

**С.Л. Ярошевский<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры

**В.В. Кочура<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой, e-mail: kochura@ukr.net

**А.М. Кузнецов<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, нач. доменного цеха

**И.В. Шульга<sup>3</sup>**, канд. техн. наук, доц., зав. отделом

**А.С. Хайбулаев<sup>2</sup>**, нач. лаборатории

**З.К. Афанасьева<sup>1</sup>**, ст. преподаватель

<sup>1</sup>Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

<sup>2</sup>Енакиевский металлургический завод, г. Енакиево, Украина

<sup>3</sup>ГП «Украинский государственный научно-исследовательский углехимический институт», г. Харьков, Украина

## Эффективность и ресурсы пылеугольной технологии выплавки чугуна

*Рассмотрены эффективность и ресурсы пылеугольной технологии выплавки чугуна. Выполнены расчеты перспективной технологии с расходом пылеугольного топлива (ПУТ) 180 кг/т чугуна и компенсации его негативного влияния за счет подготовки кокса к плавке, использования кокса улучшенного качества, коксового орешка (до 80 кг/т чугуна), повышения температуры дутья, что позволило снизить расход кокса до 298,7 кг/т чугуна (176,9 кг/т чугуна, 37,2 % снижения от базового уровня) и повысить производительность печи на 398,2 т/сут (12,7 %).*

**Ключевые слова:** пылеугольное топливо, чугун, кокс, природный газ, коксовый орешек, доменная печь.

**С**нижение расхода кокса на выплавку чугуна – основной путь повышения эффективности доменной технологии. За последние 200 лет расход твердого топлива снизился в 8–10 раз – до 250–350 кг/т чугуна, а 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 других, вызываемых в основном снижением доли кокса в шихте и горением топлива в фурменных зонах. Устранялись указанные изменения за счет внедрения компенсирующих мероприятий, нейтрализующих негативные изменения технологии: повышение температуры дутья, снижение выхода шлака, улучшение качества железорудных материалов, кокса и пылеугольного топлива (ПУТ) [1–5].

В настоящее время все основные металлургические предприятия Украины имеют в своем составе современные пылеугольные комплексы.

По данным НПП «Металлургпром» [6], вдувание ПУТ в количестве 123,8 кг/т чугуна в 2015 г. позволило снизить расход природного газа (ПГ) на 32 м<sup>3</sup>/т чугуна, кокса – на 10–20 %, обеспечить усредненную выгоду от внедрения ПУТ 391 грн/т чугуна.

Пылеугольная технология – весьма капиталоемкое мероприятие (5–7 млн \$ на 1 млн т годовой производительности доменного цеха). В связи с этим эффективность пыледувания появляется только по-

сле освоения 100–120 кг ПУТ/т чугуна [4]. Ситуация значительно усугубляется на Украине, использующей для замены кокса ПГ, вывод которого из состава дутья при вдувании ПУТ предопределяет повышение расхода кокса на 40–60 кг/т чугуна. Из изложенного следует, что эффективность использования ПУТ может быть значительно (возможно, вдвое) повышена.

Определенное влияние на развитие ПУТ-технологии оказал 35-летний опыт промышленной эксплуатации первой в Европе промышленной пылеугольной установки на Донецком металлургическом заводе<sup>1</sup> (1980–2015 гг.): технология совместного использования ПГ+ПУТ+O<sub>2</sub>; выплавка литейного чугуна с применением ПУТ; применение топливных смесей; аэрационный принцип дозирования ПУТ; оптимизация технологического режима на основе массового статистического исследования первичных данных; расчетное и экспериментальное исследование полноты сгорания топлива в фурменной зоне; оценка полноты сгорания ПУТ в горне; исследование влияния вдувания ПУТ на степень черноты фурменной зоны и технологию плавки. Для разработки и совершенствования технологических режимов доменной плавки с вдуванием ПУТ предложен принцип полной и комплексной компенсации нарушений технологии, определяемых выводом из шихты кокса и горением ПУТ [3, 4, 7–10].

