

УДК 669.162.1

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВДУВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА И ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ПРИ ВЫПЛАВКЕ ЧУГУНА

Ярошевский С.Л.¹, д.т.н., профессор, научный консультант кафедры «Руднотермические процессы
и малоотходные технологии» (ira.brust@ukr.net)

Кочура В.В.¹, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Руднотермические процессы
и малоотходные технологии» (kochura@ukr.net)

Кузнецов А.М.², к.т.н., начальник доменного цеха (aleksandr.kuznetsov@emzsteel.com)

Хайбулаев А.С.², начальник аглодоменной исследовательской группы аглодоменного отдела
технического управления (amina@wp.dn.ua)

Афанасьева З.К.¹, старший преподаватель кафедры «Руднотермические процессы
и малоотходные технологии» (zoia_afanaseva@mail.ru)

¹ Донецкий национальный технический университет

(83001, Украина, Донецк, ул. Артема, 58)

² Енакиевский металлургический завод

(86429, Украина, Енакиево, пр. Металлургов, 9)

Аннотация. Разработана методика расчета показателей доменной плавки, позволяющая на основе принципа полной и комплексной компенсации и компенсирующих мероприятий рассчитывать технологические режимы доменной плавки с заменой части кокса дополнительными топливами. Выполнены расчеты эффективности использования природного газа и пылеугольного топлива в условиях доменного цеха Енакиевского металлургического завода. Подтверждена высокая экономическая эффективность использования природного газа и пылеугольного топлива в технологических условиях доменного цеха. Увеличение расхода природного газа от базового уровня (71,8 м³/т чугуна) до 110 м³/т чугуна обеспечивает соответственное повышение производительности доменной печи до 107,6 % и снижение расхода кокса до 417,3 кг/т чугуна (-38,4 кг/т чугуна, -8,42 %). Замена природного газа пылеугольным топливом в количестве 160 кг/т чугуна позволила полностью вывести его из состава дутья. При этом расход кокса снизился до 354,59 кг/т чугуна (-101,1 кг/т чугуна, -22,18 %). Повышение расхода пылеугольного топлива до 200 кг/т чугуна с компенсацией температурой дутья 1200 °С и кислородом дутья 25 % обеспечивает повышение производительности доменной печи до 105,8 % и снижение расхода кокса до 303,8 кг/т чугуна (-151,9 кг/т чугуна, -33,33 %). Высокая эффективность применения пылеугольного топлива в условиях Енакиевского металлургического завода объясняется меньшей его стоимостью по сравнению с природным газом, высоким содержанием углерода в угле и значительно меньшим влиянием на теоретическую температуру горения и другие технологические показатели.

Ключевые слова: природный газ, пылеугольное топливо, кокс, дутье, кислород, чугун, производительность, доменная печь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-11-833-839

ВВЕДЕНИЕ

Основой экономики металлургии чугуна является снижение расхода твердого топлива – кокса, стоимость которого составляет от 30 до 50 % себестоимости чугуна. За последние 200 лет расход твердого топлива снизился в 8 – 10 раз (до 250 – 350 кг/т чугуна) [1 – 9]. Однако и в настоящее время снижение расхода твердого топлива является основой улучшения эффективности доменной плавки.

Поскольку последствия вдувания дополнительных топлив можно рассчитать, то очевидно, что одновременно с увеличением расхода топлива необходимо применять соответствующие изменения, так называемые «компенсирующие мероприятия», которые должны нейтрализовать негативное влияние комбинированного дутья на технологический режим [10 – 14].

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Метод расчета показателей доменной плавки, разработанный на основе работ профессора Ленинградского политехнического института А.Н. Рамма [11], позволяет на основе принципа полной и комплексной компенсации и компенсирующих мероприятий рассчитывать технологические режимы доменной плавки с заменой части кокса дополнительными топливами.

С целью повышения достоверности расчета и оценки возможности реализации перспективных технологических режимов были обработаны годовые показатели работы зарубежных и отечественных доменных печей за длительный период времени (более 1000 опытов). На основании выполненных статистических исследований предложены определяющие параметры, превышение

которых свидетельствует о невозможности реализации данного расчетного режима. Показано, что при достигнутых уровнях качества кокса, железорудного сырья, параметрах температурно-дутьевого режима, в диапазоне расхода кокса от 250 до 600 кг/т чугуна предельными значениями определяющих показателей являются: скорость газа в распаре – 20 м/с, выход горнового газа – 5 тыс. м³/т кокса, выход шлака – 1100 кг/т кокса [14].

