

**А. М. Кузнецов**, канд. техн. наук, нач. дом. цеха

**А. В. Зубенко**, нач. отдела, гл. спец.

**В. П. Падалка**, канд. техн. наук, рук. проектов

**А. С. Хайбулаев**, нач. лаб.

**С. Л. Ярошевский\***, проф., д-р техн. наук

**В. В. Кочура\***, доц., канд. техн. наук, зав. каф., e-mail: kochura@ukr.net

ЧАО «Енакиевский металлургический завод», Донецк

\*Донецкий национальный технический университет, Донецк

## Освоение и эффективность технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива на ЧАО «Енакиевский металлургический завод»<sup>1</sup>

*Приведен опыт освоения технологии доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива на ЧАО «Енакиевский металлургический завод».*

**Ключевые слова:** доменная печь, кокс, ПУТ, ПГ, шлак, горение.

Основной 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/(м<sup>3</sup>·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 снижению расхода кокса 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.

*Технологические и шихтовые условия доменной плавки.*<sup>2</sup> Енакиевский металлургический завод (ЧАО «ЕМЗ») имеет благоприятные предпосылки для высокоэффективного использования ПУТ: современные доменные печи объемом 1513 и 1719 м<sup>3</sup>, аглофабрику, 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 2016 г.

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

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

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

*Результаты промышленного внедрения ПУТ-технологии.* Освоение ПУТ-технологии начато с марта 2016 г. 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. 4 приведены результаты работы ДП-5.

Из сопоставления базового и опытных периодов следует, что вдувание в горн ПУТ в 1-м и 2-м опытных периодах 127,8 (+21 м<sup>3</sup> ПГ) и 122,1 кг/т чугуна

<sup>1</sup> Пылеугольный комплекс построен и введен в эксплуатацию по инициативе и активному участию бывшего генерального директора завода Подкорытова А. Л.

<sup>2</sup> В работе принимали участие сотрудники ЧАО «ЕМЗ» – мастера и газовщики ДП № 3 и № 5 и ДонНТУ – Сидоренко Г. Н., Афанасьева З. К.

## Показатели качества железорудной шихты в 2016 г.

Значение	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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
Агломерат 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 2016 г.)											
Значение	Fe	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Основность CaO/SiO <sub>2</sub>	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 2016 г.

Поставщик	Данные поставщика								
	W <sup>p</sup>	A <sup>c</sup>	S	V	M <sub>25</sub>	M <sub>10</sub>	+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	

Таблица 3

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

Значение	A <sup>c</sup> , %	W <sup>p</sup> , %	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

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. Указанные низкие значения коэффициента замены кокса ПУТ (0,63 и 0,76 кг/кг) объясняются низким показателем использования восстановительного потенциала горновых газов ( $\eta_{\text{CO}}$ ) 35; 35,35 и 35,19 и содержанием CO<sub>2</sub> в колошниковом газе 13,2; 13,5 и 13,9 % в базовом и опытных периодах (табл. 4).

Аналогичные результаты получены при сопоставлении базового и опытных периодов работы на ДП-3 (табл. 5).

ДП-3 в базовом периоде работала с вдуванием ПГ, температурой дутья 1100 °С и содержанием кислорода в дутье 22,67 %. Поэтому ресурсы компенси-

рующих мероприятий были значительно ограничены и компенсировались выводом из состава дутья природного газа. Применение ПУТ в 1-м опытным периоде позволило при практически неизменной производительности печи снизить расход кокса на 41,2 кг/т чугуна (8,66 %) и ПГ на 58,3 м<sup>3</sup>/т чугуна.

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  $\eta_{\text{CO}}$  составляет 45–55 % (содержание CO<sub>2</sub> 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 ( $\eta_{\text{CO}}$ ) в условиях ЧАО «ЕМЗ» является низкое и нестабильное качество кокса. Естественно, что при использовании ПУТ и соответственном снижении расхода кокса, процесс разрушения кокса в печи усиливается. В зарубежной практике при работе доменных печей с применением ПУТ величина CSR оговорена потребителем и составляет не менее 65 %. В частности, доменные печи, работающие с высоким расходом ПУТ (180–250 кг/т чугуна), используют кокс с показателем CSR более 70 % [1, 6].