Теоретические соображения, отечественный и зарубежный промышленный опыт показывают, что

<sup>1</sup>В работе принимали участие: Панев Г.А., Козуб А.Г., Рыженков А.Н., Терещенко В.П., Попов В.Е., Иванов С.А., Брага В.В., Красавцев И.Н., Ноздрачев В.А., мастера и газовщики доменных печей и др.

массовое внедрение ПУТ-технологии на Украине, в сочетании с эффективными компенсирующими мероприятиями, обеспечит снижение уровня расхода скипового кокса до 250–300 кг/т чугуна при одновременном повышении уровня производства и других определяющих показателей.

Решение данной задачи компенсации, как правило, может быть осуществлено за счет реализации имеющихся на производстве мероприятий и резервов, организационных мероприятий и, конечно, определенных затрат, но значительно меньших, чем стоимость пылеугольных комплексов.

### **I. Основные компенсирующие мероприятия, обеспечивающие повышение эффективности использования ПУТ**

Ресурсы компенсации таких мероприятий, как повышение температуры дутья, содержание в нем кислорода, повышение давления газа на колошнике, снижение выхода шлака и расхода сырого флюса и других в значительной мере использованы. Однако имеются такие компенсирующие мероприятия, как улучшение качества кокса, подготовка кокса к доменной плавке, компенсирующие ресурсы которых весьма значительные и в большей мере еще не использованы. На их основе возможно эффективное повышение расхода ПУТ до 150–200 кг/т чугуна.

#### **1.1. Улучшение качества скипового кокса**

Многолетний опыт доменной плавки показал, что современная доменная технология с вдуванием больших количеств дополнительного топлива в горн печи, в частности пылеугольного, не может быть осуществлена при использовании кокса низкого качества. При вдувании ПУТ в горн доменной печи роль кокса как разрыхлителя существенно возросла в связи со снижением его доли в шихте с 50–55 до 35 % и ниже. Сказанное убедительно подтверждается зарубежным опытом. За рубежом в последние годы освоена ПУТ-технология с вдуванием на 1 т чугуна 150–260 кг ПУТ, снижением на 30–50 % расхода кокса (250–300 кг/т чугуна), что в решающей степени обеспечено значительным повышением качества кокса: горячая прочность (CSR) – 60–74 %, реакционная способность (CRI) – 17–30 % (табл. 3) [11–13].

Очевидно, что массовое промышленное внедрение ПУТ-технологии однозначно должно сочетаться с мероприятиями по улучшению качества кокса.

Улучшение качества кокса – определяющий компенсирующий фактор при освоении малококсовой доменной технологии.

В доменных цехах Украины расход кокса на 1 т чугуна выше на 20–30 %, чем в европейских странах, что объясняется как менее благоприятными шихтово-технологическими условиями, так и его низким качеством (табл. 1).

Последнее характеризуется специфическими причинами:

- преобладанием в структуре геологических запасов и добыче малометаморфизированных углей с высоким выходом летучих веществ и низким показателем отражения витринита, что характеризует их более низкую способность к спеканию [14];

- повышенным индексом основности минеральной части большинства углей Донбасса: 0,25–0,35 против 0,12–0,15, необходимых для получения кокса с высоким показателем послереакционной прочности (CRS = 60–70 %) [14];

- повышенными зольностью, сернистостью шихты;
- менее совершенной технологией обработки кокса и подготовки его к доменной плавке.

Установлена четкая зависимость между показателем прочности кокса (CSR) и расходом ПУТ (рис. 1) [15].

На основании требований к свойствам кокса улучшенного качества была теоретически обоснована и сформулирована концепция производства высококачественного кокса, включающая в себя следующие основные направления [16]:

а) формирование рациональной сырьевой базы коксования:

- обеспечение требуемых свойств угольной шихты, прежде всего, по зольности, сернистости, степени метаморфизма;

- повышение глубины обогащения и уменьшение зольности угольных концентратов;

- повышение степени однородности угольных шихт по стадиям метаморфизма;

- уменьшение количества концентратов, используемых для составления шихты на каждом предприятии;

- увеличение добычи малосернистых углей с благоприятным химическим составом минеральной части;

б) рациональная технология коксования:

- направленное влияние на физико-химические процессы термической деструкции и синтеза для получения кокса с наибольшей долей участков анизотропной структуры (повышение степени упорядочения углерода кокса);

- снижение скоростей коксования до уровня не более 27 мм/ч;

- корректировка температурного режима при изменении условий коксования;

в) послепечная обработка кокса:

- обеспечение стабильной влажности;

- рациональный уровень механических нагрузок на кокс при его сортировке и дополнительная механическая обработка кокса для реализации имеющихся центров механических нагрузок и трещинообразования.