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

Таким образом, по описанной методике принципиально возможен расчет и корректное обоснование технологических режимов с применением дополнительных топлив.

Шихтовые условия

В качестве базового периода расчета принята работа доменной печи (ДП) № 5 филиала № 2 «Енакиевский металлургический завод» (ЕМЗ) ЗАО «Внешторгсервис» (ВТЗ) (полезный объем 1517 м³) в августе 2017 г.

Доменная печь выплавляла чугун с повышенным содержанием серы (0,178 %) для дальнейшей переработки в сталь по технологии кислородный конвертер – печь – ковш с внедоменной десульфурацией всего чугуна.

Используемые шихтовые материалы: агломерат ЕМЗ, окатыши Госрезерв, кокс Енакиевского коксохимпрома (ЕКХП), Макеевского и Ясиновского коксохимического завода (КХЗ), в основном КДМ-2 (табл. 1, 2).

Коксовый орешек выделялся из отсева металлургического кокса и использовался в шихте с расходом 35,1 кг/т чугуна.

Для изготовления пылеугольного топлива (ПУТ) применялся кузнецкий слабоспекающийся уголь марки СС: зола – 7,04 %, сера – 0,19 %, летучие – 20,71 %, влага – 6,87 %.

Расчетные периоды показателей доменной плавки с высоким расходом природного газа (ПГ) и ПУТ, приведенные в данной работе, выполнены при использовании кокса улучшенного качества «Премиум» и современной подготовки кокса к плавке [15, 16].

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПГ И ПУТ

Выполнены расчеты изменения технико-экономических показателей доменной плавки при изменении расхода ПГ от 72 до 140 м³/т чугуна и ПУТ от 0 до 200 кг/т чугуна при использовании следующих компенсирующих факторов: вывод ПГ, повышение температуры дутья до 1150 и 1200 °С и повышение содержания кислорода в дутье до 26 %.

Данные расчетов эффективности вдувания ПГ приведены в табл. 3.

В табл. 3 указаны режимы работы доменной печи: базовый режим 1 (расход ПГ составляет 71,8 м³/т чугуна), повышение температуры дутья до 1150 и 1200 °С (соответственно режимы 2 и 3) и после достижения температуры дутья 1200 °С повышение содержания кислорода в дутье до 24, 25 и 26 % (режимы 4, 5, 6).

В расчетах тепловой режим в печи определялся теоретической температурой горения. На основании промышленного опыта и расчетов принимали, что по мере

Таблица 1

Показатели качества железорудной шихты, %

Table 1. Quality indicators of iron ore charge, %

Поставщик	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	P	C	S	п.п.п.	Fe
Агломерат ЕМЗ	5,46	1,94	57,14	7,56	2,51	15,24	0,04	0,25	0,08	1,34	57,20
Окатыши Госрезерв	7,37	0,35	90,91	0,42	0,32	1,05	0,024	0,23	0,027	0,04	64,45

Таблица 2

Показатели качества кокса различных поставщиков, %

Table 2. Quality indicators of coke from various suppliers, %

Поставщик	Данные поставщика							
	W _P	A ^c	S	V	M ₂₅	M ₁₀	+80	<25
Филиал № 4 «ЕКХП» ЗАО «ВТС»	3,0	11,2	1,04	0,8	88,8	6,6	12,8	3,2
Филиал № 7 «Макеевкокс» ЗАО «ВТС»	4,7	11,1	1,12	0,2	89,5	7,5	13,8	3,9
Филиал № 6 «ЯКХЗ» ЗАО «ВТС»	4,4	10,9	0,90	86,4	86,4	7,9	10,2	3,4

Расчет эффективности вдувания ПГ на ДП-5

Table 3. Calculation of the efficiency of natural gas injection at blast furnace BF-5

