

УДК 669.162.1

ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ВДУВАНИЕМ В ГОРН ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ЧАО «ЕНАКИЕВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»¹

Подкорытов Александр Леонидович; Кузнецов Александр Михайлович, канд. техн. наук; Зубенко Александр Вячеславович; Падалка Владимир Павлович, канд. техн. наук; Ярошевский Станислав Львович*, докт. техн. наук; Кочура Владимир Васильевич, канд. техн. наук *

(ЧАО «Енакиевский металлургический завод», *ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»)

Основой экономики металлургии чугуна является снижение расхода твердого топлива – кокса. За последние 200 лет расход твердого топлива снизился в 8-10 раз до 250-350 кг/т чугуна. Соответственно, производительности доменных печей повысились до 2,5-3,5 т/(м³·сут). Основой данной динамики является принцип полной и комплексной компенсации нарушений газодинамики, условий горения кокса, восстановления оксидов, нагрева шихты и др., определяемых снижением расхода кокса за счет внедрения мероприятий, компенсирующих указанные нарушения: повышение температуры дутья, снижение выхода шлака, улучшение качества шихтовых материалов и др. [1-5].

Одним из наиболее эффективных мероприятий по повышению эффективности доменной плавки является использование пылеугольного топлива (ПУТ). В настоящее время с применением ПУТ выплавляется около 1 млрд. т чугуна в год более чем в 30 странах мира [1-5].

В Украине первый промышленный ПУТ – комплекс введен в эксплуатацию в 1980 г. на Донецком металлургическом заводе. А в настоящее время практически все основные металлургические предприятия оснащены пылеугольными установками.

¹ В работе принимали участие сотрудники ЧАО «ЕМЗ» – Хайбулаев А.С., мастера и газовщики ДП № 3и№5 и ДонНТУ – Сидоренко Г.Н., Афанасьева З.К.

Технологические и шихтовые условия доменной плавки

Енакиевский металлургический завод (ЧАО «ЕМЗ») имеет благоприятные предпосылки для высокоэффективного использования ПУТ: современные доменные печи объемом 1513 и 1719 м³, аглофабрика, склад окатышей и кокса (СОК), предусматривающий подготовку основных шихтовых материалов к плавке, воздухонагреватели Калугина с температурой дутья до 1250 °С, лотковое загрузочное устройство на ДП-3 и другое. Для реализации ПУТ-технологии фирмой Kuttner построена современная ПУТ-установка, введенная в эксплуатацию в 1-м квартале 2016г.

Используемые шихтовые материалы: свой агломерат и окатыши СевГОК с отсевом мелочи (0-5 мм), кокс Авдеевского, Енакиевского и Макеевского КХЗ, в основном КДМ-1 (горячая прочность CSR- 50% и выше), а также КДМ-2 (табл. 1,2).

Таблица 1 – Показатели качества железорудной шихты в 2016г., %

Значение	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	P	C	S	п.п.п.	Fe
Агломерат ЧАО «ЕМЗ»											
Среднее	9,02	1,89	55,03	16,39	1,66	14,83	0,04	0,66	0,09	0,16	50,04
min	8,00	1,66	52,37	10,69	1,20	11,18	0,03	0,43	0,06	- 1,24	45,43
max	10,81	1,98	60,49	20,89	1,94	21,96	0,05	0,88	0,11	1,77	53,80
Агломерата ЮГОК											
Среднее	8,02	1,29	64,66	12,63	0,672	12,90	0,032	0,378	0,052	0,39	55,34
min	7,88	1,2	63,02	9,15	0,53	11,84	0,027	0,24	0,043	0,04	54,16
max	8,2	1,36	66,57	14,26	0,76	14,62	0,037	0,63	0,064	1,13	57,96
Окатыши СевГОК (март – октябрь 2016г.)											
Значение	Fe	SiO ₂	CaO	MgO	Основность CaO/SiO ₂	Фракция 5-0 мм, %	Прочность, кг/окатыш				
Среднее	63,35	8,06	0,65	0,50	0,14	4,04	246				
min	62,04	7,66	0,29	0,47	0,10	3,89	230				
max	63,84	8,41	2,98	0,55	0,46	4,66	259				

Таблица 2 - Показатели качества кокса различных поставщиков в 2016г.

Поставщик	Данные поставщика, %							
	W ^p	A ^c	S	ЛВ	M ₂₅	M ₁₀	+80	<25
ПАО «АКХЗ» (КДМ-1)	2,6	10,9	0,8	0,4	88,8	7,1	9,0	2,3
ЧАО «ЕКХП» (КДМ-1)	3,1	11,3	0,8	0,8	88,6	6,9	10,6	2,9
ЧАО «ЕКХП» (КДМ-2)	3,3	11,5	0,9	0,8	88,5	7,0	11,1	3,1
ЧАО «Макеевкокс» (КД-2)	4,6	10,4	1,1	0,3	87,3	7,8	7,7	3,7

Для производства ПУТ поставлялся Кузнецкий слабоспекающийся уголь марки СС (0-50 мм), вполне отвечающий требованиям указанной технологии (табл. 3).

Таблица 3 - Характеристики угля марки СС (0-50 мм) в марте-июле 2016г.

Значение	A ^c , %	W ^p , %	S, %	ЛВ, %
Среднее	7,04	6,87	0,19	20,71
min	6,14	6,37	0,17	20,06
max	7,57	7,24	0,21	21,31

Доменный цех выплавлял передельный чугун с применением природного газа (ПГ) и кислорода.

Основные положения теории и практики компенсации негативных изменений в технологии, определяемых горением дополнительного топлива и снижением доли кокса в шихте

Горение ПУТ и замена им кокса неизбежно сопровождаются неблагоприятным изменением определяющих параметров плавки: сокращением доли кокса в шихте, ухудшением ее порозности и газопроницаемости, снижением температуры горения в фурменной зоне, содержания кислорода в горновом газе по длине фурменной зоны и т.д. Поэтому одновременно с увеличением расхода топлива необходимо применять соответствующие изменения, т.н. «компенсирующие мероприятия», которые должны нейтрализовать негативное влияние ПУТ на технологический режим [6-9].

При оценке комплекса технологических условий, определяющих эффективность применения ПУТ, для характеристики теплового режима

горна приняли полученное из уравнения теплового баланса для нижней зоны теплообмена уравнение необходимой теоретической температуры горения (индекс «0» для исходных, индекс «1» для новых технологических условий) [3]:

$$t_1 = t_n + \left(1 - 0,7 \cdot \frac{r_{d_0} - r_{d_1}}{r_{d_0}} \right) \cdot \frac{K_0}{K_1} \cdot \frac{V_0}{V_1} \cdot (t_0 - t_n), \quad (1)$$

где t_0 и t_1 – необходимая теоретическая температура горения при которой обеспечивается сохранение базовой температуры продуктов плавки, С; r_{d_0} и r_{d_1} – степень прямого восстановления, в долях единицы; V_0 и V_1 – выход горновых газов, м³/т кокса; K_0 и K_1 – расход кокса, кг/т чугуна; t_n – температура в зоне замедленного теплообмена, °С.

