

kano, Y. Matsukura et al. // Tetsu-to-Hagane. 2006. 92. № 12. P. 323-329. (ОАО «Черметинформация»). Новости чёрной металлургии за рубежом. - 2008. - № 1. - С. 27-30.

6. Shimizu M., Naito M. Technological progresses and researches on blast furnace ironmaking in the new century // Tetsu-to-Hagane. 2006. 92. №12. P. 694-702. (ОАО «Черметинформация»). Новости чёрной металлургии за рубежом. - 2007. - № 4. С. 22-31.

7. Naito M. Necessity of high strength and high reactivity for coke // CAMP ISIJ. - 2007.20. P. 620-623. (ОАО «Черметинформация»). Новости чёрной металлургии за рубежом. - 2008. - № 5. - С. 15-22.

8. Лялюк В.П., Тараканов А.К., Кассим Д.А. Влияние реакционной способности кокса на технико-экономические показатели доменной плавки // Кокс и химия. - 2011. - № 2. - С. 16-22.

9. Тараканов А.К., Лялюк В.П., Кассим Д.А. Обоснование современных подходов к оценке качества доменного кокса // Сталь. - 2011. - № 7. - С. 20-22.

10. Итоги работы предприятий ассоциации «Укр

рkokс» в 2010 году. – Днепропетровск: Украинская научно-промышленная ассоциация «Укрkokс». - 2011. – 109 с.

11. Итоги работы предприятий ассоциации «Укрkokс» в 2011 году. – Днепропетровск: Украинская научно-промышленная ассоциация «Укрkokс», 2012. – 107 с.

12. Опыт эксплуатации, выдувки, ремонта и пуска после реконструкции доменной печи объемом 2700 м<sup>3</sup> / В.А. Шеремет, В.П. Лялюк, А.В. Кекух и др. // БНТИ Черная металлургия. - 2010. - № 3. - С. 50-59.

13. Выбор направлений развития коксоберегающей технологии доменной плавки / В.П. Лялюк, И.Г. Товаровский, В.А. Шеремет и др. // БНТИ Черная металлургия. - 2010. - № 1. - С. 37-41.

Поступила 19.12.2012



Производство

УДК 669.184.16

Ярошевский С.Л. /д.т.н./, Минаев А.А. /д.т.н./, Кузин А.В. /к.т.н./, Мишин И.В.

Донецкий НТУ

Кузнецов А.М. /к.т.н./

ПАО «Енакиевский МЗ»

## Ресурсы и эффективность полной и комплексной компенсации при использовании пылеугольного топлива (ПУТ) в доменной плавке

На основе принципа полной и комплексной компенсации выполнен расчет технологических режимов с применением ПУТ (от 0 до 230 кг/т) для доменной печи № 3 ПАО «Енакиевский металлургический завод» («ЕМЗ»). Реализация ПУТ-технологии в сложившихся шихтово-технологических условиях ДП № 3 ПАО «ЕМЗ» может обеспечить вдувание на 1 т чугуна 160 кг ПУТ, вывод из состава дутья ПГ (43,0 м<sup>3</sup>/т), снижение расхода кокса на 170 кг/т (33,5 %). Теоретические соображения, современный промышленный опыт подтверждают, что на основе данного принципа и при наличии соответствующих компенсирующих мероприятий реальной становится возможность замены до 60-80 % скипового кокса дополнительным топливом, снижения расхода кокса до 200-300 кг/т чугуна. Табл. 7. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** доменная плавка, полная и комплексная компенсация, кокс, пылеугольное топливо

The calculation of technological modes with the use of pulverized coal fuel (from 0 to 230 kg/t) is executed on the basis of a principle of full and complex compensation for a blast furnace No. 3 of Yenakiiieve Iron and Steel Works. The realization of pulverized coal technology in the existing burden-technological conditions of a blast furnace No. 3 of Yenakiiieve Iron and Steel Works can provide injection of 160 kg such fuel per 1 t pig-iron, a removal of natural gas from composition of hot blast (43.0 m<sup>3</sup>/t), decrease in the coke consumption by 170 kg/t (33.5 %). Theory and modern industrial experience confirm that on the basis of the given principle and in the presence of corresponding compensating actions real there is a possibility of replacement of 60-80 % skip coke by additional fuel, decrease of coke consumption to 200-300 kg/t of pig iron.