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

Показатели	Периоды:		
	январь-февраль 2016 (базовый)	20.03– 21.04.2016 (1-й опытный)	11–31.07.2016 (2-й опытный)
<b>Технологические показатели:</b>			
Производительность т/сутки	2595,5	2999,6	2896,7
Удельная производительность, т/(м <sup>3</sup> ·сут)	1,715	1,983	1,915
Расход топлива, кг(м <sup>3</sup> )/т чугуна:			
кокс	564,2	440,7	440,0
коксый 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 <sup>3</sup> /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 <sub>2</sub> 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, CaO/SiO <sub>2</sub>	1,16	1,09	1,08
Содержание MgO в шлаке, %	5,48	5,72	5,11
<b>Расчетные показатели:</b>			
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 <sup>3</sup> /т чугуна	1932	2049	1809
Выход восстановительных газов, м <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /т чугуна	2154	2131	1953
<b>Определяющие показатели:</b>			
Рудная нагрузка, т/т кокса	2,92	3,67	3,61
Выход шлака, кг/т кокса	763	892	833
Выход горнового газа, м <sup>3</sup> /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

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

Показатели	Периоды:		
	16.03–21.04.2016 (базовый)	10–31.07.2016 (1-й опытный)	3.10–15.11.2016 (2-й опытный)
<b>Технологические показатели:</b>			
Производительность т/сутки	3142,7	3176,6	3512,77
Удельная производительность, т/(м <sup>3</sup> ·сут)	1,828	1,848	2,04
Расход топлива, кг(м <sup>3</sup> )/т чугуна:			
кокс	475,6	434,4	398
коксый 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 <sup>3</sup> /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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub>	1,09	1,09	1,04
Содержание MgO в шлаке, %	5,6	4,78	5,6
<b>Расчетные показатели:</b>			
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 <sup>3</sup> /т чугуна	1859	1875	1718
Выход восстановительных газов, м <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /т чугуна	1947	2033	1810
<b>Определяющие показатели:</b>			
Рудная нагрузка, т/т кокса	3,49	3,63	3,97
Выход шлака, кг/т кокса	839	821	925
Выход горнового газа, м <sup>3</sup> /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

Во 2-м опытном периоде на ДП-3 (3.10–15.11.2016 г.) повышена эффективность компенсирующих мероприятий: увеличено содержание кислорода в дутье (2,44 %), повышена теоретическая температура горения (95 °С),

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 агломерата 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. 4–7.

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. 6), на ДП-3: 7,09 и 7,53 % (табл. 7).

Расход условного топлива на ДП-5 повысился в 1-м опытном периоде (26,32 кг/т чугуна; 4,33 %) и

незначительно снизился во 2-м опытном периоде (5,56 кг/т чугуна; 0,91 %), что подтверждает низкую эффективность вдувания ПГ в смеси с ПУТ (табл. 4).

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

Степень прямого восстановления оксидов железа ( $r_d$ ) на ДП-5 (табл. 4) снижается до 27,44 % (на 26,21 %) и до 35,52 % (на 18,13 %), а на ДП-3 (табл. 5) повышается до 32,44 (на 1,68 %) и снижается до 27,71 % (на 3,05 %). Из приведенных данных следует, что влияние ПГ и ПУТ на восстановление оксидов