Для характеристики газодинамического режима использовали уравнение [10]:

$$P_1 = P_0 \cdot \frac{V_{r_0}}{V_{r_1}} \cdot \left(\frac{\gamma_0 \cdot \Theta_0 \cdot d_0}{\gamma_1 \cdot \Theta_1 \cdot d_1} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где P_1 и P_0 – производительность доменной печи, %; V_{r_0} и V_{r_1} – выход газов, м³/т чугуна; Θ_0 и Θ_1 – средняя температура газов, °К; γ_0 и γ_1 – средняя плотность газов, кг/м³; d_0 и d_1 – показатель газопроницаемости шихты, %.

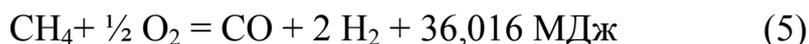
Ход восстановительных процессов, время сгорания ПУТ в фурменных зонах и производительность печи, оценивали по методикам Китаева Б.И. и Бабя В.И. [11, 12].

Для оценки эффективности компенсирующих мероприятий использовали понятие суммарного коэффициента замены (ΣK_3) кокса дополнительным топливом [2, 6]:

$$\Sigma K_3 = \frac{\Delta Q_{KKM} + \Delta Q_{KDT}}{\Delta Q_{DT}}, \quad (3)$$

где ΔQ_{KKM} и ΔQ_{KDT} – экономия кокса за счет компенсирующих мероприятий и повышения расхода дополнительного топлива, кг; ΔQ_{DT} – прирост расхода дополнительного топлива, кг.

Расчеты показывают, что при величине ΣK_3 равной или близкой 1, технологический режим обеспечен полной и комплексной компенсацией. Одним из основных компенсирующих мероприятий может быть снижение расхода ПГ. Это следует из реакций горения в фурменной зоне углерода (С) и метана (СН₄)



Количество тепла на единицу получаемого восстановительного газа по реакции (5) в 9 раз ниже, чем по реакции (4), а выход восстановительного газа в 3 раза выше. Соответственно, снижение теоретической температуры горения на единицу вдуваемого ПУТ – в 2,5-3 раза меньше, чем при вдувании ПГ.

Расчеты показывают, что ΣK_3 , обеспечивающий полную и комплексную компенсацию, для ПГ – в 2-3 раза выше, чем для ПУТ.

Повышению ΣK_3 будут способствовать снижение на 1 т чугуна расхода известняка и выхода шлака, повышение температуры дутья, улучшение прочности и фракционного состава железорудной шихты, качества кокса, ПУТ и другие мероприятия.

Методика расчета

Методика расчета показателей доменной плавки с применением ПУТ разработана на основе работ профессора Ленинградского политехнического института А.Н. Рамма [10].

Сущность метода заключается в определении расхода кокса по тепловым эквивалентам шихтовых материалов и дутьевым параметрам: температуре, влажности, содержанию дополнительного кислорода и расходам различных углеводородсодержащих добавок, вдуваемых в фурму доменной печи.

Для оценки возможности реализации расчетных технологических режимов предложены определяющие параметры [4].

Показано, что при достигнутых уровне качества кокса, железорудного сырья, параметрах температурно-дутьевого режима, в диапазоне расхода кокса от 250 до 600 кг/т чугуна маловероятна возможность превышения скорости газа в распаре – 20 м/с, рудной нагрузки – 6,0 т/т кокса, выхода горнового газа – 4,5 тыс. м³/т кокса, выхода шлака – 1100 кг/ т кокса (рис. 1).

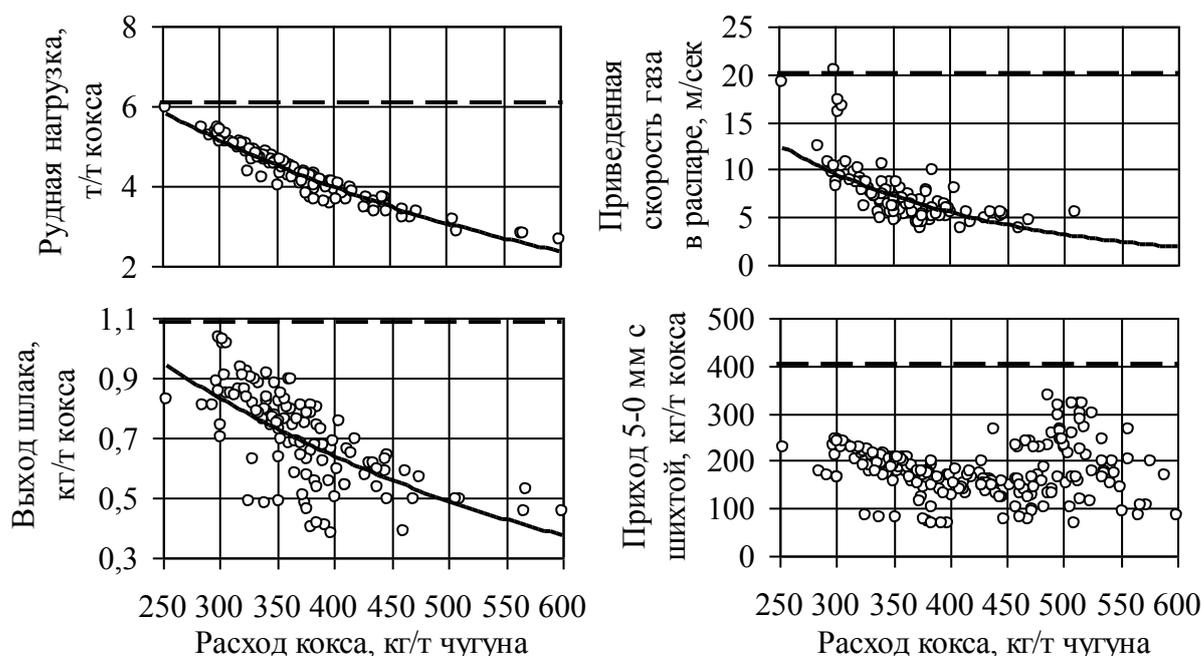


Рисунок 1 - Зависимости определяющих показателей от удельного расхода кокса (прерывистая линия - предельное значение показателя)

Указанные значения определяющих параметров рассматривались нами как граничные, предельные, разделяющие области реально достижимых и маловероятных расчетных режимов доменной плавки с применением ПУТ.

Расчет технологических режимов с применением ПУТ

Расчеты эффективности применения ПУТ выполнены для доменных печей ЧАО «ЕМЗ».