**Keywords:** blast furnace operation, full and complex compensation, coke, pulverized coal

Развитие и совершенствование технологии комбинированного дутья, применение в качестве дополнительного топлива ПУТ показали, что замена допол-

нительным топливом более 15-20 % кокса вызывает значительные нарушения важнейших параметров доменной плавки – теплового и газодинамического

© Ярошевский С.Л., Минаев А.А., Кузин А.В., Мишин И.В., Кузнецов А.М., 2013 г.

## ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

режимов, условий горения топлив и др., что и стало основой для создания методики компенсации указанных нарушений технологического процесса, и за счет этого создания условий для повышения расхода дополнительных топлив, повышения эффективности их использования [1, 2].

**Таблица 1. Химический состав кокса и ПУТ, использованных в расчетах**

Вид топлива	Зола	S
Кокс обычный	11,30	1,07
Кокс Премиум	10,90	0,80
ПУТ*	11,15	0,83

\* – смесь углей марок «Т» (Украина, Донбасс) и «Т» (Россия, Кузбасс) в соотношении 1:1

С целью повышения достоверности расчета технологических режимов предложены определяющие параметры, превышение определенного уровня которых невозможно в сложившихся технологических условиях. Компенсирующие мероприятия обеспечивают сохранение в расчетном режиме величины  $SK_3$  и допустимого уровня определяющих параметров за счет улучшения качества железорудных материалов, кокса, ПУТ, показателей температурно-дутьевого режима и др. [2]. Методика расчета показателей доменной плавки с высоким расходом ПУТ создана на основе работ профессора А.Н. Рамма [3].

**Таблица 2. Номенклатура и уровень компенсирующих мероприятий в технологических режимах с вдуванием ПУТ**

Показатели	База	Технологические режимы						
		Компенсация только ПГ	Полная и комплексная компенсация					
			1	2	3	4	5	6
Оптимальный расход ПУТ, кг/т чугуна	0	45	135	160	185	210	220	230
Расход ПГ, м <sup>3</sup> /т чугуна	43	26	0	0	0	0	0	0
Содержание кислорода в дутье, %	21	21	21	22,9	25,1	27,5	28,5	29,9
Давление газа под колошником (изб.), кПа	152	152	180	180	180	180	180	180
Температура дутья, °С	1136	1136	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Расход материалов, кг/т чугуна:								
агломерат ЕМЗ	498	498	0	0	0	0	0	0
агломерат ЕМЗ высокоосновный (2,0)	0	0	715	715	715	580	490	400
агломерат ММК им. Ильича	598	598	0	0	0	0	0	0
агломерат ЮГОК	153	153	0	0	0	0	0	0
окатыши СевГОК	445	445	953	953	469	0	0	0
окатыши ЦГОК	0	0	0	0	470	1039	948	858
конвертерный шлак	74	74	0	0	0	0	0	0
брикеты из отсева	0	0	23	23	23	23	23	23
железная руда (Украина)	24	24	0	0	0	0	0	0
железная руда (импортная)	0	0	0	0	0	0	160	320
Основность шлака CaO/SiO <sub>2</sub>	1,15	1,15	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12

## Характеристика доменной печи, базового и опытных технологических режимов

Расчеты технологических режимов с применением ПУТ выполнены для доменной печи (ДП) № 3 ПАО «ЕМЗ», введенной в эксплуатацию в 2011 г. Печь имеет 18 воздушных фурм, 2 чугунные летки и рассчитана на работу с дутьем, обогащенным кислородом, с применением ПГ, давлением газа под колошником 1,8 ати, температурой дутья 1200 °С (3 воздухонагревателя Калугина), оснащена для загрузки шихты бесконусным загрузочным устройством фирмы «Поль Вюрт», оборудованном для отсева мелочи 5-0 мм из железорудной шихты, подготовки кокса к плавке с высевом коксового орешка.

Во второй очереди проекта ДП № 3 намечено строительство пылеугольного комплекса по контракту с фирмой Küttner (Германия). В качестве базового периода для расчета приняли показатели работы печи в мае 2012 г.: производительность: 2860 т/сут.;  $Q_{к\text{ скип}} = 464,3$  кг/т;  $Q_{к\text{ ореш}} = 41,7$  кг/т; расход ПГ 43,0 м<sup>3</sup>/т чугуна.