Таблица 6

**Тепловые балансы работы ДП-5 ЧАО «ЕМЗ» в 2016 г.**

Статьи прихода и расхода тепла	Периоды:					
	январь-февраль 2016 (базовый)		20.03–21.04.2016 (1-й опытныи)		11–31.07.2016 (2-й опытныи)	
<b>ПРИХОД ТЕПЛА</b>						
	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
<b>Всего в области горения</b>	<b>1235</b>	<b>48,50</b>	<b>1407,2</b>	<b>48,93</b>	<b>1280,1</b>	<b>47,53</b>
Теплота окисления С в СО в процессах прямого восстановления	274	10,76	157	5,46	199,6	7,41
Окисление СО в СО <sub>2</sub>	992	38,98	1066,2	37,07	1054,7	39,16
Окисление Н <sub>2</sub> в Н <sub>2</sub> О	45	1,77	245,7	8,54	159	5,9
<b>Всего в области восстановления</b>	<b>1311</b>	<b>51,50</b>	<b>1468,9</b>	<b>51,07</b>	<b>1413,3</b>	<b>52,47</b>
<b>Общий приход тепла</b>	<b>2546</b>	<b>100,0</b>	<b>28761</b>	<b>100,0</b>	<b>2693,4</b>	<b>100,0</b>
<b>РАСХОД ТЕПЛА</b>						
Диссоциация оксидов	1680	66,0	1705	59,28	1796,8	63,0
Диссоциация сернистых соединений	2	0,06	1,2	0,04	1,3	0,05
Диссоциация карбонатов за вычетом теплоты шлакообразования	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
<b>Полезный расход тепла</b>	<b>2166</b>	<b>85,08</b>	<b>2174,3</b>	<b>75,6</b>	<b>2157,7</b>	<b>80,11</b>
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
<b>Общие потери тепла</b>	<b>380</b>	<b>14,92</b>	<b>701,8</b>	<b>24,4</b>	<b>535,7</b>	<b>19,89</b>
<b>Общий расход тепла</b>	<b>2546</b>	<b>100,0</b>	<b>2876,1</b>	<b>100,0</b>	<b>2693,4</b>	<b>100,0</b>

## Тепловые балансы работы ДП-3 ЧАО «ЕМЗ» в 2016 г.

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)	
<b>ПРИХОД ТЕПЛА</b>						
	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
<b>Всего в области горения</b>	<b>1233,9</b>	<b>46,02</b>	<b>1336,3</b>	<b>48,23</b>	<b>1227,7</b>	<b>46,07</b>
Теплота окисления С в СО в процессах прямого восстановления	174,9	6,52	179,7	6,49	156,9	5,89
Окисление СО в СО <sub>2</sub>	1003,6	37,43	1137,8	41,06	1060,6	39,80
Окисление Н <sub>2</sub> в Н <sub>2</sub> О	268,7	10,02	117,1	4,23	219,7	8,24
<b>Всего в области восстановления</b>	<b>1447,2</b>	<b>53,98</b>	<b>1434,6</b>	<b>51,77</b>	<b>1437,2</b>	<b>53,93</b>
<b>Общий приход тепла</b>	<b>2681,1</b>	<b>100</b>	<b>2770,9</b>	<b>100</b>	<b>2664,9</b>	<b>100,0</b>
<b>РАСХОД ТЕПЛА</b>						
Диссоциация оксидов	1721,8	64,22	1688,5	60,94	1678,9	63,00
Диссоциация сернистых соединений	1,2	0,04	1,2	0,04	1,0	0,04
Диссоциация карбонатов за вычетом теплоты шлакообразования	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
<b>Полезный расход тепла</b>	<b>2214,1</b>	<b>82,58</b>	<b>2168,4</b>	<b>78,26</b>	<b>2156,5</b>	<b>80,92</b>
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
<b>Общие потери тепла</b>	<b>467,0</b>	<b>17,42</b>	<b>602,5</b>	<b>21,74</b>	<b>508,4</b>	<b>19,08</b>
<b>Общий расход тепла</b>	<b>2681,1</b>	<b>100,0</b>	<b>2770,9</b>	<b>100,00</b>	<b>2664,9</b>	<b>100,00</b>

железа практически одинаково: базовый и 2-й периоды на ДП-3  $r_g$  составляет 30,76 и 27,71 %