Наименование	База	Компенсация температурой дутья, °С		Компенсация кислородом, %		
		1150	1200	24	25	26
Режимы доменной плавки	1	2	3	4	5	6
Производительность, %	100,0	101,0	102,1	104,3	106,2	107,6
Кокс сухой скиповой, кг/т чугуна	455,7	440,4	427,8	423,3	421,9	417,3
Коксовый орешек, кг/т чугуна	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1
Сумма кокса и коксового орешка, кг/т чугуна	490,8	475,5	462,9	458,4	457,0	452,4
Агломерат ЕМЗ, кг/т чугуна	794	794	793,5	793,5	793,5	793,5
Окатыши Госрезерв, кг/т чугуна	748,9	749	748,9	748,9	748,9	748,9
Конвертерный шлак, кг/т чугуна	65,6	66,0	65,6	65,6	65,6	65,6
Известняк обычный, кг/т чугуна	6,9	5,8	4,85	4,55	4,4	4,1
Расход сухого дутья, м ³ /т чугуна	1406	1378	1349,5	1299	1257	1224
Температура дутья, °С	1100	1150	1200	1200	1200	1200
ПГ, м ³ /т чугуна	71,8	80,0	85	95	100	110
ПУТ, кг/т чугуна	0	0	0	0	0	0
Содержание кислорода в дутье, %	22,8	22,8	22,8	24,0	25,0	26,0
Выход сухого колошникового газа, м ³ /т чугуна	1914	1882	1847	1805	1768	1743
Температура колошникового газа, °С	167	166	165	156	149	143
Степень использования СО, доли	0,402	0,399	0,400	0,392	0,386	0,378
Степень использования Н ₂ , доли	0,746	0,740	0,742	0,727	0,716	0,701
Степень прямого восстановления, доли	0,284	0,275	0,2705	0,258	0,252	0,241
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна	1902	1883	1858	1831	1801	1792
Выход восстановительных газов, м ³ /т чугуна	816	819	816	844	858	886
Выход шлака, кг/т чугуна	311	309	307	306	306	305
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	6,2	6,0	5,9	5,9	5,8	5,8
Теоретическая температура горения, °С	2092	2091	2100	2101	2112	2104
Расход условного топлива, кг/т чугуна	579,44	573,80	567,02	574,39	578,92	586,12
Изменение себестоимости чугуна, руб/т	0	-89,35	-187,62	-86,45	-18,67	76,18
Определяющие показатели:						
рудная нагрузка, т/т кокса	3,31	3,41	3,51	3,54	3,55	3,59
выход шлака, кг/т кокса	633	649	662	667	669	674
выход горнового газа, м ³ /т кокса	3875	3961	4015	3995	3941	3961
скорость газа в распаре, м/с	9,88	10,23	10,54	10,68	10,70	10,87

увеличения расхода ПГ при различных режимах доменной плавки теоретическая температура сохраняется на базовом уровне.

Повышение расхода ПГ во втором и третьем режимах (до 80 и 85 м³/т чугуна) при повышении температуры дутья до 1150 и 1200 °С позволило увеличить производительность доменной печи на 1 и 2,1 % и уменьшить расход кокса на 15,3 кг/т чугуна (3,35 %) и 27,9 кг/т чугуна (6,12 %). Себестоимость чугуна снизилась на 89,35 и 187,62 руб/т чугуна по сравнению с базовым режимом.

С увеличением расхода ПГ (до 110 м³/т чугуна) при компенсации кислородом дутья (режимы 4, 5, 6) про-

изводительность доменной печи повышается соответственно до 104,3, 106,2 и 107,6 %; расход кокса плавно снижается до 423,3 кг/т чугуна (-32,4 кг/т чугуна, -7,1 %), 421,9 кг/т чугуна (-33,8 кг/т чугуна, -7,4 %), 417,3 кг/т чугуна (-38,4 кг/т чугуна, -8,42 %). Изменение себестоимости чугуна с выпуска в указанных режимах составляет -86,45, -18,67 и +76,18 руб/т чугуна по сравнению с базовым режимом. Ухудшение себестоимости объясняется высокой стоимостью кислорода.

Выполнены расчеты эффективности доменной технологии при замене природного газа пылеугольным топливом (табл. 4).