ДП № 3 выплавляет предельный чугун с использованием кокса улучшенного качества («Премиум») ПАО «Авдеевский КХЗ», местного агломерата основностью  $(CaO/SiO_2) = 1,3$ , окатышей СевГОК, магнезиальных ( $MgO = 6,9\%$ ) шлаков, основностью  $(CaO/SiO_2) = 1,15$ .

Для расчетов использовали ПУТ, произведенное из смеси донецких и кузнецких углей марки Т (табл. 1). Выбор оптимальных технологических режимов (табл. 2, 3) расход ПУТ повышен до 230 кг/т с достижением расхода кокса 247,9 кг/т чугуна (снижение 52,3 %)¹. В полной мере повышение расхода ПУТ и

**Таблица 3. Последствия использования компенсирующих мероприятий в технологических режимах с вдуванием ПУТ**

Показатели	База	Технологические режимы						
		Компенсация только ПГ	Полная и комплексная компенсация					
			1	2	3	4	5	6
Оптимальный расход ПУТ, кг/т чугуна	0	45	135	160	185	210	220	230
Расход сырого известняка, г/т чугуна	55	55	46	46	13	0	15	31
Выход шлака, кг/т чугуна	475	477	335	336	304	264	241	219
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	6,6	6,6	4,6	4,7	4,6	4,5	4,4	4,4
Выход горновых газов, м³/т чугуна	1778	1750	1512	1427	1308	1206	1172	1130
Выход восстановительных газов, м³/т чугуна	692	674	584	595	591	589	589	590
Температура колошниковых газов, °С	261	260	256	230	205	182	174	164
Степень использования СО, доли	0,405	0,414	0,48	0,483	0,489	0,499	0,504	0,508
Степень прямого восстановления, доли ед.	0,416	0,419	0,413	0,397	0,381	0,366	0,360	0,355
Теоретическая температура горения, °С	2142	2146	2144	2168	2183	2192	2193	2202

**Таблица 4. Техничко-экономические показатели доменной плавки в технологических режимах с вдуванием ПУТ**

Показатели		База	Технологические режимы						
			Компенсация только ПГ	Полная и комплексная компенсация					
				1	2	3	4	5	6
Производительность	т/сут.	2829	2820	3112	3239	3463	3685	3761	3857
	%	100	99,7	110,0	114,5	122,4	130,2	133,0	136,3
Расход кокса, кг/т чугуна		506,0	475,3	359,8	335,7	302,8	271,2	259,2	247,9
Расход условного топлива, кг/т чугуна		564,1	558,9	503,6	504,5	496,5	489,8	487,8	486,5
Изменение себестоимости чугуна, грн./т чугуна		0,0	-79,9	-197,8	-219,8	-251,0	-253,3	-216,2	-174,9

с применением ПУТ выполнен на основе принципа полной и комплексной компенсации.

В табл. 2 представлены 7 оптимальных технологических режимов с применением ПУТ: в режиме 2 при компенсации только снижением расхода ПГ расход ПУТ составил 45 кг/т чугуна, снижение расхода кокса 30,7 кг/т чугуна, коэффициент замены кокса ПУТ 0,67 кг/кг. В других режимах последовательно на основе внедрения компенсирующих мероприятий

сохранение эффективности его применения обусловлены компенсирующими мероприятиями, обеспечившими сохранение или улучшение, несмотря на снижение доли кокса в шихте, базовых технологических условий, благодаря: снижению выхода шлака, расхода известняка, выхода горновых газов, прихода серы с шихтой, основности шлака ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) = 1,15-1,12, повышению температуры дутья и содержания в нем кислорода. Конкретные компенсирующие мероприя-

## ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

**Таблица 5. Определяющие показатели в оптимальных технологических режимах с вдуванием ПУТ**

Показатели	База	Технологические режимы						
		Компенсация только ПГ	Полная и комплексная компенсация					
			1	2	3	4	5	6
Выход шлака, кг/т кокса*	939	1004	932	1001	1004	972	931	885
Выход горнового газа, м <sup>3</sup> /т кокса*	3515	4038	4679	4252	4320	4449	4520	4559
Содержание мелочи 0-5 мм*	206	219	235	252	277	303	300	297
Скорость газа в распаре, м/с*	10,6	12,6	13,9	19,9	19,2	18,0	17,9	19,7

\* - предельное значение определяющих показателей: выход шлака, кг/т кокса – 1000; выход горновых газов, м<sup>3</sup>/т кокса – 5000; содержание мелочи 0-5 мм в железорудной шихте, кг/т кокса – 400; скорость газа в распаре, м/с – 20