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 опытным периоде (123 м<sup>3</sup>/т чугуна; 6,4 %) и повысился в 1-м опытным периоде с вдуванием ПГ (117 м<sup>3</sup>/т чугуна; 6,06 %), а на ДП-3 незначительно повысился в 1-м опытным периоде (+16 м<sup>3</sup>/т чугуна; 0,86 %) и снизился во 2-м периоде (-141 м<sup>3</sup>/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 опытным периоде (89,8 ккал/кг чугуна; 3,35 %)

и снизился во 2-м опытным 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. 4 и 5 определяющие показатели доменной плавки не превышают предельно допустимого уровня [4].

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

Из приведенных результатов опытных плавок и материально-тепловых балансов следует, что на данном этапе внедрения, оптимальным является

технологический режим с вдуванием 120–140 кг ПУТ на 1 т чугуна совместно с выводом ПГ и комплексом компенсирующих мероприятий.

## Выводы

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

Для оценки эффективности использования ПУТ проведены опытно-промышленные плавки.

На ДП-5: январь-февраль 2016 г. – базовый период (без вдувания ПГ), 20.03–21.04.2016 г. – 1-й опытный период с вдуванием 127,8 кг/т чугуна ПУТ и 21 м<sup>3</sup> ПГ, 11–31.07.2016 г. – 2-й опытный период с вдуванием 122,1 кг/т чугуна ПУТ.

Промышленный опыт освоения ПУТ-технологии на ДП-5 показывает, что в результате применения ПУТ, расход кокса снизился 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: вывод ПГ из состава дутья, повышение температуры 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/SiO<sub>2</sub>) 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: 16.03–21.04.2016 г. – базовый период с расходом ПГ 58,3 м<sup>3</sup>/т чугуна; 10–31.07.2016 г. – 1-й опытный период с расходом ПУТ 131,3 кг/т чугуна, без ПГ, 3.10–15.11.2016 г. – 2-й опытный период с расходом ПУТ 138,8 кг/т чугуна, 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 м<sup>3</sup>/т чугуна), увеличение содержание кислорода в дутье (2,44 %), повышение теоретической температура горения до 2215 °С (95 °С), снижение расхода конвертерного шлака (47,2 кг/т чугуна) и основности (CaO/SiO<sub>2</sub>) шлака (0,05 единиц), изменение состава железорудной части шихты, в частности, введение агломерата ЮГОК (323,9 кг/т чугуна).

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.

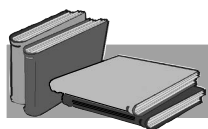
Выполненные материально-тепловые балансы базовых и опытных периодов работы ДП-3 и ДП-5 в основном подтверждают благоприятное изменение технологического режима плавки.

Расход условного топлива на ДП-5 повысился в 1-м опытном периоде (26,32 кг/т чугуна; 4,33 %) и незначительно снизился во 2-м опытном периоде (5,56 кг/т чугуна; 0,91 %), 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; 4,1 %) и (20 кг/т чугуна; 3,4 %).

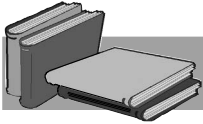
Теоретическая температура горения в 1-м и 2-м опытных периодах на ДП-5 повысилась до 2132 и 2192 °С (на 30 и 90 °С), а на ДП-3 до 2207 и 2215 °С (на 87 и 95 °С), что вполне отвечает требованиям технологии.

