



Международная  
научно-практическая конференция  
«Теория и практика тепловых процессов  
в металлургии»  
(18-21 сентября 2012 г.)



# **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ**

Ярошевский С.Л., Шульга И.В., Хлапонин Н.С.,  
Кузин А.В., Мишин И.В.

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»,  
Украинский государственный научно-исследовательский  
углехимический институт,  
г.Донецк, Украина

Одной из определяющих причин высокой стоимости черных металлов – 550 \$/т – является расход топлива, составляющий от 900 до 1500 кг условного топлива (у.т.) на 1 т готовой продукции. До 50-70 % указанных энергоресурсов расходуется при производстве чугуна, причем, преимущественно, в виде весьма дорогих и дефицитных кокса и природного газа (ПГ), стоимость которых составляет 30-40 % себестоимости чугуна.

Принимая во внимание изложенное, минимальный расход кокса, достигнутый в развитых странах Европы и Азии, – 250-350 кг/т чугуна, реальные перспективы снижения показателя в ближайшие годы до 200 кг/т чугуна и ниже, очевидно, что снижение расхода кокса и ПГ являются определяющим резервом снижения себестоимости чугуна, повышения рентабельности и конкурентоспособности украинской металлургии.

Основы принципа полной и комплексной компенсации технологии при снижении расхода кокса, методика расчета на его основе показателей доменной плавки, анализ отечественного и зарубежного опыта описаны ранее [1-5].

Расчеты показывают, что на основе принципа полной и комплексной компенсации и за счет корректного выбора компенсирующих мероприятий возможно проектирование технологических режимов с заменой до 60-80 % кокса дополнительными топливами, прежде всего – ПУТ, снижение расхода скипового кокса до 100-200 кг/т чугуна, что для черной металлургии Украины является одной из наиболее актуальных и перспективных задач [2,5,6].

### **1. Пылеугольное топливо - основа для создания малококсовой доменной технологии: 100-200 кг/т чугуна**

Идея замены части кокса ПУТ защищена патентом еще в 1831 г. [7]. Однако массовое промышленное внедрение ПУТ-технологии началось, по существу, в 80-90 гг. XX века, после теоретического исследования вопроса и разработки специализированного оборудования, обеспечивающего вдувание ПУТ в доменные печи в полном соответствии с требованиями технологии, взрыво- и пожаробезопасности, экологии и др. Итогом данной работы стало введение в 70-80-х годах прошлого столетия в эксплуатацию первых промышленных установок фирмы «Armco Steel» (г. Эшленд, США) и Донецкого металлургического завода (Украина) [8-10].

Соответствующим образом в 70-80-х гг. прошлого века изменилась и мировая конъюнктура: повысилась дефицитность и стоимость ПГ и мазута, подтверждена качественно меньшая эффективность замены кокса ПГ и мазутом по сравнению с ПУТ, началось повышение стоимости кокса, в основном, из-за дефицита коксующихся углей.

В результате бурного развития ПУТ-технологии после 1980 г. в настоящее время с применением ПУТ выплавляется более 400 млн. т чугуна в 30 странах, более чем в 120 современных доменных печах; за прошедшие 30 лет доля замены кокса ПУТ возросла от 10-20 до 40-45 %; определилась перспектива дальнейшего повышения эффективности ПУТ-технологии. Это следует, прежде всего, из опыта эксплуатации доменных печей и принципа полной и комплексной компенсации нарушений технологии, определяемых горением ПУТ в фурменных зонах и снижением доли кокса в шихте [2,3,4,5].

Однако теоретические соображения и расчеты показывают принципиальную возможность замены ПУТ до 60-80 % кокса [1,2,5,6].

Для решения данных проблем необходимо:

- улучшение качества железорудной шихты по прочности, содержанию железа и мелочи 5-0 мм с целью сохранения газодинамики плавки и снижения выхода шлака до 300 кг/т чугуна и ниже;
- улучшение прочностных показателей качества и фракционного состава кокса с целью обеспечения газодинамики печи и сохранения или улучшения производительности печи;
- улучшение качества ПУТ, прежде всего, по содержанию золы и серы;
- повышение температурно-кислородного потенциала горна и фурменной зоны, прежде всего, с целью интенсификации сгорания ПУТ и нагрева продуктов плавки.

Ниже рассмотрены перспективы решения данных и других вопросов.

## 2. Железорудное сырье

В качестве основного сырья для доменной плавки с минимальным расходом кокса (100-200 кг/т чугуна) может быть использован агломерат, производство которого в настоящее время в массовом количестве освоено на современных аглофабриках в Европе [11-14].

Характерным для указанных агломерационных машин является: основной компонент шихты – богатая гематитовая руда; низкий расход вторсырья и колошниковой пыли – 32-94 кг/т агломерата, а также извести – 6-16 кг/т агломерата. Как правило, в агломерационную шихту в качестве магнийсодержащей добавки дают оливин в количестве 20-34 кг/т агломерата.