**Таблица 6. Эффективность технологических режимов с полной и комплексной компенсацией**

Показатели	Размерность	Технологические режимы						
		Компенсация только ПГ	Полная и комплексная компенсация					
			1	2	3	4	5	6
Расход ПУТ	кг/т	45	135	160	185	210	220	230
Изменение расхода ПУТ	кг/т	45,0	90	115	140	165	175	185
	%	100	200	256	311	367	389	411
Общее снижение расхода кокса и коксового орешка	кг/т	30,7	146,2	170,3	203,2	234,8	246,8	258,1
<ul style="list-style-type: none"> <li>• в том числе за счет компенсирующих мероприятий</li> <li>• вдувания ПУТ, ПГ и O<sub>2</sub></li> </ul>	кг/т	0	45	45	54,5	63	65,8	68,5
	кг/т	30,7	101,2	125,3	148,7	171,8	181	189,6
Суммарный коэффициент замены кокса, $\sum K_3$	кг/кг		1,08	1,06	1,10	1,12	1,12	1,12
Коэффициент замены кокса ПУТ, ПГ и O <sub>2</sub>	кг/кг	0,68	0,75	0,78	0,80	0,82	0,82	0,82
Снижение расхода условного топлива	кг/т	5,1	60,4	59,5	67,5	74,2	76,2	77,5
	%	100	1184	1167	1324	1455	1494	1520
Изменение производительности печи	т/сут.	-9	283	410	634	856	932	1028
Общее изменение себестоимости чугуна	грн./т	-79,9	-197,8	-219,8	-251,0	-253,3	-216,2	-174,9
	%	100	248	275	314	317	271	219
<ul style="list-style-type: none"> <li>• в том числе за счет компенсирующих мероприятий</li> <li>• вдувания ПУТ, ПГ и O<sub>2</sub></li> </ul>	грн./т	-28,4	+81,8	+81,8	+81,8	+72,4	+92,9	+186,5
	грн./т	-51,5	-279,6	-301,6	-332,8	-325,7	-309,1	-361,4

тия и их роль в реализации опытных режимов представлены в табл. 2, 3.

Все рекомендованные компенсирующие мероприятия обоснованы теоретически и успешно освоены на металлургических предприятиях Украины, их реализация не требует значительных капитальных затрат и времени.

Необходимо детализировать опыт и эффективность подготовки кокса к плавке и применение коксового орешка в смеси с железорудной шихтой [4- 6]. В последние годы и теоретически, и экспериментально

показано, что введение в смеси с железорудной шихтой коксового орешка в количестве до 50-60 % от базового расхода кокса обеспечивает улучшение газопроницаемости шихты на 16-20 %, причем, прежде всего, в определяющей - железорудной линзе шихты; значительную интенсификацию (до 50 %) восстановления оксидов железа углеродом коксового орешка с соответствующим снижением негативного влияния горнового газа на прочность и химсостав скипового кокса. Соответственно улучшается газопроницаемость коксовой линзы шихты [4-7].

### **Эффективность компенсирующих мероприятий и оптимальных технологических режимов**

Из приведенных в табл. 3, 4 данных следует, что качественные изменения в технологии, благодаря

<sup>1</sup> В данном случае и в дальнейшем изложении под термином «расход кокса» понимается расход сухого скипового кокса + коксового орешка

Таблица 7. Параметры доменных печей при работе с высоким удельным расходом ПУТ [8]