Вдувание ПУТ в количестве 160 кг/т чугуна позволило полностью вывести из состава дутья ПГ (табл. 4, режим 2). При этом, по сравнению с базовым режимом (режим 1), производительность печи снизилась до 98,96 %, расход кокса уменьшился до 354,59 кг/т чугуна (–101,1 кг/т чугуна, –22,18 %), расход условного топлива снизился до 554,2 кг/т чугуна (–25,23 кг/т чугуна, –4,35 %), теоретическая температура горения

повысилась до 2114 °С (+22 °С), себестоимость чугуна снизилась на 593 руб/т чугуна.

При замене ПГ углем теоретическая температура горения сохранялась на базовом уровне.

После повышения расхода ПУТ свыше 160 кг/т чугуна теоретическую температуру повышали, исходя из теоретических соображений и промышленного опыта работы доменных печей [10].

Таблица 4

Расчет эффективности вдувания ПУТ на ДП-5

Table 4. Calculation of the efficiency of pulverized coal injection at blast-furnace BF-5

Наименование	База	Вывод ПГ	Компенсация температурой дутья, °С		Компенсация кислородом, %		
			1150	1200	24	25	26
	1	2	3	4	5	6	7
Режимы доменной плавки	1	2	3	4	5	6	7
Производительность, %	100,0	99,0	100,0	101,0	103,3	105,1	107,1
Кокс сухой скиповой, кг/т чугуна	455,7	354,6	336,1	318,0	311,1	303,8	306,1
Коксовый орешек, кг/т чугуна	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1
Сумма кокса и коксового орешка, кг/т чугуна	490,8	389,7	371,2	353,1	346,2	338,9	341,2
Агломерат ЕМЗ, кг/т чугуна	794	794	793,5	793,5	793,5	793,5	793,5
Окашки Госрезерв, кг/т чугуна	748,9	749	748,9	748,9	748,9	748,9	748,9
Конвертерный шлак, кг/т чугуна	65,6	66	65,6	65,6	65,6	65,6	65,6
Известняк обычный, кг/т чугуна	6,9	5,5	4,45	3,5	3,4	3,2	3,4
Расход сухого дутья, м ³ /т чугуна	1406	1336	1303	1272	1217	1175	1137
Температура дутья, °С	1100	1100	1150	1200	1200	1200	1200
ПГ, м ³ /т чугуна	71,8	0	0	0	0	0	0
ПУТ, кг/т чугуна	0,0	160,0	170	180	190	200	200
Содержание кислорода в дутье, %	22,8	22,8	22,8	22,8	24,0	25,0	26,0
Выход сухого колошникового газа, м ³ /т чугуна	1914	1826	1785	1745	1693,5	1654	1618
Температура колошникового газа, °С	167	161	159,5	154	146,5	139	131
Степень использования СО, доли	0,402	0,448	0,453	0,457	0,454	0,451	0,450
Степень использования Н ₂ , доли	0,746	0,831	0,840	0,848	0,842	0,837	0,835
Степень прямого восстановления, доли	0,284	0,303	0,300	0,297	0,300	0,287	0,287
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна	1902	1771	1736	1704	1657	1622	1585
Выход восстановительных газов, м ³ /т чугуна	816	737	728	719	729	737	740
Выход шлака, кг/т чугуна	311	310	308	306	306	306	306
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	6,2	5,5	5,3	5,1	5,1	5,0	5,0
(S)	1,15	0,95	0,91	0,87	0,85	0,84	0,84
Теоретическая температура горения, °С	2092	2114	2128	2140	2164	2178	2210
Коэффициент замены кокса ПУТ, кг/кг		0,63	0,70	0,76	0,76	0,76	0,75
Расход условного топлива, кг/т чугуна	579,44	554,21	545,69	537,63	540,79	543,53	545,79
Изменение себестоимости чугуна, руб/т чугуна	0	–593,02	–729,11	–859,6	–825,61	–801,18	–758,35
Определяющие показатели:							
рудная нагрузка, т/т кокса	3,31	4,16	4,38	4,60	4,69	4,79	4,76
выход шлака, кг/т кокса	633	795	830	866	883	901	896
выход горнового газа, м ³ /т кокса	3875	4545	4681	4826	4789	4785	4646
скорость газа в распаре, м/с	9,88	13,92	15,69	18,00	19,56	20,69	20,05