Общим для рассматриваемых машин является применение отсева мелочи в количестве 30-185 кг/т агломерата, что указывает на выполнение 2-3 кратного грохочения агломерата на агломашинах и отсев мелочи, крупностью 5-0 мм, из агломерата и окатышей на доменных печах. Это позволяет производить для доменных печей высококачественный стабилизированный агломерат с содержанием мелочи 5-0 мм не более 3-5 %.

Агломерат всех машин, несмотря на повышенную основность, имеет высокое содержание железа (55,08-59,86 %); все агломераты содержат 4,33-6,32 % кремнезема, что близко к теоретическому значению для получения прочного агломерационного спека (не более 5 %  $\text{SiO}_2$ ).

В качестве 2-го компонента доменной шихты могут использоваться окатыши, содержащие более 65 %, железа, также производимые в массовом количестве на отечественных и зарубежных фабриках.

В зарубежной практике в шихту практических всех современных доменных печей поступает также богатая железная руда из Бразилии или Австралии в количестве на 1 т чугуна 30-300 кг, что имеет убедительные экономические и технологические преимущества [6-8].

Указанные шихтовые материалы в основном отвечают требованиям малокосовой доменной технологии [3-5].

## 3. Качество кокса

Главная и определяющая роль кокса в доменной плавке – обеспечение газопроницаемости столба шихты по высоте печи – от лещади до уровня засыпи шихты.

За время развития доменной технологии расход топлива на 1 т чугуна снизился от 3500 до 500 кг; при этом почти так же – от 80-100 до 15-25 % – снизилась реакционная способность топлив соответственно древесного угля и современного кокса.

Высокоэффективную технологию с расходом ПУТ 240-300 кг/т чугуна и более удастся внедрить лишь на предприятиях, имеющих кокс с показателями CRI 17-25 % и CSR 65-74 %, что подтверждено соответствующими требованиями к качеству кокса [3,15-18]. В работе [15] показано, что расход ПУТ 220 кг/т чугуна и более может быть обеспечен при условии повышения показателя CRS до 70 %.

Расчёты показывают, что для повышения до 60-80 % замены кокса дополнительным топливом необходимо соответствующее повышение свойств металлургического кокса: CSR – до 80-85 %, CRI – до 5-10 %, содержание фракции (40-80) мм в скиповом коксе – до 90-95 % [16-19].

Анализ изменения качества кокса в последние 30-50 лет за рубежом, мнение специалистов-коксохимиков дают основания считать, что это задача технически разрешимая, связанная, однако, со значительным улучшением качества угольной шихты, повышением периода коксования, совершенствованием режима охлаждения кокса и подготовки его к плавке. Безусловно, указанные изменения определяют и повышение стоимости кокса [16-19].

Важнейшим вопросом при улучшении качества кокса является повышение в коксошихте доли высококачественных спекающихся углей. Опыт ведущих Европейских стран (1990-2010 гг.) показывает, что массовое промышленное внедрение ПУТ в доменном производстве способствует решению этой задачи за счет возможности сокращения объема производства металлургического кокса, высвобождения соответствующего количества

коксуемых углей, которые используются для повышения их доли в коксошихте производимого кокса.

В частности, уровень зольности  $A^d$  шихты для производства такого кокса не должен превышать 5 %, сернистость – 1 %, выход летучих веществ из горючей массы  $V^{daf}$  должен быть в пределах 28-29 %, толщина пластического слоя 14-15 мм. Индекс основности угольной шихты должен быть не более 0,7.

Для обеспечения требуемых значений реакционной способности и послереакционной прочности тушение кокса должно производиться сухим способом с последующей обработкой поверхности кокса растворами соединений р-элементов (например, боратов), ингибирующих процессы газификации углерода [19-20].

Весьма значительны и практически не использовано в Украине для улучшения качества кокса потенциал подготовки металлургического кокса к доменной плавке: оптимизация фракционного состава кокса, выделение из отсева и использование в доменной печи коксового орешка (10-40) мм [20-24].

Теоретические разработки, отечественный и зарубежный опыт показывают, что повышение доли фракций 40-80 мм в скиповом коксе до 90-95 %, использование 50-150 кг/т чугуна коксового орешка (КО) в смеси с железорудной шихтой создают предпосылки для снижения расхода кокса на 10-12 %, повышения производительности доменных печей за счет:

- снижения потерь кокса с отсевом – (7-10) кг/т чугуна, и содержания мелочи (10-0) мм в скиповом коксе;
- производства в необходимых количествах КО фракцией (5-10)-(35-40) мм с содержанием мелочи не выше 5 %;
- повышения газопроницаемости коксовой линзы шихты за счет улучшения фракционного состава, однородности и прочности скипового кокса;
- повышения газопроницаемости рудной линзы шихты за счет введения КО;
- повышения оптимального расхода ПУТ на 10-20 % за счет суммарного улучшения газопроницаемости шихты на 14-17 % [21];
- интенсификации процесса прямого восстановления оксида железа за счет КО.

Повышение прочностных показателей качества кокса, содержания в скиповом коксе фракции (40-80) мм до 90-95 % и введение в состав железорудной шихты КО в решающей мере предопределяет возможность повышения расхода ПУТ до 200 кг/т чугуна и выше и соответственного снижения расхода кокса.