В частности рассчитаны технологические режимы для ДП-5 с вдуванием различных расходов ПУТ: 30, 60, 90, 120 и 150 кг/т чугуна в 2-х вариантах: без природного газа (табл. 4) и с природным газом (табл.5), который вдувался сопутно с ПУТ. В качестве базового периода принята работа ДП-5 в январе-феврале 2016г. В качестве компенсирующих

мероприятий использованы: повышение температуры дутья до 1100 °С, содержания кислорода в дутье до 23,5%, вывод из состава дутья природного газа, снижение основности шлака (CaO/SiO_2) до 1,1 и выхода шлака. Для приготовления ПУТ использован Кузнецкий слабоспекающийся уголь марки СС.

При вдувании ПУТ до 150 кг/т чугуна расход кокса снижался линейно от 564 до 357 и 336 кг/т чугуна, соответственно, без ПГ и с ПГ (20 м³/т чугуна). При этом суммарный коэффициент замены кокса составил 1,38 и 1,52 кг/кг. Коэффициент замены кокса ПУТ при вычете эффективности компенсирующих мероприятий снизился и составил 1,13 и 1,17 кг/кг. Высокое значение коэффициента замены объясняется, прежде всего, высоким качеством ПУТ ($S=0,2\%$, $A=7,5\%$).

Таблица 4 - Расчет эффективности вдувания ПУТ для условий ПАО "ЕМЗ" (без ПГ)

Наименование	База	Повышение температуры дутья до 1100 °С	Кислород в дутье 21 %	Снижение основности шлака	Вдувание ПУТ				
					30	60	90	120	150
Варианты	1	2	3	5	6	7	8	9	10
<i>Производительность, %</i>	<i>100,0</i>	<i>105,9</i>	<i>108,6</i>	<i>109,7</i>	<i>109,5</i>	<i>109,1</i>	<i>110,0</i>	<i>112,1</i>	<i>113,9</i>
<i>Кокс сухой скиповой, кг/т чугуна</i>	<i>564,2</i>	<i>523,6</i>	<i>525,3</i>	<i>521,2</i>	<i>486,4</i>	<i>452,4</i>	<i>419,7</i>	<i>388,2</i>	<i>357,1</i>
<i>Коксовый орешек, кг/т чугуна</i>	<i>34,6</i>	<i>34,6</i>	<i>34,6</i>	<i>34,6</i>	<i>34,6</i>	<i>34,6</i>	<i>34,6</i>	<i>34,6</i>	<i>34,6</i>
<i>Сумма кокса и коксового орешка, кг/т чугуна</i>	<i>598,8</i>	<i>558,2</i>	<i>559,9</i>	<i>555,8</i>	<i>521,0</i>	<i>487,0</i>	<i>454,3</i>	<i>422,8</i>	<i>391,7</i>
Известняк обычный, кг/т чугуна	76	72	72	54	52	50	48	76	76
Расход сухого дутья, м ³ /т чугуна	1552	1378	1317	1301	1288	1276	1237	1176	1120
Температура дутья, °С	906	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ПУТ, кг/т чугуна	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	60,0	90,0	120,0	150,0
Содержание кислорода в дутье, %	20,0	20,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,5	22,5	23,5
Выход сухого колошникового газа, м ³ /т чугуна	2154	1947	1887	1868	1848	1831	1788	1725	1668
Температура колошникового газа, °С	240	218	202	202	209	216	215	207	200
СО ₂ в колошниковом газе, %	16,12	16,50	17,02	17,02	17,40	17,71	18,26	19,02	19,74
Степень использования СО, доли	0,371	0,368	0,367	0,371	0,383	0,394	0,404	0,412	0,419
Степень прямого восстановления, доли	0,537	0,554	0,554	0,554	0,518	0,492	0,474	0,451	0,422
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна	1893	1681	1620	1600	1604	1608	1586	1542	1503
Выход восстановительных газов, м ³ /т чугуна	652	579	580	573	586	599	614	629	644
Выход шлака, кг/т чугуна	416	409	409	398	395	392	390	387	385
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	6,5	6,1	6,1	6,1	5,8	5,6	5,4	6,5	6,5
Основность СаО/SiO ₂	1,16	1,16	1,16	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Химсостав чугуна, % [S]	0,061	0,063	0,064	0,065	0,065	0,650	0,650	0,650	0,065
Теоретическая температура горения, °С	2130	2311	2289	2289	2245	2202	2186	2174	2155
Расход условного топлива, кг/т чугуна	601,58	560,77	562,54	564,78	559,73	555,48	552,61	550,92	549,74

Продолжение табл. 4

Варианты	1	2	3	5	6	7	8	9	10
Энергозатраты: К+КО+ПУТ+ПГ+Д+О ₂ , грн/т чугуна	2443,66	2263,73	2257,41	2239,5 2	2188,7 0	2140,8 7	2104,3 5	2077,7 5	2051,8
Изменение энергозатрат, %	0,00	-7,36	-7,62	-8,35	-10,43	-12,39	-13,89	-14,97	-16,04
Определяющие показатели:									
Рудная нагрузка, т/т кокса	2,92	3,14	3,13	3,15	3,36	3,59	3,85	4,14	4,47
Выход шлака, кг/т кокса	695	732	730	717	759	806	858	916	982
Выход горнового газа, м ³ /т кокса	3161	3488	3370	3361	3078	3303	3491	3647	3836
Приход мелочи (0-5 мм) с шихтой, кг/т кокса	144	155	154	155	166	177	190	204	220
Скорость газа в распаре, м/с	8,36	8,64	8,49	8,42	9,14	10,14	11,54	13,55	16,91

Таблица 5 - Расчет эффективности дувания ПУТ для условий ПАО "ЕМЗ" (с ПГ)

Наименование	База	ПОВЫШЕНИЕ температуры дутия по 1100 °С	Кислород в дутие 21 %	Вдувание ПГ	Снижение основности шлака	Вдувание ПУТ				
						30	60	90	120	150
Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Производительность, %	100,0	105,9	108,6	108,5	109,6	109,2	108,6	109,3	111,3	113,0
Кокс сухой скиповой, кг/т чугуна	564,2	523,6	525,3	498,9	494,8	461,4	428,7	397,1	366,5	336,3
Коксовый орешек, кг/т чугуна	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6
Сумма кокса и коксового орешка, кг/т чугуна	598,8	558,2	559,9	533,5	529,4	496,0	463,3	431,7	401,1	370,9
Агломерат ЕМЗ, кг/т чугуна	634	634	634	634	634	634	634	634	634	634
Окатыши СевГОК, кг/т чугуна	1038	1038	1038	1038	1038	1038	1038	1038	1038	1038
Конвертерный шлак, кг/т чугуна	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Мп-содерж.брикеты	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Известняк обычный, кг/т чугуна	76	72	72	69	51	48	49	46	44	43
Содержание мелочи в шихте, %	4,93	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Расход сухого дутья, м ³ /т чугуна	1552	1378	1392	1309	1241	1231	1222	1185	1125	1070
Температура дутья, °С	906	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	0,0	0,0	0,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
ПУТ, кг/т чугуна	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	60,0	90,0	120,0	150,0
Содержание кислорода в дутье, %	20,0	20,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,5	22,5	23,5
Выход сухого колошникового газа, м ³ /т чугуна	2154	1947	1887	1880	1808	1794	1783	1745	1684	1630
Температура колошникового газа, °С	240	218	202	215	215	222	228	227	218	210
СО ₂ в колошниковом газе, %	16,12	16,50	17,02	17,20	17,20	17,46	17,68	18,13	18,81	19,45
Степень использования СО, доли	0,371	0,368	0,367	0,382	0,386	0,395	0,404	0,399	0,406	0,411
Суммарный расход дутья, м ³ /кг С фурм	4,5523	4,5523	4,3406	4,5068	4,5163	4,8940	5,3477	5,7697	6,1696	6,7165
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна	1893	1681	1712	1651	1567	1575	1583	1563	1519	1481