Эта концепция стала основой для проведения дальнейших работ по улучшению качества кокса. Было предложено несколько вариантов составов угольных шихт для производства кокса улучшенного качества «Премиум». Как основной компонент (70–75 % в шихте) использовали угольный концентрат шахты «Красноармейская-Западная № 1» с низкой сернистостью и оптимальным индексом основности золы, обусловленным преобладанием в минеральной части угля алюмосиликатов и низким содержанием оксидов железа [16]. В качестве марки «Ж» использовали, в первую очередь, уголь шахты им. Скочинского (7–10 %). Однако в связи с ограниченностью его ресурсов недостающее количество угля восполняли концентратом шахты им. Засядько, который при участии его в шихте в количестве 15–20 % позволяет обеспечить требуемую спекаемость шихты и сохра-

Таблица 1

## Свойства кокса и угольных шихт

Показатель	Значение	
	Украина	Ведущие мировые производители
<b>Кокс</b>		
Реакционная способность CRI, %	35–40	17,7–30
Горячая прочность CSR, %	45–50	60–74
Механическая прочность в микум-барабане, %:		
$M_{25}$	87–89	–
$M_{10}$	6–8	< 7
Зольность сухой массы $A^d$ , %	< 12	< 11
Сернистость общая сухой массы $S^d$ , %	< 1,5	< 1
Выход летучих веществ из сухой обеззоленной массы $V^{daf}$ , %	< 1	< 1
<b>Угольная шихта</b>		
Зольность сухой массы $A^d$ , %	8,5–9,0	< 8,5
Сернистость общая сухой массы $S^d$ , %	1,5–2,5	< 1,0
Выход летучих веществ из сухой обеззоленной массы $V^{daf}$ , %	29–32	< 27
Толщина пластического слоя $u$ , мм	14–18	14–16
Основность (основно-кислотное отношение) золы	0,25–0,35	< 0,16
Средний произвольный показатель отражения витринита $R^o$ , %	< 1,0	> 1,2
Показатель неоднородности шихты по стадиям метаморфизма витринита $\sigma_{R^o}$ , %	0,25–0,35	< 0,15

Таблица 2

## Свойства шихты и ее компонентов для получения кокса «Премиум»

Концентрат угля шахты	Содержание, %	$W^e$ , %	$A^d$ , %	$S^d$ , %	$V^{daf}$ , %	$u$ , мм
им. Скочинского («Ж»)	10	11,2	6,2	0,88	32,0	17
им. Засядько («Ж»)	15	11,0	8,5	2,20	32,0	26
«Красноармейская-Западная № 1» («К»)	75	8,0	7,8	0,62	29,0	13
Шихта	100	8,8	7,7	0,88	29,8	15



Рис. 1. Зависимость удельного расхода ПУТ от горячей прочности кокса: точки – экспериментальные значения по данным работы [15]

нить ее сернистость и индекс основности на приемлемом уровне.

Свойства шихты и ее компонентов приведены в табл. 2.

В 2006 г. на ЗАО «Макеевкокс» и ОАО «Ясиновский КХЗ» на основе использования указанных мало-сернистых углей, освоено производство кокса улучшенного качества «Премиум», на который разработаны и утверждены технические условия [14, 17].

Сводные данные о результатах опытно-промышленных доменных плавков на коксе улучшенного качества, проведенных за период с 2005 г., приведены в табл. 3.

Качество кокса «Премиум» улучшилось: содержание серы – (0,2–0,48 %), фракция 10–0 мм – (0,2–0,9 %), горячая прочность CSR + (5,1–18,5 %), реакционная способность CRI – (8,6–13,6 %).