#### **4. Качество пылеугольного топлива**

В конкретных технологических условиях уголь для приготовления ПУТ выбирают, прежде всего, исходя из эффективности приготовленного из него ПУТ, а также конъюнктуры – ресурсов, стоимости, дальности перевозок и др.

Специфика доменной технологии предопределяет в качестве основного требования к качеству ПУТ – необходимость содержания в нем золы и серы на уровне меньшем, чем в используемом коксе.

Эффективность использования низкозольного ПУТ многократно подтверждена мировой практикой [5,8,9].

Для получения качественных зависимостей для оценки оптимального вида угля для производства ПУТ по методу проф. Рамма А.Н. выполнен расчет [24]. В расчете было учтено изменение стоимости угля для приготовления ПУТ с различным содержанием золы: изменение содержания золы в угле относительно базового значения на  $\pm 1$  % изменяло его стоимость на  $\mp 2,5$  %.

Из рис. 1 следует, что снижение зольности ПУТ экономически выгодно, поскольку по мере снижения золы коэффициент замены кокса ПУТ и коэффициент компенсации кокса ПГ возрастают; причем при зольности ПУТ до 5 % суммарный коэффициент замены углерода кокса углеродом ПУТ повышается до 1,1 кг/кг. Соответственно снижаются расходы кокса, природного газа, условного топлива и себестоимости чугуна, повышается – производительность доменной печи. Сопутно снижению зольности снижаются также расход

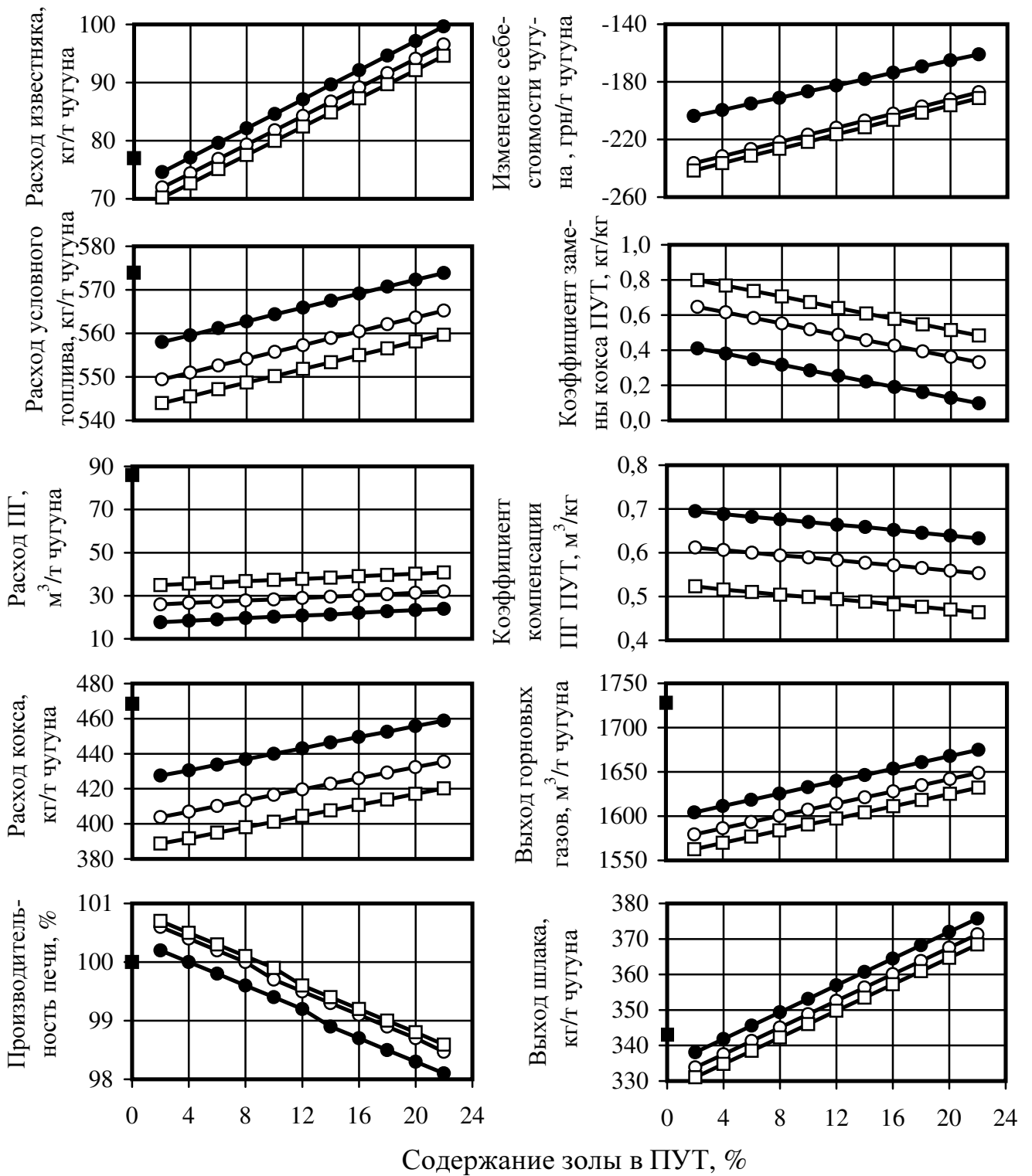


Рис.1. Изменение основных технико-экономических показателей доменной печи № 5 ПАО "ЕМЗ" при вдувании в горн 100 кг/т чугуна пылеугольного топлива:

- - базовые значения показателей (без применения ПУТ);
- - ПУТ, приготовленное из угля марки Г (Кузбасс);
- - ПУТ, приготовленное из углей марки Т (50 % Кузбасс + 50 % Донбасс);
- - ПУТ, приготовленное из угля марки А (Донбасс).

флюса и выход шлака, выход горновых газов, что, в основном, и обеспечивает прирост коэффициента замены кокса ПУТ.

Указанные сопутствующие изменения являются также эффективными компенсирующими факторами, т.е. низкосолевое ПУТ само по себе становится компенсирующим мероприятием, способствующим стабилизации технологии, повышению оптимального расхода ПУТ и эффективности его применения.

#### **5. Обоснование и расчет технологических режимов с низким расходом кокса**

Расчет выполнен для доменных печей Енакиевского и Донецкого металлургических заводов (табл. 1 и 2). В качестве основных компенсирующих мероприятий приняли:

- кокс «Премиум» и современная система подготовки кокса к плавке с высевом КО;
- агломерат повышенной основности ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2=1,9$ );
- температур дутья 1200 °С ;
- доля окатышей в железорудной шихте до 100 % за счет исключения применения привозного агломерата (ПрАО «Донецксталь-МЗ»).

Эффективность приведенных в табл. 1 и 2 компенсирующих мероприятий подтверждена отечественной и зарубежной практикой их внедрение не требует значительных времени и капитальных затрат, их компенсирующие возможности, прежде всего, в части улучшения газодинамики подтверждены как расчетом, так и практикой работы доменных печей.

Из табл. 1 и 2 следует, что в результате реализации компенсирующих мероприятий себестоимость чугуна повысилась, однако, одновременно были обеспечены как существенное улучшение ТЭП плавки, так и качественное улучшение технологических параметров, определяющих эффективность применения ПУТ: выходы шлака и горновых газов, приход серы с шихтой, расход известняка и др.

Для оперативного управления технологическими параметрами при повышении расхода ПУТ использовали вывод из состава дутья ПГ, обогащение дутья кислородом и его увлажнение.

Из табл. 1 (режимы 1 и 15) и табл. 2 (режимы 1 и 14) следует, что принятые меры позволили повысить оптимальный расход ПУТ соответственно до 200 и 215 кг/т чугуна, полностью исключить из состава дутья ПГ (на 87,2 и 95 м<sup>3</sup>/т чугуна), снизить суммарный расход кокса и коксового орешка на 197,3 и 236,8 кг/т чугуна (42,1 и 44,3 %), условного топлива – на 95,9 и 135,6 кг/т чугуна (16,7 и 20,7 %), себестоимость чугуна – на 337,03 и 238,59 грн/т чугуна, повысить производительность доменных печей на 24,3 и 34,0 %.

Предложенный вариант доменной технологии, по существу, является аналогом современной технологии, осваиваемой в последние 25 лет в зарубежной практике, что позволило повысить расход ПУТ до 150-250 кг/т чугуна, снизить расход кокса до 240-300 кг/т чугуна, повысить производительность печей до 2,3-3,2 т/м<sup>3</sup> сутки [3-5].

Из табл. 4 (режимы 1 и 15) и табл. 5 (режимы 1 и 14) следует, что освоение малококсовой технологии сопровождалось улучшением параметров, характеризующих качество и стабильность технологического режима: так, степень использования восстановительной способности газа повысилась на 5,1-6,9 % (абс.), температура колошникового газа снизилась на 66-67°С.

Из таблицы 1 и 2 (периоды 15 и 14) следует, что реализация предлагаемых мероприятий на Енакиевском и Донецком металлургических заводах обеспечивает замену ПУТ и КО 63,5-63,1 % кокса.

#### **Выводы**

1. Расчеты показывают, что на основе принципа полной и комплексной компенсации и за счет корректного выбора компенсирующих мероприятий возможны проектирование и реализация технологических режимов доменной плавки с заменой до 60-80 % кокса дополнительными топливами, прежде всего – ПУТ, снижение расхода скипового кокса до 100-200 кг/т, что для черной металлургии Украины является одной из наиболее актуальных и перспективных задач.