Продолжение табл. 5

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Выход восстановительных газов, м ³ /т чугуна	652	579	613	617	587	602	617	631	646	660
Выход шлака, кг/т чугуна	416	409	409	404	394	391	388	386	383	381
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	6,5	6,1	6,1	5,9	5,9	5,6	5,4	5,2	4,9	4,7
Основность СаО/SiO ₂	1,16	1,16	1,16	1,16	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Химсостав чугуна, % [S]	0,061	0,063	0,064	0,064	0,065	0,065	0,064	0,063	0,062	0,061
Теоретическая температура горения, °С	2130	2311	2289	2210	2210	2174	2140	2116	2116	2103
Расход условного топлива, кг/т чугуна	601,58	560,77	562,54	559,71	561,66	558,07	555,21	553,44	552,63	552,30
Энергозатраты: К+КО+ПУТ+ПГ+Дутье+О ₂ , грн/т чугуна	2443,6 6	2263,7 3	2272,8 6	2288,0 3	2259,5 1	2214,4 1	2172,0 5	2139,2 9	2114,9 4	2091,2 0
Изменение энергозатрат, %	0,00	-7,36	-6,99	-6,37	-7,54	-9,38	-11,11	-12,46	-13,45	-14,42
Определяющие показатели:										
Рудная нагрузка, т/т кокса	2,92	3,14	3,13	3,28	3,31	3,53	3,78	4,05	4,36	4,72
Выход шлака, кг/т кокса	695	732	730	758	744	788	838	894	956	1028
Выход горнового газа, м ³ /т кокса	3161	3488	3370	3524	3415	3174	3416	3620	3788	3993
Приход мелочи (0-5 мм) с шихтой, кг/т кокса	144	155	154	162	163	174	186	200	215	233
Скорость газа в распаре, м/с	8,36	8,64	8,98	9,05	8,62	9,49	10,68	12,35	14,95	19,98

Производительность печи при исключении влияния компенсирующих мероприятий составила, соответственно, 99,2 и 96,4 % без ПГ и с ПГ.

Выполнен расчет расхода энергозатрат на 1 т чугуна при различном составе комбинированного дутья: кокс, коксовый орешек, ПУТ, ПГ, содержание кислорода в дутье, расход дутья (рис.2).

Из рис. 2 видно, что замена кокса дополнительным топливом благоприятно сказывается на снижении себестоимости чугуна. В частности, в вариантах с вдуванием ПГ получены худшие показатели снижения энергозатрат на 25 - 40 грн/т чугуна.

При рекомендуемом расходе ПУТ 120-140 кг/т чугуна без вдувания ПГ стоимость энергозатрат снижается на 366-384 грн/т чугуна.

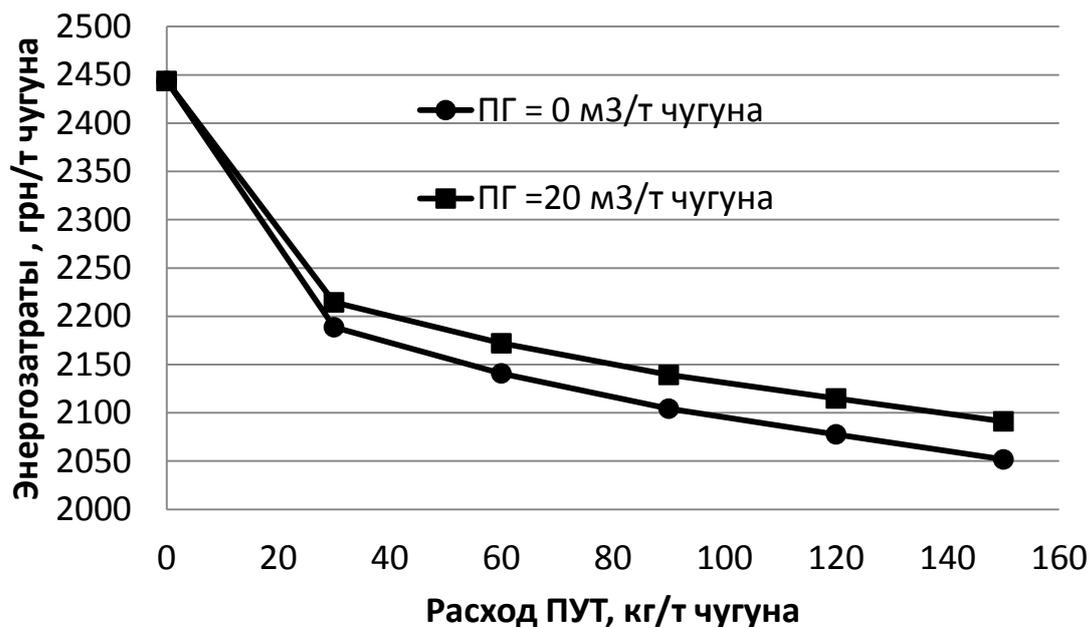


Рисунок 2 – Изменение энергозатрат при вдувании ПУТ

Для оценки возможности реализации расчетных технологических режимов рассчитаны определяющие параметры (табл. 4,5), значения которых не превышают предельно-допустимого их уровня [4].

На основании выполненных расчетов рекомендуется оптимальный расход ПУТ 120-140 кг/т чугуна.

Результаты промышленного внедрения ПУТ технологии

Освоение ПУТ-технологии начато с марта 2016г. на ДП-5 и с 20 апреля 2016 г. на ДП-3. Освоение технологии проходило в неблагоприятных шихтово-технологических условиях из-за нерегулярных поставок, прежде всего, железорудных материалов (окатышей СевГОК), изменения качества кокса (марки и КХЗ-поставщики).