Увеличение расхода ПУТ (свыше 160 кг/т чугуна) осуществляли за счет внедрения компенсирующих мероприятий: повышения температуры дутья до 1150 и 1200 °С (соответственно режимы 3 и 4) и повышения содержания кислорода в дутье до 24, 25 и 26 % (режимы 5, 6, 7). Результаты расчетов (см. табл. 4) показывают, что вдувание ПУТ в третьем и четвертом режиме (170 и 180 кг/т чугуна) при повышении температуры дутья до 1150 и 1200 °С позволило снизить расход кокса на 119,6 кг/т чугуна (26,25 %) и 137,7 кг/т чугуна (30,2 %) при незначительном повышении производительности печи (на 1 %). Расход условного топлива при этом уменьшился на 33,75 кг/т чугуна (5,82 %) и 41,61 кг/т чугуна (7,22 %). Себестоимость чугуна снизилась на 729,4 и 859,6 руб/т чугуна.

При дальнейшем повышении расхода ПУТ (до 200 кг/т чугуна) с компенсацией кислородом дутья (режимы 5, 6, 7) производительность доменной печи линейно возрастает до 107,1 % (режим 7); расход кокса плавно снижается до 303,8 кг/т чугуна (–151,9 кг/т чугуна, 33,33 %) в режиме 6, а затем повышается в режиме 7 до 306,1 кг/т чугуна (–149,6 кг/т чугуна, 32,82 %).

Себестоимость чугуна при повышении содержания кислорода в дутье ухудшается: в режимах 5, 6, 7 изменение себестоимости составляет –825,61, –801,18 и –758,35 руб/т чугуна.

Режимы с расходом ПУТ 200 кг/т чугуна с экономической точки зрения вполне удовлетворительны, однако имеет место незначительное превышение определяющего показателя скорости газа в распаре –20 м/с (режимы 6, 7).

Высокие расчетные показатели эффективного использования ПУТ подтверждаются мировым зарубежным опытом: расход ПУТ 180 – 260 кг/т чугуна, расход кокса 230 – 270 кг/т чугуна, степень замены кокса ПУТ 35 – 50 % [17 – 23].

В настоящее время с использованием ПУТ выплавляется более 90 % чугуна в мире.

Выводы

Разработана методика расчета показателей доменной плавки на основе работ профессора Ленинградского политехнического института А.Н. Рамма, позволяющая на основе принципа полной и комплексной компенсации и компенсирующих мероприятий рассчитывать технологические режимы доменной плавки с заменой части кокса дополнительными топливами.

Подтверждена высокая экономическая эффективность использования ПГ и ПУТ в технологических условиях доменного цеха Енакиевского металлургического завода.

Увеличение расхода ПГ от базового уровня (71,8 м³/т чугуна) до 95, 100 и 110 м³/т чугуна обеспечивает ответственное повышение производительности доменной печи до 104,3, 106,2 и 107,6 % и снижение расхода

кокса до 423,3 кг/т чугуна (–32,4 кг/т чугуна, –7,1 %); 421,9 кг/т чугуна (–33,8 кг/т чугуна, –7,4 %) и 417,3 кг/т чугуна (–38,4 кг/т чугуна, –8,42 %). При аналогичном увеличении расхода ПГ изменение себестоимости чугуна с выпуска в указанных режимах составляет –86,45, –18,67 и +76,18 руб/т чугуна. Ухудшение себестоимости объясняется высокой стоимостью кислорода.

Замена природного газа пылеугольным топливом в количестве 160 кг/т чугуна позволила полностью вывести его из состава дутья. При этом, по сравнению с базовым режимом, расход кокса уменьшился до 354,59 кг/т чугуна (–101,1 кг/т чугуна, –22,18 %), расход условного топлива снизился до 554,2 кг/т чугуна (–25,23 кг/т чугуна, –4,35 %).

Повышение расхода ПУТ до 200 кг/т чугуна с компенсацией температурой дутья 1200 °С и кислородом дутья 25 % обеспечивает повышение производительности доменной печи до 105,8 %; снижение расхода кокса до 303,8 кг/т чугуна (151,9 кг/т чугуна, –33,33 %); снижение расхода условного топлива до 543,53 кг/т чугуна (–35,91 кг/т чугуна, –6,2 %).