Показатели		Доменные печи					
		№ 1 в Како- гава	№ 3 в Фукуяма	№ 2 в Муро- ране	№ 4 фирмы Ijmi- den	№ 1 фирмы Baosteel	№ 3 фирмы Posco
Тип засыпного аппарата		конусный	Конус- ный	«Paul Wurt»	Конус- ный	Конус- ный	«Paul Wurt»
Внутренний объем, м <sup>3</sup>		4550	3223	2296	Нет св.	4063	3795
Удельная производительность т/(м <sup>3</sup> ×сут.)		1,88	1,84	2,18	-	2,2	2,28
Удель- ный расход, кг/т чугуна	Восстановителей	545	554,5	505,4	523	510	493
	Кокса	291	289	314	307	250	271
	ПУТ	254,4	265,5	191,4	216	260,6	222,3
Влажность дутья, г/м <sup>3</sup>		17	32	16,8	8	14	6
Обогащение дутья (свыше 21 %)		4,1	4,8	2,8	8,3	3,2	Нет св.
Температура, °С	Дутья	1233	1220	1262	1258	1251	1138
	Колошникового газа	210	251	-	146	239	2,8
Степень использования газа $\eta_{CO_2}$ , %		49,6	46,5	49,5	47,7	51	Нет св.
Содержание в шихте, %:							
агломерата		43	76,7	87,6	44,1	72,8	83,1
окатышей		35	15,5	0	52,5	11,5	4,9
Содержание в агломерате, %	SiO <sub>2</sub>	5,6	4,21	5,1	3,75	4,56	Нет св.
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,73	1,61	1,89	1,63	1,49	1,5
	FeO	7,4	5,22	5,83	14,64	7,47	6,47
Основность агломерата, CaO/SiO <sub>2</sub>		2,11	2,07	1,77	2,65	1,83	Нет св.
Прочность кокса после взаимодействия с CO <sub>2</sub> , %		Нет св.	Нет св.	62	62,2	Нет св.	67,7
Зольность кокса, %		11,3	11,9	11,5	9,8	11,3	11,4
Средняя крупность кокса, мм		49,7	49,75	44,2	Нет св.	50,8	52,1
Температура чугуна, °С		1496	1501	1514	Нет св.	1501	1516
Содержание в чугуне, %	Si	0,48	0,34	0,66	0,43	0,3	0,4
	S	0,021	0,027	0,015	0,029	0,021	0,017
Выход шлака, кг/т чугуна		265	266	309	199	255	277
Содержание Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в шлаке, %		15,2	13,8	15,9	18,1	14,3	14,3

применению компенсирующих мероприятий, отмечены в следующих наиболее характерных режимах:

1 – введение ПУТ с компенсацией за счет снижения расхода ПГ. Расход и эффективность применения ПУТ минимальны и ограничены высоким выходом шлака.

3 – увеличение расхода ПУТ за счет вывода из состава дутья ПГ, обогащения дутья кислородом, применения высокоосновного агломерата.

5 – в дополнение к режиму 3: замена части окатышей СевГОК и агломерата окатышами ЦГОК, обогащение дутья кислородом;

7 - в дополнение к режиму 5: замена части агломерата и окатышей СевГОК окатышами ЦГОК и импортной железной рудой, обогащение дутья кислородом.

Реализация указанных комплексных мероприятий позволяет снизить выход шлака с 475 до 212 кг/т чугуна (51,5) %, приход серы с шихтой с 6,6 до 4,4 кг/т (33 %), выход горновых газов на 645 м<sup>3</sup>/т (35 %). При этом, в полном соответствии с уровнем определяющих показателей расход, ПУТ может быть увели-

чен от 45 до 230 кг/т чугуна при сохранении высокого уровня оптимальности и стабильности технологии, о чем свидетельствуют значительные снижения температуры колошниковых газов (261-164) °С, степени прямого восстановления оксида железа (0,061 ед., или 15 %), повышение степени использования восстановительного потенциала CO: +0,103 ед., или 25 %. Оптимальность рассматриваемых технологических режимов подтверждается табл. 5, представляющей определяющие показатели по данным режимам.

Из табл. 4 следует, что при использовании имеющейся в распоряжении ПАО «ЕМЗ» железорудной шихты (окатыши СевГОК) оптимальный расход ПУТ равен 160 кг/т чугуна (режимы 3, табл. 3, 4, 5), которые обеспечивают снижение расхода кокса на 170,3 кг/т (33,5 %), вывод из состава дутья ПГ (43,0 м<sup>3</sup>/т), снижение расхода условного топлива 59,5 кг/т (10,56 %), прирост производительности печи на 14,5 %, снижение себестоимость чугуна на 219 грн./т чугуна. Дальнейшее повышение эффективности применения ПУТ сдерживается в основном высокими выходами шлака (336 кг/т чугуна) и горновых газов

(1427 м<sup>3</sup>/т чугуна).

Режим 5 (табл. 3, 4) является пока гипотетическим ввиду отсутствия возможности улучшения шихтовых условий за счет замены окатышей СевГОК на окатыши ЦГОК. В данном случае, благодаря снижению выхода шлака (257,5 кг/т чугуна) и горновых газов (1206 м<sup>3</sup>/т чугуна), расход ПУТ увеличивается до 210 кг/т чугуна, что позволяет достигнуть максимального снижения себестоимости чугуна (-253,3 грн./т). При этом расход кокса снижается до 271,1 кг/т чугуна (45,4 %), а расход условного топлива до 489,8 кг/т, при росте производительности печи 30,2 %.