На ДП-5 освоена технология с вдуванием в горн пылеугольного топлива совместно с природным газом (ПУТ+ПГ) и пылеугольного топлива (ПУТ). В табл. 6 приведены результаты работы ДП-5.

Из сопоставления базового и опытных периодов следует, что вдувание в горн ПУТ в 1-м и 2-м периодах 127,8 (+21 м³ ПГ) и 122,1 кг/т чугуна обеспечило снижение расхода кокса, соответственно, на 123,5 и 124,2 кг/т чугуна (22%). При этом производительность печи повысилась в исследуемых периодах на 404,1 т/сут (15,6%) и 301,2 т/сут (11,6%).

Суммарный коэффициент замены кокса составил 0,97 и 1,02 кг/кг. За исключением влияния компенсирующих мероприятий и ПГ коэффициент замены кокса ПУТ составил в 1-м и 2-м периодах 0,63 и 0,76 кг/кг. Основной причиной указанного расхождения является крайне низкий показатель использования восстановительного потенциала горновых газов (η_{CO}) 35; 35,35 и 35,19 %, а содержание CO₂ в колошниковом газе 13,2; 13,5 и 13,9 % в базовом и опытных периодах) (табл. 6).

Аналогичные результаты получены при сопоставлении базового и опытных периодов работы на ДП-3 (табл.7).

ДП-3 в базовом периоде работала с вдуванием ПГ, температурой дутья 1100 °С и содержанием кислорода в дутье 22,67 %. Поэтому ресурсы компенсирующих мероприятий были значительно ограничены и компенсировались выводом из состава дутья природного газа. Применение ПУТ в 1-м опытном периоде позволило при практически неизменной производительности печи снизить расход кокса на 41,2 кг/ т чугуна (8,66 %) и ПГ на 58,3 м³/ т чугуна.

Таблица 6 - Показатели работы ДП-5 ЧАО «ЕМЗ» в 2016г.

Показатели	Периоды		
	январь- февраль 2016 (базовый)	20.03- 21.04.2016 (1-й опытный)	11- 31.07.2016 (2-й опытный)
Технологические показатели:			
Производительность т/сутки	2595,5	2999,6	2896,7
Удельная производительность, т/(м ³ сут)	1,715	1,983	1,915
Расход топлива, кг(м ³)/т чугуна:			
кокс	564,2	440,7	440,0
кокосый орешек	34,6	34,1	34,1
ПУТ	0	127,8	122,1
ПГ	0	21,0	0
Расход сухих материалов, кг/т чугуна:			
агломерат ЕМЗ	634,1	571,8	689,8
агломерат ЮГОК	0	0	165,7
окатыши СевГОК	1038,3	1050,1	788,5
известняк	75,9	55,2	43,6
конвертерный шлак	60,1	95,1	66,2
Дутье: расход, м ³ /т чугуна	1552	1535	1384
содержание кислорода, %	20,0	23,0	22,8
температура, °С	906	1100	1100
давление, атм	2,495	2,555	2,61
Степень использования СО, %	35,0	35,35	35,19
СО ₂ в колошниковом газе, %	13,2	13,5	13,9
Содержание в чугуне, % : Si	0,55	0,67	0,64
S*	0,061	0,070	0,083
Выход шлака, кг/т чугуна	430,5	393	390,3
Основность шлака, СаО/SiO ₂	1,16	1,09	1,08
Содержание MgO в шлаке, %	5,48	5,72	5,11
Расчетные показатели:			
Объемная доля кокса в шихте, %	56,2	51,8	51,7
Теоретическая температура, °С	2102	2132	2192
Расход углерода, дошедшего до фурм, кг/т чугуна	340,8	284,6	259,6
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна	1932	2049	1809
Выход восстановительных газов, м ³ /т чугуна	651,68	862,11	736,36
Степень прямого восстановления, %	53,65	27,44	35,52
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	6,59	5,874	6,03
Расход условного топлива, кг/т чугуна	607,68	634,0	602,0
К.п.д. использования тепла печи, %	85,08	76,26	80,99
Выход колошникового газа, м ³ /т чугуна	2154	2131	1953
Определяющие показатели:			
Рудная нагрузка, т/т кокса	2,92	3,67	3,61
Выход шлака, кг/т кокса	763	892	833
Выход горнового газа, м ³ /т кокса	3355	4649	4120
Приход мелочи с шихтой, кг/т кокса	179	201,4	207,2
Скорость газа в распаре, м/с	8,36	13,36	11,11

* Чугун подвергается внедоменной десульфурации в кислородно-конвертерном цехе

Таблица 7 - Показатели работы ДП-3 ЧАО «ЕМЗ» в 2016г.

Показатели	Периоды		
	16.03- 21.04.2016 6 (базовый)	10- 31.07.2016 (1-й опытный)	3.10- 15.11.2016 (2-й опытный)
Технологические показатели:			
Производительность т/сутки	3142,7	3176,6	3512,77
Удельная производительность, т/(м ³ сут)	1,828	1,848	2,04
Расход топлива, кг(м ³)/т чугуна:			
кокс	475,6	434,4	398
кокосый орешек	34,0	34,5	34,2
ПУТ	0	131,3	138,8
ПГ	58,3	0	0
Расход сухих материалов, кг/т чугуна:			
агломерат ЕМЗ	769,8	373,9	813,9
агломерат ЮГОК	0	456,9	323,9
окатыши СевГОК	904,7	801,4	520,9
известняк	35,8	43,4	23,6
конвертерный шлак	96,3	69,5	49,1
Дутье: расход, м ³ /т чугуна	1460	1499	1353
содержание кислорода, %	22,76	23,35	25,2
температура, °С	1100	1100	1100
давление, атм	2,79	2,82	2,83
Степень использования СО, %	35,03	35,04	35,96
СО ₂ в колошниковом газе, %	13,4	13,7	14,6
Содержание в чугуне, % : Si	0,66	0,64	0,60
S	0,074	0,081	0,082
Выход шлака, кг/т чугуна	416,8	383,3	397,4
Основность шлака, CaO/SiO ₂	1,09	1,09	1,04
Содержание MgO в шлаке, %	5,6	4,78	5,6
Расчетные показатели:			
Объемная доля кокса в шихте, %	53,3	51,6	49,10
Теоретическая температура, °С	2120	2207	2215
Расход углерода, дошедшего до фурм, кг/т чугуна	315,9	271,1	253,4
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна	1859	1875	1718
Выход восстановительных газов, м ³ /т чугуна	781,14	777,17	770,33
Степень прямого восстановления, %	30,76	32,44	27,71
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	6,07	6,04	5,06
Расход условного топлива, кг/т чугуна	582,0	606,0	602,0
К.п.д. использования тепла печи, %	82,58	78,26	80,92
Выход колошникового газа, м ³ /т чугуна	1947	2033	1810
Определяющие показатели:			
Рудная нагрузка, т/т кокса	3,49	3,63	3,97
Выход шлака, кг/т кокса	839	821	925
Выход горнового газа, м ³ /т кокса	3820	4335	4188
Приход мелочи с шихтой, кг/т кокса	241,0	264,5	305,7
Скорость газа в распаре, м/с	10,24	11,62	9,83

Суммарный коэффициент замены кокса углем составил 0,31 и 0,56 кг/кг в 1-м и 2-м опытных периодах. При этом перерасход кокса за счет вывода ПГ составил 46,64 кг/т чугуна.