Высокая эффективность применения ПУТ объясняется меньшей его стоимостью по сравнению с ПГ, химическим составом (прежде всего, высоким содержанием углерода) и значительно меньшим влиянием на теоретическую температуру горения и другие технологические показатели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курунов И.Ф. Доменное производство Китая, Японии, Северной Америки, Западной Европы и России // Металлург. 2010. № 2. С. 69 – 77.
2. Shen F., Yang T., Gao B. Technology progress and strategy in blast furnace ironmaking in China // Steel Research International. 2005. Vol. 76. No. 10. P. 676 – 682.
3. Zhang S., Yin H. The trends of ironmaking industry and challenges to Chinese blast furnace ironmaking in the 21st century. In: Proceedings of the 5th Int. Congress on the Science and Technology of Ironmaking (ICSTI'99) on October 20 – 22, 2009, Shanghai, China. Beijing: Chinese Society for Metals, 2009. P. 2 – 15.
4. Production and technology of iron and steel in Japan during 2018 // ISIJ International. 2019. Vol. 59. No. 6. P. 939 – 955.
5. Naito M., Tekeda K., Matsui Y. Ironmaking technology for the last 100 years: deployment to advanced technologies from introduction of technological know-how, and evolution to next-generation process // ISIJ International. 2015. Vol. 55. No. 1. P. 7 – 35.
6. Dauwels G., Clairay S., Hess E. etc. Stable and efficient blast furnace operation with high PCI and low coke rate at Arcelor Mittal Flat Carbon West Europe // Rev. Met. Paris. 2007. Vol. 104. No. 5. P. 221 – 230.
7. Lacroix Ph., Dauwels G., Dufresne P. etc. High blast furnaces productivity operations with low coke rates in the European Union // Rev. Met. Paris. 2001. Vol. 98. No. 3. P. 259 – 268.
8. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 597 с.
9. Верман Е.Ф. Металлургия чугуна / Под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
10. Ярошевский С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. – М.: Металлургия, 1988. – 176 с.

11. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. – М.: Metallurgiya, 1980. – 303 с.
12. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Л. Теплообмен в доменной печи. – М.: Metallurgiya, 1966. – 355 с.
13. Бабий В.И., Куваев В.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
14. 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). – В кн.: Творческое наследие Б.И. Китаева // Тр. Междунар. науч.-практич. конф. 11 – 14 февраля 2009 г. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. С. 138 – 148.
15. Теория и практика производства и применения доменного кокса улучшенного качества / Ю.В. Филатов, Е.Т. Ковалев, И.В. Шульга и др. – Киев: Наукова думка, 2011. – 128 с.
16. Теория и практика подготовки металлургического кокса к доменной плавке / В.Г. Гусак, А.М. Кузнецов, А.В. Емченко и др. – Киев: Наукова думка, 2011. – 216 с.
17. Langer K. Injection of pulverized coal at Thyssen Krupp Steel // Stahl und Eisen. 2005. No. 11. P. 591 – 594.
18. Majeski A., Runstedtler A., D'alesio J., Macfadyen N. Injection of pulverized coal and natural gas into blast furnaces for iron-making: lance positioning and design // ISIJ International. 2015. Vol. 55. No. 7. P. 1377 – 1383.
19. Chai Y., Zhang J., Shao Q. etc. Experiment research on pulverized coal combustion in the tuyere of oxygen blast furnace // High Temp. Mater. Proc. 2019. No. 38. P. 42 – 49.
20. Ueki Y., Yoshiie R., Naruse I. Combustion behavior of pulverized coal and ash particle properties during combustion // ISIJ International. 2015. Vol. 55. No. 6. P. 1305 – 1312.
21. Babich A., Senk D., Born S. Interaction between co-injected substances with pulverized coal into the blast furnace // ISIJ International. 2014. Vol. 54. No. 12. P. 2704 – 2712.
22. Nozawa K., Kasai A., Matsui Y. etc. Combustion behaviors of fine coal and its impact on gas permeability at lower part of blast furnace under high pulverized coal rate operation // ISIJ International. 2011. Vol. 51. No. 8. P. 1336 – 1343.
23. Nomura S., Callcott T. Maximum rates of pulverized coal injection in ironmaking blast furnaces // ISIJ International. 2011. Vol. 51. No. 7. P. 1033 – 1043.