Таблица 1 - Расчет эффективности вдувания ПУТ для условий ПАО "ЕМЗ" (База - дп 5, период 01.12.2007-31.03.2008)

Наименование	База	Повышение температуры дутья до 1200 С	Применение высокоосновного агломерата	Введение ЦОК	Введение Бразильской руды	Введение металлодобавки	Снижение конвертного шлака	Применение кокса Преминум, введение коксового орешка	Повышение давления под колосниковом до 1,8атм	Оптимизация технологического режима	Снижение основности шлака	Вдувание пылеугольного топлива приготовленного из смеси углей 50 % "Г" (Украина, Донбасс) + 50 % "Т" (р-з Стелпой, Кузбасс)				
												185	190	195	14	15
Режимы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Производительность, %	100,0	104,9	105,7	106,7	107,5	110,4	110,4	114,4	116,9	117,9	119,0	119,8	120,5	121,4	124,3	
Производительность, т/сутки	2875	3016	3040	3069	3091	3175	3173	3288	3360	3389	3421	3444	3465	3491	3573	
Кокс сухой складной, кг/т чугуна	468,5	440,0	436,5	433,5	431,2	419,7	418,2	301,4	297,4	293,4	290,3	181,2	176,8	172,5	171,2	
Коксовый орешек, кг/т чугуна	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Сумма кокса и коксового орешка, кг/т чугуна	468,5	440,0	436,5	433,5	431,2	419,7	418,2	401,4	397,4	393,4	390,3	281,2	276,8	272,5	271,2	
Агломерат ЕМЗ В=1,3, кг/т чугуна	650	650	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Агломерат ЕМЗ В=1,9, кг/т чугуна	0	0	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	
Бразильская железная руда, кг/т чугуна	0	0	0	0	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	
Окатыши СевГОК, кг/т чугуна	959	959	1001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Окатыши ЦГОК, кг/т чугуна	0	0	0	969	768	701	714	714	714	714	714	714	714	714	714	
Конвертерный шлак, кг/т чугуна	95	95	95	95	95	95	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
Металлодобавка, кг/т чугуна	0	0	0	0	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
Известняк обычный, кг/т чугуна	77	74	31	46	35	25	44	43	42	42	26	35	35	35	36	
Расход сухого дутья, м <sup>3</sup> /т чугуна	1250	1139	1127	1116	1108	1081	1076	1039	1031	1023	1012	899	884	866	823	
Температура дутья, °С	1027	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	
Расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	87,2	87,2	87,2	87,2	87,2	87,2	87,2	87,2	87,2	87,2	87,2	0,0	0,0	0,0	0,0	
Содержание кислорода в дутье, %	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	23,5	23,9	24,4	25,7	
Влажность дутья, гр/м <sup>3</sup>	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	14,00	
Температура колосникового газа, С	216	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199	171	168	163	149	
Степень использования газа СО, %	39,6	41,0	40,5	40,9	40,8	39,7	40,2	40,2	40,2	40,2	40,1	45,0	45,0	45,0	44,7	
Степень прямого восстановления, %	37,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	43,3	42,9	42,6	41,0	
Выход горючих газов, м <sup>3</sup> /т чугуна	1728	1591	1575	1562	1552	1519	1512	1466	1456	1447	1432	1225	1212	1197	1168	
Выход восстановительных газов, м <sup>3</sup> /т чугуна	754	703	697	692	688	676	673	657	653	649	644	534	537	539	553	
Выход шлака, кг/т чугуна	342	337	343	314	308	296	274	272	272	272	262	275	275	275	276	
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	7,5	7,1	7,0	6,9	6,9	6,7	6,6	4,2	4,1	4,1	4,1	4,6	4,6	4,6	4,6	
Основность шлака СаО/SiO <sub>2</sub> , единиц	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	
Содержание серы в чугуне, %	0,046	0,044	0,043	0,045	0,045	0,045	0,051	0,032	0,032	0,032	0,044	0,048	0,048	0,048	0,048	
Теоретическая температура горения, С	1920	2005	2001	1998	1995	1986	1984	1970	1967	1964	1960	2093	2095	2099	2097	
Коэффициент замены кокса ПУТ, кг/кг												0,59	0,60	0,60	0,60	
Коэффициент компенсации ПГ ПУТ, м <sup>3</sup> /кг												0,47	0,46	0,45	0,44	
Расход условного топлива, кг/т чугуна	573,9	545,2	541,7	538,6	536,3	524,8	523,2	508,4	504,4	500,3	497,1	472,9	473,5	474,3	478,0	
Ожидаемое изменение себестоимости чугуна с выпуска, грн/т	0,00	-64,42	-31,62	-34,91	-33,83	-70,14	-55,30	100,62	85,02	72,38	60,34	-340,16	-344,07	-346,85	-337,03	
Определяющие показатели:																
Рудная нагрузка, т/т кокса	3,6	3,9	4,0	4,0	4,0	4,1	4,0	4,2	4,2	4,2	4,3	5,9	6,0	6,1	6,2	
Выход шлака, кг/т кокса	730	766	786	725	714	705	656	679	684	690	672	979	995	1011	1018	
Выход горючего газа, м <sup>3</sup> /т кокса	3688	3772	3744	3746	3736	3746	3753	3818	3836	3855	3840	4355	4380	4392	4305	
Приход мелочи (0-5 мм) с шихтой, кг/т кокса	341	363	371	356	349	356	343	357	361	364	367	510	518	526	529	
Скорость газа в расходе, м/с	11,3	12,0	12,6	11,6	10,9	10,7	9,4	6,2	5,5	5,4	5,6	15,5	17,3	19,6	19,6	

Цены шихтовых материалов приняты за апрель 2012 г.