Низкая степень использования восстановительного потенциала газов определяет повышение расхода кокса.

В отечественной и зарубежной практике выплавки чугуна η_{CO} составляет 45-55% (содержание CO_2 в колошниковом газе - 16-24%), что наравне с другими факторами обеспечивает снижение расхода кокса до 250-350 кг/т чугуна [1-5].

Основной причиной низкого значения степени использования газа (η_{CO}) в условиях ЧАО «ЕМЗ» является низкое и нестабильное качество кокса (показатель $CSR=45-55\%$). Естественно, что при использовании ПУТ и соответственном снижении расхода кокса процесс разрушение кокса в печи усиливается. В зарубежной практике при работе доменных печей с применением ПУТ величина CSR оговорена потребителем и составляет не менее 65% [1, 13]. В частности, доменные печи, работающие с высоким расходом ПУТ (180-250 кг/т чугуна), используют кокс с показателем CSR более 70%.

Во 2-м опытном периоде на ДП-3 (3.10-15.11.2016г.) повышена эффективность компенсирующих мероприятий: увеличено содержание кислорода в дутье (2,44 %), повышена теоретическая температура горения (95°C), снижены расход конвертерного шлака (47,2 кг/т чугуна) и основность шлака (0,05 единиц), благоприятно изменился состав железорудной части шихты (+323,9 кг/т чугуна агломера ЮГОК). Это позволило повысить до 138,8 кг/т чугуна расход ПУТ, снизить расход кокса (77,6 кг/т чугуна, 16,3 %), повысить производительность печи (370 т/сут, 10,5 %).

Анализ материально-тепловых балансов базовых и опытных периодов

Первичные и расчетные показатели работы ДП-5 и ДП-3 приведены в табл. 6-10.

Таблица 8 - Тепловые балансы работы ДП-5 ЧАО «ЕМЗ» в 2016г

Статьи прихода и расхода тепла	Периоды					
	январь- февраль (базовый)		20 марта- 21 апреля (1-й опытный)		11-31 июля (2-й опытный)	
ПРИХОД ТЕПЛА						
	ккал/кг чугуна	%	ккал/кг чугуна	%	ккал/кг чугуна	%
Теплота горения кокса у фурм	797	31,33	666,0	23,25	607,5	22,56
Теплота горения ПУТ	0	0	188,6	6,56	181,9	6,75
Теплота горения природного газа	0	0	8,8	0,31	0	0
Теплосодержание ПУТ	0	0	2,4	0,08	2,3	0,09
Теплосодержание дутья за вычетом теплоты разложения влаги дутья	437	17,17	541,4	18,52	488,4	18,13
Всего в области горения	1235	48,50	1407,2	48,93	1280,1	47,53
Теплота окисления С в СО в процессах прямого восстановл.	274	10,76	157	5,46	199,6	7,41
Окисление СО в СО ₂	992	38,98	1066,2	37,07	1054,7	39,16
Окисление Н ₂ в Н ₂ О	45	1,77	245,7	8,54	159	5,9
Всего в области восстановления	1311	51,50	1468,9	51,07	1413,3	52,47
Общий приход тепла	2546	100,0	28761	100,0	2693,4	100,0
РАСХОД ТЕПЛА						
Диссоциация оксидов	1680	66,0	1705	59,28	1796,8	63,0
Диссоциация сернистых соед.	2	0,06	1,2	0,04	1,3	0,05
Диссоциация карбонатов за вычетом теплоты шлакообраз.	20	0,79	14,6	0,51	11,5	0,43
Испарение влаги	15,0	0,59	15,4	0,54	13,8	0,51
Теплосодержание чугуна	300	11,78	300	10,43	300	11,14
Теплосодержание шлака	185	7,27	157	5,46	158	5,87
Сумма	2187	85,90	2193,2	76,26	2181,4	80,99
Теплосодержание горячего агломерата	21	0,82	18,9	0,66	23,7	0,88
Полезный расход тепла	2166	85,08	2174,3	75,6	2157,7	80,11
Нагрев водяных паров до температуры колошника	4	0,17	7,2	0,25	5,1	0,19
Теплосодержание сухого колошникового газа	172	6,77	109,6	3,81	99,6	3,7
Потери тепла в окружающее пространство и с охлаждающей водой (по разности)	189	7,4	585	20,34	431	16
Общие потери тепла	380	14,92	701,8	24,4	535,7	19,89
Общий расход тепла	2546	100,0	2876,1	100,0	2693,4	100,0

Таблица 9 - Тепловые балансы работы ДП-3 ЧАО «ЕМЗ» в 2016г

Статьи прихода и расхода тепла	Периоды					
	16.03-21.04.2016 (базовый)		10-31.07.2016 (1-й опытный)		3.10-15.11.2016 (2-й опытный)	
ПРИХОД ТЕПЛА						
	ккал/кг чугуна	%	ккал/кг чугуна	%	ккал/кг чугуна	%
Теплота горения кокса у фурм	739,1	27,57	634,3	22,89	592,9	22,25
Теплота горения ПУТ	0,0	0,00	196,4	7,09	200,6	7,53
Теплота горения природного газа	24,4	0,91	0,0	0,00	0,0	0,00
Теплосодержание ПУТ	0,0	0,00	2,4	0,09	2,6	0,10
Теплосодержание дутья за вычетом теплоты разложения влаги дутья	470,4	17,55	503,2	18,16	431,6	16,20
Всего в области горения	1233,9	46,02	1336,3	48,23	1227,7	46,07
Теплота окисления С в СО в процессах прямого восстановл.	174,9	6,52	179,7	6,49	156,9	5,89
Окисление СО в СО ₂	1003,6	37,43	1137,8	41,06	1060,6	39,80
Окисление Н ₂ в Н ₂ О	268,7	10,02	117,1	4,23	219,7	8,24
Всего в области восстановления	1447,2	53,98	1434,6	51,77	1437,2	53,93
Общий приход тепла	2681,1	100	2770,9	100	2664,9	100,0
РАСХОД ТЕПЛА						
Диссоциация оксидов	1721,8	64,22	1688,5	60,94	1678,9	63,00
Диссоциация сернистых соед.	1,2	0,04	1,2	0,04	1,0	0,04
Диссоциация карбонатов за вычетом теплоты шлакообраз.	9,4	0,35	11,4	0,41	6,2	0,23
Испарение влаги	10,6	0,40	13,4	0,48	10,5	0,39
Теплосодержание чугуна	300,0	11,19	300,0	10,83	300,0	11,26
Теплосодержание шлака	171,1	6,38	153,9	5,55	159,9	6,00
Полезный расход тепла	2214,1	82,58	2168,4	78,26	2156,5	80,92
Нагрев водяных паров до температуры колошника	10,9	0,41	6,3	0,23	11,4	0,43
Теплосодержание сухого колошникового газа	153,3	5,72	161,0	5,81	176,7	6,63
Потери тепла в окружающее пространство и с охлаждающей водой (по разности)	302,8	11,29	435,2	15,7	320,3	12,02
Общие потери тепла	467,0	17,42	602,5	21,74	508,4	19,08
Общий расход тепла	2681,1	100,0	2770,9	100,00	2664,9	100,00