Аналогичный эффект оказывает дальнейшее обогащение шихты ( $Q_{\text{шлака}} - 222$  кг/т), которое может быть получено благодаря дальнейшему увеличению расхода окатышей ЦГОК и введению импортной железной руды в гипотетическом режиме 7 (табл. 4).

Прирост производства составляет в данном режиме 36,6 % а уровень расхода кокса и коксового орешка 247,2 кг/т чугуна (-52,5 %).

При этом себестоимость чугуна сокращается всего на 78,4 грн./т (30,95 %), прежде всего, из-за высокой стоимости импортной железной руды.

Смысл расчета режимов 4-7 – в подтверждении ресурсов ПУТ – технологии, возможности достижения высоких расходов ПУТ и улучшения ТЭП плавки на основе режима полной и комплексной компенсации.

#### **Эффективность полной и комплексной компенсации**

Результаты анализа представлены в табл. 4 и 6. При обработке данных приняли, что компенсирующими «в чистом виде» являются мероприятия, обеспечивающие снижение расхода кокса и известняка, выхода шлака и горновых газов и т.д., но не являющиеся дополнительными топливами или интенсификаторами его горения.

Поэтому ко второй группе мероприятий отнесены основное дополнительное топливо ПУТ, а также ПГ и O<sub>2</sub>, не являющиеся таковыми, но обеспечивающими газификацию и эффективность использования ПУТ в доменной печи.

Из табл. 6 следует, что во всех рассмотренных технологических режимах суммарный  $\sum K_3$  – коэффициент замены кокса ПУТ превышает 1 -1,08-1,12 кг/кг, что является основным признаком наличия полной и комплексной компенсации; соответственно коэффициент замены кокса ПУТ менее 1 (0,68-0,82), что объясняется его более низкой температурой по сравнению с коксом, поступающим в фурменные зоны.

Расчетом подтверждена благоприятная роль компенсации в реализации технологического и экономического потенциала ПУТ-технологии (табл. 6). Так, по мере реализации данных мероприятий расход ПУТ по сравнению с базовым режимом 1 повышается последовательно до 230 кг/т чугуна, т.е. в 5,1 раза. Соответственно снижение расхода кокса составляет от 30,0 до 258,1 кг/т, в том числе собственно за счет дувания ПУТ на 189,6 кг/т.

Аналогичны снижение расхода условного топли-

ва 77,5 кг/т, прирост производительности печи 1028 т/сут. (36,3 %).

Характерными являются цифры экономии кокса за счет мер компенсации и, соответственно, – расхода дополнительного топлива. Из табл. 6 следует, что дополнительная компенсация в количестве от 0 до 68,5 кг/т чугуна обеспечила экономию кокса за счет прироста расхода ПУТ от 30,7 до 189,6 кг/т, т.е. в среднем 1 кг экономии кокса за счет компенсации способствовал снижению расхода кокса за счет прироста расхода ПУТ на 3,11 кг/кг.

Единственный показатель, по которому линейный прирост эффективности по мере компенсации был нарушен – это себестоимость чугуна. Из табл. 6 следует, что максимальное снижение себестоимости чугуна получено в 5-м периоде: снижение показателя по сравнению с 1-м периодом составляет 253,3 грн./т (3,17 раза).

В дальнейшем (режимы 6 и 7) дают снижение экономической эффективности применения ПУТ, при том, что эффективность применения самого ПУТ сохраняется высокой или максимальной (309,1–361,4) грн./т чугуна.

Снижение экономической эффективности применения ПУТ происходит за счет прироста стоимости компенсирующих мероприятий, в частности, в режимах 5 и 7 – за счет повышения стоимости импортной железной руды.

#### **Зарубежный промышленный опыт**

Реальность предлагаемых технологических режимов подтверждается зарубежным опытом.

Из табл. 7 следует, что в лучших образцах зарубежной практики доменные печи объемом 1963–4550 м<sup>3</sup> имеют расход ПУТ на 1 т чугуна до 265,5 кг, расход скипового кокса до 250,0 кг/т чугуна. Производительность доменных печей составила 1,84–2,28 т/м<sup>3</sup> сут., а доля замены кокса ПУТ составила 40-45 % [8]. Повысилась оптимальность и устойчивость режимов: температура колошниковых газов снизилась до 145-250 °С, степень использования восстановительного потенциала CO ( $\eta_{\text{CO}}$ ) повысилась до 0,47-0,51; вынос колошниковой пыли снизился до 10 кг/т чугуна. При этом все определяющие показатели ниже критического уровня, что свидетельствует о технологичности и оптимальности рассматриваемых режимов.