В расчете принимали стоимость, грн/т (грн/1000 м<sup>3</sup>): кокс 2400; агломерат 850; окатыши 1160-1200, бразильская руда 1250, металлодобавка 1500

Таблица 2 - Расчет эффективности применения компенсирующих мероприятий и вдувания ПУТ для условий ПрАО "ДЦЗ" (база - дп 2, период 01.07.2002-15.08.2002)

Наименование	База	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Вдувание пылеугольного топлива		
													205	210	215
Режимы		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Производительность, %	100,0	110,1	116,5	117,9	121,8	127,1	126,1	130,1	130,1	133,1	134,1	135,1	131,8	131,6	134,0
Производительность, т/сутки	1861	2049	2167	2194	2266	2366	2346	2420	2420	2476	2495	2514	2454	2449	2493
Кокс сухой свежий, кг/т чугуна	534,0	497,2	476,2	469,4	455,4	440,9	444,0	444,0	444,0	444,0	444,0	444,0	444,0	444,0	444,0
Кокс сухой орешек, кг/т чугуна	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Сумма кокса и коксового орешка, кг/т чугуна	534,0	497,2	476,2	469,4	455,4	440,9	444,0	444,0	444,0	444,0	444,0	444,0	444,0	444,0	444,0
Агломерат ММК им. Ильича, кг/т чугуна	857	857	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Окатыши СевОК 2002 года, кг/т чугуна	117	117	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Окатыши СевОК 2012 года, кг/т чугуна	0	0	740	740	740	740	740	740	740	740	740	740	740	740	740
Окатыши МихОК, кг/т чугуна	187	187	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Окатыши ЦГОК 2002 года, кг/т чугуна	561	561	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Окатыши ЦГОК 2012 года, кг/т чугуна	0	0	810	826	743	743	743	743	743	743	743	743	743	743	743
Руда железная, кг/т чугуна	21	21	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Металлодобавка, кг/т чугуна	0	0	0	0	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Шлак SIMp, кг/т чугуна	7	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Известь, кг/т чугуна	0	0	0	0	0	0	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Известняк обычный, кг/т чугуна	149	146	215	196	183	71	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Известняк доломитизированный, кг/т чугуна	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	90,0	1069	88,3	87,8	87,4	74,9	90,1	90,2	90,7
Расход сухого дутья, м <sup>3</sup> /т чугуна	1504	1253	1187	1165	1134	1089	1098	1098	1069	1059	1051	1041	998	998	958
Температура дутья, °С	1022	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0
Содержание кислорода в дутье, %	22,9	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Влажность дутья, гр/м <sup>3</sup>	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Температура колониювого газа, С	232	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	177	178	166
Степень использования газа СО, %	40,0	42,0	45,7	46,0	44,7	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	44,1	47,0	47,1	46,9
Степень прямого восстановления, доли	0,333	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,379	0,376	0,362
Степень прямого восстановления, %	33,3	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	37,9	37,6	36,2
Выход горювых газов, м <sup>3</sup> /т чугуна	2090	1801	1716	1689	1648	1590	1603	1566	1566	1552	1542	1529	1402	1405	1379
Выход восстановительных газов, м <sup>3</sup> /т чугуна	929	860	825	813	797	772	778	762	762	757	752	747	650	653	666
Выход шлака, кг/т чугуна	458	452	319	297	282	279	286	284	284	284	283	276	294	294	295
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	7,6	7,1	6,7	6,6	6,4	6,1	6,1	4,0	4,0	4,0	3,9	3,9	4,7	4,7	4,7
Основность шлака СаО/SiO <sub>2</sub> единиц	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,20	1,20	1,20	1,20
Содержание серы в чугуне, %	0,032	0,031	0,044	0,047	0,048	0,047	0,039	0,025	0,025	0,025	0,025	0,029	0,033	0,033	0,033
Теоретическая температура горения, С	1960	2109	2088	2081	2070	2053	2057	2046	2046	2041	2038	2034	2109	2099	2094
Коэффициент замены кокса ПУТ, кг/кг													0,54	0,55	0,54
Коэффициент компенсации ПП ПУТ, м <sup>3</sup> /кг													0,46	0,45	0,44
Расход условного топлива, кг/т чугуна	655,1	617,9	596,7	589,9	575,6	561,0	564,2	550,9	550,9	545,7	541,4	538,2	515,9	515,9	519,5
Ожидаемое изменение себестоимости чугуна с вдушкой, гр/т	0,00	-91,26	93,42	80,13	14,78	12,64	41,81	206,82	206,82	186,47	172,92	157,78	-241,59	-247,44	-238,59
Определяющие показатели:															
Рудная нагрузка, т/т кокса	3,3	3,5	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5	3,7	3,7	3,7	3,7	3,8	5,1	5,2	5,2
Выход шлака, кг/т кокса	858	909	670	633	619	633	643	666	666	673	679	666	968	984	991
Выход горювого газа, м <sup>3</sup> /т кокса	3914	3838	3845	3832	3848	3782	3792	3882	3882	3904	3924	3915	4620	4705	4639
Приход мелочи (0-5 мм) с шихтой, кг/т кокса	322	346	184	180	196	203	201	210	210	212	214	216	295	299	301
Скорость газа в расходе, м/с	12,3	13,7	10,6	10,3	10,1	9,7	9,8	7,5	7,5	6,5	6,3	6,5	17,8	20,0	20,1