Поступила в редакцию 16 июля 2019 г.
 После доработки 3 сентября 2019 г.
 Принята к публикации 19 октября 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 11, pp. 833–839.

EFFICIENCY OF INJECTION OF NATURAL GAS AND PULVERIZED COAL AT IRONMAKING

S.L. Yaroshevskii¹, V.V. Kochura¹, A.M. Kuznetsov²,
 A.S. Khaibulaev², Z.K. Afanas'eva¹

¹Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

²Yenakievo Iron and Steel Works, Yenakievo, Ukraine

Abstract. The method for calculating indicators of blast furnace smelting with replacement of part of coke with additional fuels has been developed on the basis of full and complex compensation and compensating measures. Efficiency of the use of natural gas and pulverized coal in the blast furnace conditions of the Enakievo Metallurgical Plant was calculated and it has been confirmed as rather high. Increase in the consumption of natural gas from the baseline (71.8 m³/t of iron) to 110 m³/t ensures a corresponding increase in productivity of the blast furnace to 107.6 % and a decrease in the consumption of coke to 417.3 kg/t of iron (–38.4 kg/t, –8.42 %). Replacing natural gas with pulverized coal in the amount of 160 kg/t of iron made it possible to completely remove it from the blast. At the same time, coke consumption decreased to 354.59 kg/t of iron (–101.1 kg/t; –22.18 %). Increasing the consumption of pulverized coal fuel up to 200 kg/t of iron with compensation of the blast temperature of 1200 °C and oxygen of the blast of 25 % provides an increase in the productivity of the blast furnace to 105.8 % and reduction of coke consumption to 303.8 kg/t of iron (–151.9 kg/t, –33.33 %). High efficiency of the use of pulverized coal in conditions of the Enakievo Metallurgical Plant is explained by its lower cost compared to natural gas, high carbon content in coal and a significantly lower effect on the theoretical combustion temperature and other technological parameters.

Keywords: natural gas, pulverized coal, coke, blast, oxygen, iron, capacity, blast furnace.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-11-833-839

REFERENCES

1. Kurunov I.F. Blast-furnace smelting in China, Japan, North America, Western Europe, and Russia. *Metallurgist*. 2010, vol. 54, no. 1-2, pp. 114–126.
2. Shen F., Yang T., Gao B. Technology progress and strategy in blast furnace ironmaking in China. *Steel Research International*. 2005, vol. 76, no.10, pp. 676–682.
3. Zhang S., Yin H. The trends of ironmaking industry and challenges to Chinese blast furnace ironmaking in the 21st century. In: *Proceedings of the 5th Int. Congress on the Science and Technology of Ironmaking (ICSTI'99) on October 20 - 22, 2009, Shanghai, China*. Beijing: Chinese Society for Metals, 2009, pp. 2–15.
4. Production and technology of iron and steel in Japan during 2018. *ISIJ International*. 2019, vol. 59, no. 6, pp. 939–955.
5. Naito M., Tekeda K., Matsui Y. Ironmaking technology for the last 100 years: deployment to advanced technologies from introduction of technological know-how, and evolution to next-generation process. *ISIJ International*. 2015, vol. 55, no. 1, pp. 7–35.
6. Dauwels G., Clairay S., Hess E. etc. Stable and efficient blast furnace operation with high PCI and low coke rate at Arcelor Mittal Flat Carbon West Europe. *Rev. Met. Paris*. 2007, vol. 104, no. 5, pp. 221–230.
7. Lacroix Ph., Dauwels G., Dufresne P. etc. High blast furnaces productivity operations with low coke rates in the European Union. *Rev. Met. Paris*. 2001, vol. 98, no. 3, pp. 259–268.
8. Tovarovskii I.G. *Domennaya plavka. Evolyutsiya, khod protsessov, problemy i perspektivy* [Blast furnace smelting. Evolution, progress of processes, problems and prospects]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2003, 597 p. (In Russ.).
9. Vegman E.F. *Metallurgiya chuguna* [Iron-making]. Moscow: Akademkniga, 2004, 774 p. (In Russ.).
10. Yaroshevskii S.L. *Vyplavka chuguna s primeneniem pyleugol'nogo topliva* [Ironmaking with pulverized coal]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 176 p. (In Russ.).
11. Ramm A.N. *Sovremennyy domenny protsess* [Modern blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 303 p. (In Russ.).
12. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Lazarev B.L. *Teploobmen v domenoynoi pechi* [Heat exchange in a blast furnace]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 355 p. (In Russ.).
13. Babii V.I., Kuvaev V.F. *Gorenie ugol'noi pyli i raschet pyleugol'nogo fakela* [Combustion of coal dust and calculation of pulverized coal torch]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 208 p. (In Russ.).