#### **Выводы**

1. На основе принципа полной и комплексной компенсации выполнен расчет технологических режимов с применением ПУТ (от 0 до 230 кг/т) для ДП № 3 ПАО «ЕМЗ».

2. В качестве компенсирующих мероприятий использовали: улучшение качества железорудной шихты, вывод из состава шихты конверторного шлака, повышение основности агломерата от 1,3 до 2,0.; применение железорудных материалов с повышенным содержанием железа, в т.ч. окатышей ЦГОК, импортной железной руды; кокса улучшенного качества «Премиум», повышение параметров комбинированного дутья ( $t_{\text{дутья}} = 1200$  °С; O<sub>2</sub> = 30,0 %; P<sub>кол.</sub> = 1,8 ати).

3. Реализация ПУТ-технологии в сложившихся шихтово-технологических условиях ДП № 3 ПАО «ЕМЗ» может обеспечить вдувание на 1 т чугуна 160 кг ПУТ, вывод из состава дутья ПГ (43,0 м<sup>3</sup>/т), снижение расхода кокса на 170 кг/т (33,5 %), условного топлива на 59,5 кг/т (10,5 %), себестоимости чугуна на 219,8 грн./т, прирост производительности печи на 14,5 %. Дальнейшее повышение расхода ПУТ сдерживается повышенными выходами шлака (336 кг/т) и горнового газа (1427 м<sup>3</sup>/т чугуна).

4. Теоретические соображения, современный промышленный опыт подтверждают, что на основе данного принципа и при наличии соответствующих компенсирующих мероприятий реальной становится возможность замены до 60-80 % скипового кокса дополнительным топливом, что может обеспечить снижение расхода кокса до 200-300 кг/т чугуна.

5. Реальность предлагаемых технологических режимов подтверждается зарубежным опытом.

#### Библиографический список

1. Ярошевский С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. - М.: Metallurgia, 1988. - 176 с.

2. Ярошевский С.Л. Перспективность и эффективность доменной технологии определяется степенью замены кокса пылеугольным топливом. Доклад на конф. «Пылеугольное топливо – альтернатива при-

родному газу при выплавке чугуна» // Донецк, 18-21 декабря 2006 г. – Донецк: Норд компьютер, 2007. – 21 с.

3. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. – Metallurgia, 1980. – 304 с.

4. Теория и практика подготовки металлургического кокса к доменной плавке: Монография / В.Г. Гусак, А.М. Кузнецов, А.В. Емченко и др. – К.: Наукова думка, 2011. – 216 с.

5. Теоретические и экспериментальные основы подготовки кокса к доменной плавке / А.Л. Подкорытов, А.М. Кузнецов, Е.Н. Дымченко и др. // Metallurg. – 2009. – № 6. – С. 34-37.

6. Технология и эффективность подготовки кокса к доменной плавке / А.Л. Подкорытов, А.М. Кузнецов, Е.Н. Дымченко и др. // Metallurg. – 2009. – № 8. – С. 32-37.

7. Опыты по применению кокса различной крупности в доменных печах / В. Айзенхут, К. Энгель, В. Крафт и др. // Черные металлы. - 1979. - № 2. - С. 25-30.

8. Доменное производство Японии в новом столетии. Исследования и технические разработки / Новости черной металлургии за рубежом. - 2007. - № 4. - С. 22-31.

**Поступила 29.11.2012**



### Уважаемые читатели!

Уже сегодня можно оформить подписку изданий  
ООО «Укрметаллургинформ «НТА» на второе полугодие 2013 г.:

Индекс: 74311

- журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность» на русском языке;

Индекс: 49501

- журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность» на русском языке, CD-ROM;

Индекс: 49502

- журнал “Metallurgical and mining industry” на английском языке.

через каталог «Изданий Украины», каталог России «Газеты. Журналы»  
и через редакцию журнала.

Редакция:

ул. Дзержинского, 23, г. Днепропетровск, Украина, 49027,  
к/т 056-744-81-66; т/ф 0562-46-12-95.