г.Муравьева, В.С.Листопадов // Металлургическая и горнорудная промышленность, – 2007. – № 5. – С.10–15.*
2. *Савчук Н.А., Курунов И.Ф. Доменное производство на рубеже XXI века //Новости черной металлургии за рубежом, –2001, – часть II, – Приложение 5. – 42 с.*
3. *Товаровский И.Г. Доменная плавка, эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. –Пороги, 2003. – 600 с.*
4. *К вопросу о качестве железорудных материалов / Н.М.Можаренко, Н.А.Гладков, А.С.Нестеров и др. // Сталь. – 1997. – № 8. – С.3–5.*
5. *Товаровский И.Г., Хомич В.Н., Боярская Г.П. Исследование эффективности применения дутьевых добавок в доменном процессе // Сталь, – 1980. – № 11. – С. 941–949.*
6. *Волков Ю.П., Жембус М.Д., Еленок И.И. Опыт работы доменных печей СССР с применением комбинированного дутья. ЦНИИиТЭИ ЧМ, – 1968. – 64 с.*

7. *Технологические аспекты применения в доменной плавке топливных добавок, вводимых в фурменные зоны совместно с дутьем, обогащенным кислородом* /В.Г.Воскобойников, Н.Е.Дунаев, Б.Л.Жураковский, А.Г.Михалевич, Ж.Е.Слепцов // *Сталь*. – 1980. – № 10. – С.888–896.
8. *Шаповалов М.А., Филиппова Л.Г.* Возможные удельные расходы природного газа и кислорода и снижение расхода кокса в доменной плавке // *Сталь*. – 1967. – С.985–985.
9. *Андронов В.И.* Доменная плавка на комбинированном дутье в свете дискуссии по принципу Грюнера // *Познание процессов доменной плавки*. – Пороги, 2006. – С.388–409.
10. *Бялый Л.А.* Об оптимальном расходе природного газа в доменной плавке // *Сталь*, – 1973, – № 3. – С. 197–203.
11. *Хамхотько А.Ф., Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И.* Новый подход к оценке термодинамических свойств металлургических оксидных систем // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. научн. тр. ИЧМ. – 1999. – Вып. 3. – К.: Наукова думка, – С. 125–132.

Сведения об авторах:

Большаков Вадим Иванович, член-корреспондент НАН Украины, директор Института черной металлургии НАН Украины;

Гладков Николай Андреевич, канд.техн.наук, старший научный сотрудник Института черной металлургии НАН Украины;

Листопадов Владислав Станиславович, над доменного цеха ОАО «Арселор-Миттал Кривой Рог».