14. Yaroshevskii S.L., Afanas'eva Z.K., Kuzin A.V. Main principles of calculation and organization of blast furnace technology with replacing of 30 – 60 % of coke by additional fuels (domestic and foreign experience) In.: *Tvorcheskoe nasledie B.I. Kitaeva. Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 11-14 fevralya 2009 g. Ekaterinburg* [Creative Heritage of B.I. Kitaev: Proceedings of the Int. Sci. and Pract. Conf. on February 11-14, 2009, Ekaterinburg]. Ekaterinburg: USTU-UPI, 2009, pp. 138–148. (In Russ.).
15. Filatov Yu.V., Kovalev E.T., Shul'ga I.V. etc. *Teoriya i praktika proizvodstva i primeneniya domennogo koksa uluchshennogo kachestva* [Theory and practice of production and use of coke of improved quality]. Kiev: Naukova dumka, 2011, 128 p. (In Russ.).
16. Gusak V.G., Kuznetsov A.M., Emchenko A.V. etc. *Teoriya i praktika podgotovki metallurgicheskogo koksa k domennoi plavke* [Theory and practice of preparing metallurgical coke for blast furnace smelting]. Kiev: Naukova dumka, 2011, 216 p. (In Russ.).
17. Langer K. Injection of pulverized coal at ThyssenKrupp Steel. *Stahl and Eisen*. 2005, no. 11, pp. 591–594.
18. Majeski A., Runstedtler A., D'alessio J., Macfadyen N. Injection of pulverized coal and natural gas into blast furnaces for iron-making: lance positioning and design. *ISIJ International*. 2015, vol. 55, no. 7, pp. 1377–1383.
19. Chai Y., Zhang J., Shao Q. etc. Experiment research on pulverized coal combustion in the tuyere of oxygen blast furnace. *High Temp. Mater. Proc.* 2019, no. 38, pp. 42–49.
20. Ueki Y., Yoshiie R., Naruse I. Combustion behavior of pulverized coal and ash particle properties during combustion. *ISIJ International*. 2015, vol. 55, no. 6, pp. 1305–1312.
21. Babich A., Senk D., Born S. Interaction between co-injected substances with pulverized coal into the blast furnace. *ISIJ International*. 2014, vol. 54, no. 12, pp. 2704–2712.
22. Nozawa K., Kasai A., Matsui Y. etc. Combustion behaviors of fine coal and its impact on gas permeability at lower part of blast furnace under high pulverized coal rate operation. *ISIJ International*. 2011, vol. 51, no. 8, pp. 1336–1343.
23. Nomura S., Callcott T. Maximum rates of pulverized coal injection in ironmaking blast furnaces. *ISIJ International*. 2011, vol. 51, no. 7, pp. 1033–1043.

Information about the authors:

S.L. Yaroshevskii, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Sci. Advisor of the Chair “Ore-Thermal Processes and Low-Waste Technologies” (ira.brust@ukr.net)

V.V. Kochura, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Ore-Thermal Processes and Low-Waste Technologies” (kochura@ukr.net)

A.M. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Blast-Furnace Workshop (aleksandr.kuznetsov@emzsteel.com)

A.S. Khaibulaev, Head of Research Group of Agglomeration and Blast-Furnace Department of the Engineering Office (amina@wn.dn.ua)

Z.K. Afanas'eva, Senior Lecturer of the Chair “Ore-Thermal Processes and Low-Waste Technologies” (zoya_afanaseva@mail.ru)

Received July 16, 2019
Revised September 3, 2019
Accepted October 19, 2019