Степень прямого восстановления оксидов железа ( $r_d$ ) в 1-м и 2-м опытных периодах 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 %). Из приведенных данных следует, что влияние ПГ и ПУТ на восстановление оксидов железа практически одинаково: базовый и 2-й периоды на ДП-3  $r_d = 30,76$  и  $27,71$  %.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Савчук Н. А., Курунов И. Ф. Доменное производство на рубеже XXI века // 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. – Днепр: Пороги, 2003. – 597 с.
3. Ярошевский С. Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. – М.: Металлургия, 1988. – 176 с.
4. Ярошевский С. Л., Афанасьева З. К., Кузин А. В. Основные принципы расчета и организации технологии доменной плавки при замене дополнительными топливами 30–60 % кокса (отечественный и зарубежный опыт) // Творческое наследие Б. И. Китаева: труды Международной науч.-практ. конференции 11–14 февраля 2009 г. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 138–148.
5. Геердес М., Ченьо Р., Курунов И., Лингарди О., Риккетс Д. Современный доменный процесс. Введение. – Металлургия, 2016. – 280 с.
6. Ухмылова Г. С. Проблемы коксохимического производства // Новости черной металлургии за рубежом. – 2002. – Приложение 3. – М.: ОАО «Черметинформация». – 35 с.



## REFERENCES

1. Savchuk N. A., Kurunov I. F. (2000). Domennoe proizvodstvo na rubezhe XXI veka [Blast production at the turn of the 21st century]. *Novosti chernoï metallurgii za rubezhom [News of the iron and steel industry abroad]*. Part II. Application 5. Moscow: OAO "Chermetinformatsia", 42 p. [in Russian].
2. Tovarovskiy I. G. (2003). Domennaia plavka. Evoliutsiia, khod protsessov, problemy i perspektivy [Blast furnace smelting. Evolution, the course of processes, problems and prospects]. Dnepr: Porogi, 597 p. [in Russian].
3. Yaroshevskiy S. L. (1988). Vyplavka chuguna s primeneniem pyleugol'nogo topliva [Cast iron smelting using pulverized coal]. Moscow: Metallurgiiia, 176 p. [in Russian].
4. Yaroshevskiy S. L., Afanas'eva Z. K., Kuzin A. V. (2009). Osnovnye printsipy rascheta i organizatsii tekhnologii domennoi plavki pri zamene dopolnitel'nymi toplivami 30–60 % koksa (otechestvennyi i zarubezhnyi opyt) [Basic principles of calculation and organization of blast furnace smelting technology with replacement of 30–60 % of coke by additional fuels (domestic and foreign experience)]. *Tvorcheskoe nasledie B. I. Kitaeva: trudy Mezhdunarodnoi nauch.-prakt. konferentsii 11–14 fevralia 2009 g. [The creative heritage of B. I. Kitaev: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]*. Ekaterinburg: UGTU-UPI, pp. 138–148 [in Russian].
5. Geerdes M., Chen'o R., Kurunov I., Lingardi O., Rikkets D. (2016). Sovremennyi domennyi protsess. Vvedenie [Modern blast furnace process. Introduction]. Moscow: Metallurgizdat, 280 p. [in Russian].
6. Ukhmylova G. S. (2002). Problemy koksohimicheskogo proizvodstva [Problems of coke production]. *Novosti chernoï metallurgii za rubezhom [News of the iron and steel industry abroad]*. Application 3. Moscow: OAO "Chermetinformatsia", 35 p. [in Russian].

### Анотація

Кузнєцов О. М., Зубенко О. В., Падалка В. П., Хайбулаєв А. С., Ярошевський С. Л., Кочура В. В.

Освоєння та ефективність технології доменної плавки з використанням пиловугільного палива на ПАТ «Єнакіївський металургійний завод»

Наведено досвід розробки технології доменної плавки з вдуванням пиловугільного палива на ПАТ «Єнакіївський металургійний завод».

### Ключові слова

Доменна піч, кокс, ПВП, ПГ, шлак, горіння.

### Summary

Kuznetsov A., Zubenko A., Padalka V., Khaibulaev A., Yaroshevskiy S., Kochura V. Mastering and efficiency of the technology of blast furnace smelting with the use of pulverized coal fuel at PJSC «Yenakieve Iron and Steel Works»

The experience of mastering the technology of blast furnace smelting with blowing of pulverized coal at PJSC «Yenakieve Iron and Steel Works» is given.

### Keywords

Blast furnace, coke, PC, NG, slag, combustion.

Поступила 31.08.17