Расчетные данные в основном подтверждают преимущества ПУТ-технологии. В приходе тепла замена теплоты горения кокса на ДП -5 теплотой горения ПУТ составляет 6,56 и 6,75 % (табл.8), на ДП-3 7,09 и 7,53% (табл. 9).

Расход условного топлива на ДП-5 незначительно снизился во 2-м опытном периоде (5,68 кг/т чугуна; 0,93%) и повысился в 1-м опытном периоде (26,32 кг/т чугуна; 4,33%), что подтверждает низкую эффективность вдувания ПГ в смеси с ПУТ (табл.6).

Расход условного топлива на ДП-3 повысился в 1-м опытном периоде (24 кг/т чугуна; 4,12 %) и во 2-м опытном периодах (20 кг/т чугуна; 3,44%).

Степень прямого восстановления оксидов железа (r_d) на ДП-5 снижается до 27,44% (на 26,21%) и до 35,52% (на 18,13%), а на ДП-3 повышается до 32,44 (на 1,68%) и снижается до 27,71 %. (на 3,05%).

Теоретическая температура горения в 1-м и 2-м опытных периодах на ДП-5 повысилась до 2132 и 2192 °С (на 30 и 90°С), а на ДП-3 до 2207 и 2215°С (на 87 и 95 °С), что вполне отвечает требованиям технологии.

Выход горновых газов на ДП-5 существенно снизился во 2-м опытном периоде (123 м³/т чугуна; 6,36 %) и повысился в 1-м опытном периоде с вдуванием ПГ (117 м³/т чугуна; 6,05 %), а на ДП-3 незначительно повысился в 1-м опытном периоде (+16 м³/т чугуна; 0,86%) и снизился во 2-м периоде (-141 м³/т чугуна; 7,58%).

Общий расход тепла существенно повысился на ДП-5 в опытных периодах, особенно при вдувании ПГ (330,1 ккал/кг чугуна; 12,96%), а на ДП-3 повысился в 1-м опытном периоде (89,8 ккал/кг чугуна; 3,35%) и снизился во 2-м опытном периоде (16,2 ккал/кг чугуна; 0,6%).

КПД использования тепла на ДП-5 снизился в опытных периодах, особенно существенно при вдувании ПГ (8,82%), а на ДП-3 снизился на 4,32 и 1,66%, соответственно, в 1-м и 2-м опытных периодах.

Перечисленные в табл.6 и 7 определяющие показатели доменной плавки не превышают предельно-допустимого уровня [4].

Изменения основных показателей доменной плавки на ДП-5 и ДП-3 приведены в табл. 10.

Таблица 10 - Изменения основных показателей доменной плавки при вдувании ПУТ

Изменение показателя	ДП-5		ДП-3	
	20.03-21.04.2016 (1-й опытный)	11-31.07.2016 (2-й опытный)	10-31.07.2016 (1-й опытный)	3.10-15.11.2016 (2-й опытный)
Расход условного топлива, кг/т чугуна / %	+26,32/+4,33	-5,68/-0,93	+24/+4,12	+20/+3,44
Степень прямого восстановления оксида железа (τ_d), %	-26,21	-18,13	+1,68	-3,05
Теоретическая температура горения, °С	+30	+90	+87	+95
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна / %	+117/+6,05	-123/-6,36	+16/+0,86	-141/-7,58
Общие потери тепла, ккал/кг чугуна / %	-321,8/-84,68	-155,7/+40,97	+135,5/+29,01	+41,4/+8,86
Общий расход тепла, ккал/кг чугуна / %	+330,1/+12,96	+147,4/+5,79	+89,8/+3,35	-16,2/-0,6

Таким образом, данные материально-тепловых балансов проведенных опытных плавов подтверждают эффективность доменной технологии с вдуванием в горн ПУТ в сочетании с компенсирующими мероприятиями.

Из приведенных результатов опытных плавов и материально-тепловых балансов следует, что на данном этапе внедрения оптимальным является технологический режим с вдуванием 120-140 кг ПУТ на 1 т чугуна.

ВЫВОДЫ

1. ЧАО «ЕМЗ» имеет благоприятные предпосылки для высокоэффективного использования ПУТ: современные доменные печи объемом 1513 и 1719 м³, аглофабрика, склад окатышей и кокса (СОК), предусматривающий подготовку основных шихтовых материалов к плавке, современная ПУТ-установка, введенная в эксплуатацию в 1-м квартале 2016г., воздухонагреватели Калугина с температурой дутья до 1250 °С, лотковое загрузочное устройство на ДП-3 и другое.

2. Горение ПУТ и замена им кокса неизбежно сопровождаются неблагоприятным изменением определяющих параметров плавки: сокращение доли кокса в шихте, соответственно, ухудшение ее порозности и газопроницаемости, повышение механической и химических нагрузок на кокс на 20-30%, снижение температуры горения в фурменной зоне, снижение содержания кислорода в горновом газе по длине фурменной зоны и т.д. Поэтому одновременно с увеличением расхода топлива необходимо применять компенсирующие мероприятия, которые должны нейтрализовать негативное влияние ПУТ на технологический режим.

3. С использованием методики профессора Ленинградского политехнического института А.Н. Рамма выполнены технологические расчеты, подтвердившие высокую эффективность использования ПУТ в количестве до 150 кг/т чугуна в технологических условиях ЧАО «ЕМЗ». Введено понятие так называемых определяющих показателей: рудная нагрузка (кг/кг кокса), выход шлака (кг/т кокса), выход горнового газа ($\text{м}^3/\text{т}$ кокса), приход мелочи с шихтой (кг/т кокса), скорость газа в распаре (м/с). Указанные определяющие параметры являются граничными, предельными, разделяющими области реально достижимых и маловероятных расчетных режимов доменной плавки с применением ПУТ.

На основании выполненных расчетов для сложившихся на ЧАО «ЕМЗ» технологических условий рекомендован оптимальный расход ПУТ 120-140 кг/т чугуна.