Цены шихтовых материалов приняты за июль 2012 г.

В расчете принимали стоимость, гр/т (грн/1000 м<sup>3</sup>): кокс 2000; кокс Премум 2500; ПГ 4000; агломерат 1060; окатыши 1225-1350; металлодобавка 1500



2. Расчёты показывают, что для повышения до 60-80 % коэффициента замены кокса дополнительным топливом необходимо соответствующее повышение свойств металлургического кокса: CSR – до 80-85 % и CRI – до 5-10 %, содержание фракции (40-80) мм в скиповом коксе – до 90-95 %.

Анализ специальной литературы, изменение качества кокса в последние 30-50 лет за рубежом, мнение специалистов-коксохимиков дают основания считать, что это технически разрешимая задача, связанная, однако, со значительным улучшением качества угольной шихты, повышением периода коксования, совершенствованием режима охлаждения кокса и подготовки его к плавке, повышением стоимости кокса.

3. Теоретические разработки, отечественный и зарубежный опыт показывают, что повышение доли фракций 40-80 мм в скиповом коксе до 90-95 %, использование 50-150 кг/т чугуна коксового орешка в смеси с железорудной шихтой создают предпосылки для снижения расхода кокса на 10-12 %, повышения производительности доменных печей.

Зарубежный опыт показывает целесообразность и эффективность интенсификации подготовки кокса к плавке и увеличения расхода коксового орешка до 30 и даже 50 % от расхода твердого топлива, что в итоге может обеспечить повышение замены скипового кокса коксовым орешком и ПУТ до 60-80 % и снижение расхода скипового кокса на 1 т чугуна до 100-200 кг.

4. Расчеты показывают, что снижение зольности ПУТ экономически выгодно, поскольку по мере снижения  $A^c$  коэффициент замены кокса ПУТ и коэффициент компенсации кокса природным газом возрастают, причем, при зольности ПУТ до 5 % суммарный коэффициент замены углерода кокса углеродом ПУТ повышается до 1,1-1,2 кг/кг. Соответственно снижаются расходы кокса, природного газа, условного топлива и себестоимость чугуна, повышается производительность доменной печи.

Указанные сопутствующие изменения являются также эффективными компенсирующими факторами, способствующими стабилизации технологии, повышению расхода ПУТ и эффективности его применения.

5. В качестве основных компенсирующих мероприятий в расчетах по ПАО «ЕМЗ» и ДМЗ приняли повышение основности агломерата (1,9), температуры дутья до 1200 °С, давление газа под колошником – 1,8, использование кокса «Премиум» и современная подготовка его к плавке, замена привозного агломерата окатышами (ПрАО «Донецксталь»-МЗ»).

В результате реализации компенсирующих мероприятий себестоимость чугуна повысилась, однако, одновременно были обеспечены как существенное улучшение ТЭП плавки, так и качественное улучшение технологических параметров, предопределяющих эффективность применение ПУТ: выходы шлака и горновых газов, приход серы с шихтой, расход известняка и др.

Для оперативного управления технологическими параметрами при повышении расхода ПУТ использовали вывод из состава дутья ПГ, обогащение дутья кислородом и его увлажнение паром.

Расчеты показывают, что принятые меры позволили повысить оптимальный расход ПУТ соответственно до 200 и 215 кг/т чугуна, полностью исключить из состава дутья ПГ (на 87,2 и 95 м<sup>3</sup>/т чугуна), снизить суммарный расход кокса и коксового орешка на 197,3 и 236,8 кг/т чугуна (42,1 и 44,3 %), условного топлива – на 95,9 и 135,6 кг/т чугуна (16,7 и 20,7 %), себестоимость чугуна – на 337,03 и 238,59 грн/т чугуна, повысить производительность доменных печей на 24,3 и 34,0 %. Реализация предлагаемых мероприятий обеспечивает замену ПУТ и КО 63,5-63,1 % кокса.