Во всех доменных плавках было достигнуто существенное снижение расхода кокса (кг/т чугуна) и повышение производительности доменных печей (т чугуна/сутки): №5 ПАО «МК «Азовсталь» (-31 и +277); № 5 ПАО «Запорожсталь» (-32 и +46); № 5 ПАО «ЕМЗ» (-21 и +153). Наилучшие результаты были получены на доменной печи № 2 ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод (ДМЗ), работавшей с применением ПУТ (167–172 кг/т чугуна): снижение расхода кокса составило 51 кг/т чугуна (11,6 %), повышение производительности – 343 т/сут (17,1 %).

Очевидно, что значительное повышение качества кокса по горячей прочности и реакционной способности, фракционному составу и др. является обязательным и необходимым элементом для реализации технологии с расходом топлива до 200–250 кг/т чугуна и соответственным повышением эффективности его применения.

### 1.2. Оптимизация фракционного состава скипового кокса

Кокс металлургический неоднороден по фракционному составу, что нежелательно с точки зрения поддержания его постоянных и оптимальных значений: фракционного состава, однородности, физических и химических свойств и т. д.

Из табл. 4, видно, что горячая прочность кокса различных производителей изменяется в зависимости

## Результаты опытно-промышленных плавов на коксе «Премиум»

Период проведения исследований	Октябрь 2005 г.	Март–май 2006 г.	Апрель–май 2008 г.	Май–июнь 2008 г.
Доменная печь	№ 5 ПАО «МК «Азовсталь»	№ 2 ПрАО «ДМЗ»	№ 5 ПАО «Запорожсталь»	№ 5 ПАО «ЕМЗ»
Объем доменной печи, м <sup>3</sup>	1513	1033	1513	1513
Изменения качества кокса в опытном периоде, %:				
A <sup>d</sup>	-0,6	-0,6	+0,1	-0,1
S <sup>d</sup>	-0,20	-0,25	-0,03	-0,48
M <sub>25</sub>	+0,3	+1,7	+0,8	+0,6
M <sub>10</sub>	-0,9	-0,7	-0,2	-0,8
> 80 мм	+1,5	-4,1	-0,4	+0,4
CRI	-13,6	-13,0	-8,6	-12,0
CSR	+17,6	+12,8	+5,1	+18,5
Изменение производительности доменной печи, т чугуна/сутки	+277	+343	+46	+153
Изменение расхода кокса, кг/т чугуна	-31	-51	-32	-21

Примечание: «+» – увеличение; «-» – снижение

Таблица 4

## Качество металлургического кокса в зависимости от его гранулометрического состава (по данным работ [18–20])

Показатели	Класс крупности (мм) кокса, %				
	> 80	60–80	40–60	25–40	10–25
Значение CSR, %:					
ОАО «Алтай-кокс»	56,3	57,3	57,5	58,8	–
ОАО «ММК»	57,9	58,4	59,4	60,7	56,9
ОАО «Авдеевский коксохимический завод»	45,7	52,1	57,2	59,7	–
Значение CRI, %					
ОАО «ММК»	30,3	30	29,5	29	30,7

от размера фракции кокса. Наименьшую горячую прочность (CSR) имеют крупные фракции кокса +80, 60–80 мм, а наибольшую – фракция 25–40 мм.

Из сказанного следует, что существенное повышение горячей прочности кокса может быть достигнуто, прежде всего, за счет снижения содержания крупных фракций, что в значительной мере подтверждено отечественной и зарубежной практикой [18–20].

Сложнее обстоит дело с коксом мелких фракций (менее 40 мм), поскольку он связан с существенным ухудшением газопроницаемости шихты. Выходом из ситуации является высев из общей массы металлургического кокса мелких фракций (40–0 мм) и смешивание их с железорудной шихтой. Данная технология активно изучалась и разрабатывалась с середины 60-х годов прошлого столетия [21–23].