4. Освоение ПУТ-технологии начато с марта 2016г. на ДП-5 и с 20 апреля 2016 г. на ДП-3. Для приготовления ПУТ использовался высококачественный Кузнецкий уголь марки СС (А=7,5%, S=0,2%).

Используемый кокс не отвечает требованиям современной ПУТ-технологии из-за низкого и нестабильного значения показателя горячей прочности (CSR) для КДМ1=50-57 %, КДМ2=45-50 %) и нестабильных технического анализа и фракционного состава поставщиков кокса.

5. Для оценки эффективности использования ПУТ проведены опытно-промышленные плавки.

На ДП-5: январь-февраль 2016г. - базовый период (без вдувания ПГ), 20.03-21.04.2016г. - 1-й опытный период с вдуванием 127,8 кг/т чугуна ПУТ и 21 м³ ПГ, 11-31.07.2016г. - 2-й опытный период с вдуванием 122,1 кг/т чугуна ПУТ.

Промышленный опыт освоения ПУТ-технологии на ДП-5 позволил снизить расход кокса на 123,5 и 124,2 кг/т чугуна (22%). Производительность печи при этом повысилась на 404,1 т/сут (15,6%) и 301,2 т/сут (11,6 %).

Компенсирующими мероприятиями в опытных периодах были повышение температура дутья (194 °С), содержания кислорода в нем (2,8-3%), снижение расхода сырого известняка (20-37 кг/т чугуна), выхода шлака (37-40 кг/т чугуна) и основности шлака (CaO/SiO₂) на 0,08 единиц.

Суммарный коэффициент замены кокса ПУТ на ДП-5 составил 0,97 и 1,02 кг/кг, соответственно, в 1-м и 2-м опытных периодах. За исключением влияния компенсирующих мероприятий и ПГ коэффициент замены кокса ПУТ составил в 1-м и 2-м периодах 0,63 и 0,76 кг/кг.

ДП-3: 16.03-21.04.2016г. - базовый период с расходом ПГ 58,3 м³/т чугуна; 10-31.07.2016г. - 1-й опытный период с расходом ПУТ 131,3 кг/т чугуна, без ПГ, 3.10-15.11.2016г. - 2-й опытный период с расходом ПУТ 138,8 кг/т чугуна ПУТ, без ПГ.

В результате вдувания ПУТ расход кокса снизился в опытных периодах на 41,2 кг/т чугуна (8,6%) и 77,6 кг/т чугуна (16,3%). Производительность печи при вдувании ПУТ повысилась на 33,9 т/сут (1,07 %) и 370 т/сут (11,77%).

Компенсирующими мероприятиями в опытных периодах на ДП-3 были: вывод ПГ из состава дутья (58,3 м³/т чугуна), увеличение содержание кислорода в дутье (2,44 %), повышение теоретической температура горения до 2215 (95°С), снижение расхода конвертерного шлака (47,2 кг/т чугуна) и основности (CaO/SiO₂) шлака (0,05 единиц), изменение состава

железородной части шихты, в частности, ведение агломерата ЮГОК (323,9 кг/т чугуна).

Суммарный коэффициент замены кокса углем составил 0,31 и 0,56кг/кг в 1-м и 2-м опытных периодах. При этом перерасход кокса за счет вывода ПГ составил 46,64 кг/т чугуна.

6. Выполненные материально-тепловые балансы базовых и опытных периодов работы ДП-3 и ДП-5 в основном подтверждают благоприятное изменение технологического режима плавки.

Расход условного топлива на ДП-5 незначительно снизился во 2-м опытном периоде (5,68 кг/т чугуна; 0,93%) и повысился в 1-м опытном периоде (26,32 кг/т чугуна; 4,33%), что подтверждает низкую эффективность вдувания ПГ в смеси с ПУТ.

Расход условного топлива на ДП-3 повысился в 1-м и 2-м опытных периодах (24 кг/т чугуна; 4,12 %) и (20 кг/т чугуна; 3,44 %).

Теоретическая температура горения в 1-м и 2-м опытных периодах на ДП-5 повысилась до 2132 и 2192 °С (на 30 и 90°С), а на ДП-3 до 2207 и 2215°С (на 87и 95 °С), что вполне отвечает требованиям технологии.

Степень прямого восстановления оксидов железа (r_d) на ДП-5 снижается до 27,44% (на 26,21%) и до 35,52% (на 18,13%), а на ДП-3 повышается до 32,44 (на1,68%) и снижается до 27,71 %.(на 3,05%).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Савчук Н.А. Доменное производство на рубеже XXI века / Н.А. Савчук, И.Ф. Курунов // Новости черной металлургии за рубежом. – 2000. – Часть II. – Приложение 5. – М.: ОАО «Черметинформация». – 42 с.
2. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 597 с.
3. Ярошевский С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. - М.: Металлургия, 1988. - 176 с.
4. Основные принципы расчета и организации технологии доменной плавки

- при замене дополнительными топливами 30–60 % кокса (отечественный и зарубежный опыт) / С.Л. Ярошевский, З.К. Афанасьева, А.В. Кузин // Творческое наследие Б.И. Китаева: труды Междунар. науч.-практ. конф. 11-14 февраля 2009г. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 138-148.
5. Геердес М., Токсопеус Х., Ван дер Влит К. Введение в современный доменный процесс. Нидерланды.- 2004 г.- 131 с.
 6. Дунаев Н.Е., Кудрявцева З.М., Кузнецов Ю.М. Вдувание пылевидных материалов в доменные печи. — М.: Metallurgy, 1977. — 208 с.
 7. Некрасов З.И., Юпко Л.Д., Мухин П.Я. и др. // Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема: Темат. сб. № 4. — М.: Metallurgy, 1978.
 8. Технология плавки с вдуванием пылеугольного топлива и природного газа на дутье, обогащенном кислородом/ А.Н. Рыженков, С.Л. Ярошевский, Б.П.Крикунов, В.М. Замуруев, В.Е. Попов, В.В. Кочура// Сталь – 2005 . – №12. – С. 3-6.
 9. The Principle of Full and Complex Compensation at Replacement of Coke with Pulverized Coal; Resources of Technology/ Yaroshevsky Stanislav and Kochura Volodymyr// The 5th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking (ICSTI'99) November 19-23,2009 Shanghai, China – Shanghai, 2009. – P.70-78.
 10. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. - М.: Metallurgy, 1980. - 304 с.
 11. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Л. Теплообмен в доменной печи. - М.: Metallurgy, 1966. - 355 с.
 12. Бабий В.И., Иванова И.В. // Материалы III Всесоюзной конференции по теории горения твердого топлива "Горение твердого топлива". - Новосибирск: Наука, 1969. - 304 с.
 13. Ухмылова Г.С. Проблемы коксохимического производства // Новости черной металлургии за рубежом. - 2002.- Приложение 3. - М.: ОАО Черметинформация. – 35 с.