#### Литература

1. Ярошевский С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. – М.: Металлургия, 1988. – 176 с.
2. Ярошевский С.Л. Перспективы и эффективность доменной технологии определяются степенью замены кокса пылеугольным топливом // Доклад на конференции

- "Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна", Донецк, 18-21 декабря 2006 г. – Донецк: Норд Компьютер, 2007. – 21 с.
3. 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.
  4. Курунов И.Ф. Доменное производство Китая, Японии, Северной Америки, Западной Европы и России // Металлург. – 2010. – N 2. – С.69-77.
  5. Ярошевский С.Л., Кузнецов А.М., Афанасьева З.К. Резервы эффективности комбинированного дутья в доменных цехах Украины. – Донецк: Норд компьютер, 2006. – 31 с.
  6. Основной ресурс повышения эффективности доменной технологии – снижение расхода кокса до 100-200 кг/т чугуна / С.Л. Ярошевский, А.А. Минаев, И.В. Мишин и др. // V Международный Конгресс по агло-коксо-доменному производству «Проблемы доменного и смежных производств в современных экономических условиях работы горно-металлургического и топливно-энергетического комплексов», Ялта (Украина), 21-25 мая 2012 г. – С. 35-45.
  7. Доменное производство: Справочное издание. В 2-х томах. Т.1. Подготовка руд и доменный процесс / Под. Ред. Е.Ф. Вегмана. – М.: Металлургия, 1989. – 496 с.
  8. Bell S.A., Pugh I.L., Snyder B.I. Coal injection Bellefonte furnace // J. Metals. – 1968. – Vol. 20. – N 4. – P.85-88.
  9. Bell S.A., Pugh I.L., Sexton T.R. Armco coal injection // AIME Ironmaking Conference and Proceedings. – 1975. – Vol. 34. – N 4. – P.304-325.
  10. Терещенко В.П. История освоения пылеугольной технологии на Донецком металлургическом заводе: 1963-2006 гг. // Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна» г. Донецк, 18-21 декабря 2006 г. – Донецк: УНИТЕХ, 2006. – С. 13-23.
  11. Ярошевский С.Л., Хлапонин Н.С. Качество шихты доменных печей, работающих с применением пылеугольного топлива // Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна» г. Донецк, 18-21 декабря 2006 г. – Донецк: УНИТЕХ, 2006. – С. 59-64.
  12. Peters M., Lungen H.B. Ironmaking technology in Western Europe // Proc. 3-rd Int. Conference on Science and Technology of Ironmaking (ICSTI), Düsseldorf. 2003. – P. 33-34.
  13. Steiler J.-M., Hanrot F. Present state and innovative issues for Ironmaking // Le Revue de Metallurgie – CIT (2005). – P. 161-169.
  14. Langner K. Injection of pulverized coal at Thyssen Krupp Steel // Stahl und Eisen. – 2005. – N. 11. – P. 91-95.
  15. Золотухин Ю.А., Андрейчиков Н.С., Куколев Я.Б. Требования к качеству кокса для доменных печей, работающих с различным удельным расходом пылеугольного топлива // Кокс и химия. – 2009. – № 3. – С. 25-31.
  16. Теория и практика производства и применения доменного кокса улучшенного качества: Монография/ Ю.В. Филатов, Е.Т. Ковалев, И.В. Шульга, С.И. Кауфман, А.И. Коломийченко; под ред. С.Л. Ярошевского. – Киев: Наукова думка, 2011. – 128 с.
  17. Золотухин Ю.А., Андрейчиков Н.С., Гилязетдинов Р.Р. Сравнительный анализ основных факторов, формирующих высокие показатели качества кокса CSR и CRI из шихт «BNP Steel» и ОАО НТМК // Кокс и химия. – 2006. – № 6. – С. 18-23.
  18. Технология доменной плавки на окатышах в условиях ПрАО «Донецксталь»-МЗ // Ю.В. Филатов, А.В. Емченко, В.Е. Попов и др. // Металлургические процессы и оборудование. – 2012. – № 2.- С. 9-23.
  19. Явление снижения реакционной способности доменного кокса и повышения его прочности после реакции с CO<sub>2</sub> во временном интервале при внепечной обработке кокса растворами неорганических веществ / Ю.В. Филатов, М.А. Ильяшов, А.И. Коломийченко и др. // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія. Вип. 17 (187). – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С. 140-143.

20. Теория и практика подготовки металлургического кокса к доменной плавке: Монография / В.Г. Гусак, А.М. Кузнецов, А.В. Емченко, В.Е. Попов, А.В. Кузин. – Киев: Наукова думка, 2011. – 216 с.
21. Теоретические и экспериментальные основы подготовки кокса к доменной плавке / А.Л. Подкорытов, А.М. Кузнецов, Е.Н. Дымченко, В.П. Падалка, С.Л. Ярошевский, А.В. Кузин //Металлург. – 2009. – № 6. – С. 34-37.
22. Технология и эффективность подготовки кокса к доменной плавке / А.Л. Подкорытов, А.М. Кузнецов, Е.Н. Дымченко, В.П. Падалка, С.Л. Ярошевский, А.В. Кузин //Металлург. – 2009. – № 8. – С. 32-37.
23. Технология доменной плавки на окатышах в условиях ПрАО «Донецксталь»-МЗ»/Ю.В. Филатов, А.В. Емченко, В.Е. Попов и др.// Металлургические процессы и оборудование. – 2012. – № 2.- С. 9-23.
24. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.