### 1.2.1. Использование кокса мелких фракций (40–0 мм)

Сопротивление движению газового потока или потерю напора газа в печи, можно оценить уравнением Дарси–Вейсбаха [24]:

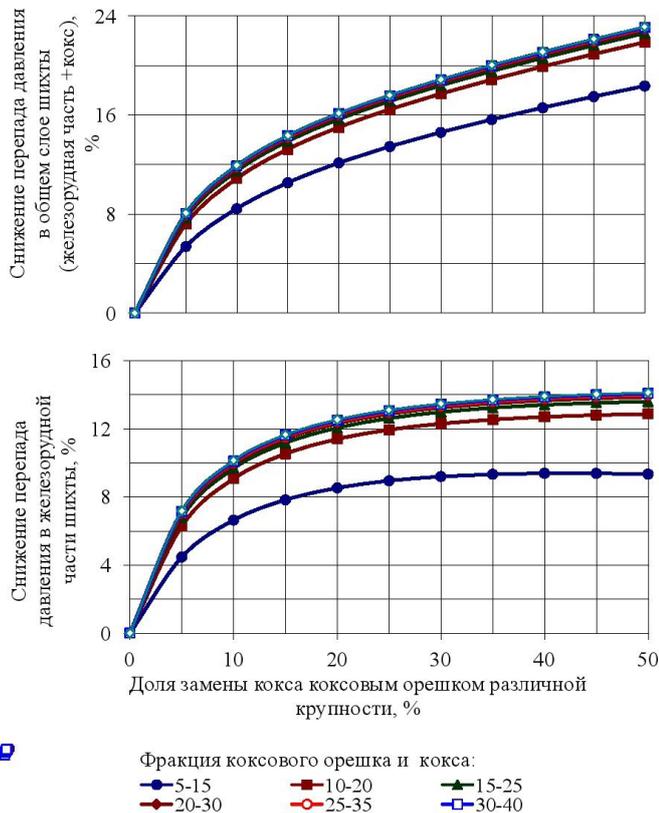
$$\Delta P = f \cdot \frac{H \cdot (1 - \varepsilon_{\text{пр}})}{d_{\text{ч}} \cdot \varepsilon_{\text{пр}}^3} \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2}, \quad (1)$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления;  $H$  – высота слоя, м;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – порозность, доли единиц;  $\rho$  – действительная плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – действительная скорость газа (на все сечение печи), м/с;  $d_{\text{ч}}$  – эквивалентный диаметр частиц, м.

Из рис. 2 [25] видно, что доля коксового орешка (КО) фракции 5–15 мм оказывает минимальное влияние на повышение газопроницаемости рудной линзы по сравнению с более крупными фракциями. Максимальная эффективность введения КО отмечена для фракций от 10–20 до 30–40 мм.

Эффективность введения в состав железорудной шихты крупных фракций КО аналогична введению скипового кокса.

Особенно значительно влияние введения первых 30 % КО (по отношению к расходу кокса), определяющих улучшение газопроницаемости рудной линзы



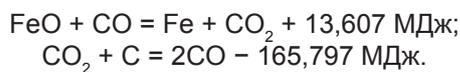
**Рис. 2.** Снижение перепада давления газа в слое шихты в верхней части доменной печи при введении КО крупностью в пределах от 5 до 40 мм и кокса в ее железородную часть

шихты на 12,5–13,5 % (4–6 % прироста производительности печи). Увеличение доли КО свыше 30 % практически не оказывает влияния на газопроницаемость рудной линзы. Газопроницаемость в общем слое шихты при этом повышается при максимальной замене кокса орешком за счет снижения сопротивления в коксовом слое шихты.

Однако улучшение газопроницаемости шихты далеко не единственное преимущество введения КО в смеси с железородной шихтой.

Преимуществами являются также:

- повышение выхода скипового кокса и КО на 2–3 %;
- повышение среднего размера скипового кокса и однородности его фракционного и химического составов;
- снижение содержания мелочи 10–0 мм в скиповом коксе;
- значительное увеличение удельной поверхности КО по сравнению с коксом, примерное равенство фракционных составов орешка и железородной части шихты, тесный контакт между ними качественно улучшают взаимодействие оксидов железа и углерода КО по реакциям:



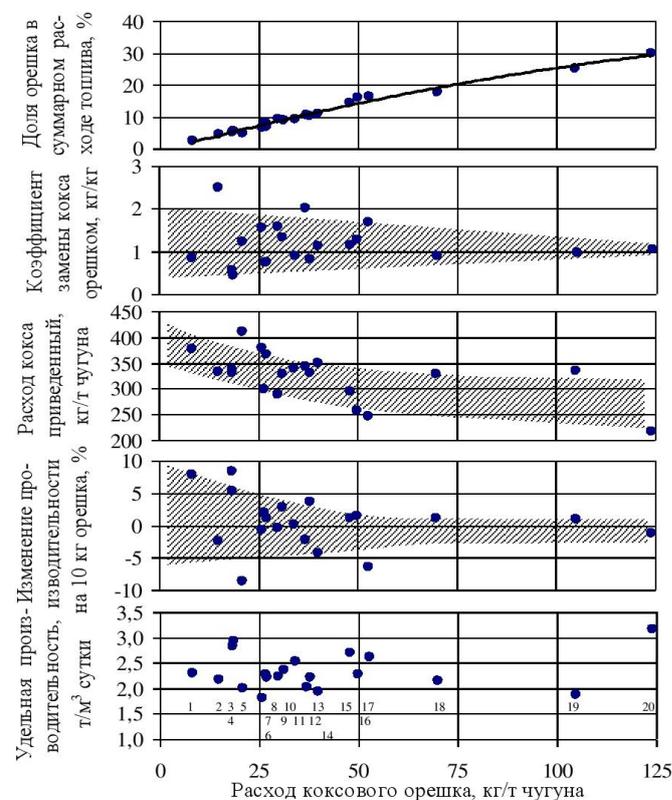
Лабораторные исследования показали, что увеличение расхода КО в смеси с окатышами позволяет существенно интенсифицировать процесс восстановления оксидов железа [26].

Качественная интенсификация процесса прямого восстановления за счет коксовой мелочи по указанным реакциям предопределяет ограничение данного процесса с коксом в шахте печи, что может способствовать сохранению базовых физических свойств кокса при поступлении его в фурменные зоны.

### 1.2.2. Отечественный и зарубежный промышленный опыт подготовки кокса к плавке

В связи с бурным развитием пылевудувания, КО в смеси с железородной шихтой стали систематически применять с целью сохранения оптимального газодинамического режима и высокого уровня производства.

Статистическая обработка среднегодовых данных работы доменных печей Европы показывает, что при введении в шихту 530 % КО (от расхода кокса), коэффициент замены кокса орешком был близок к 1, производительность печи в основном сохранилась на высоком исходном уровне (рис. 3) [25]. Для европейских стран общепринятой практикой стало ис-



**Рис. 3.** Зависимость основных показателей доменной плавки от расхода коксового орешка (среднегодовые данные 1994–1996 гг.)

1 – Германия, Thyssen, Schwelgern, ДП 1; 2 – Германия, Stahlwerke, Bremen, ДП 2; 3 – Италия, ILVA, Taranto, ДП 2; 4 – Италия, ILVA, Taranto, ДП 5; 5 – Бельгия, Cockerill, Sambre, ДП Marcinelle 4; 6 – Германия, ЕКО, Eisenhüttenstadt, ДП 2; 7 – Франция, SOLLAC, FOS, ДП BF1(1995); 8 – Бельгия, Cockerill, Sambre, Ougree B; 9 – Франция, SOLLAC, FOS, ДП BF1(1996); 10 – Германия, Thyssen, Schwelgern, ДП 2; 11 – Германия, Thyssen, Hamborn, ДП 4; 12 – Германия, Preussag, Salzgitter, ДП В(1995); 13 – Франция, SOLLAC, Dunkerque, ДП 2; 14 – Германия, Preussag, Salzgitter, ДП В(1996); 15 – Германия, Thyssen, Hamborn, ДП 9; 16 – Германия, НКМ, Huckingen, ДП А; 17 – Германия, НКМ, Huckingen, ДП В; 18 – Германия, Preussag, Salzgitter, ДП А; 19 – Австрия, VA, Linz, ДП А; 20 – Финляндия, Fundia AB, ДП Koverhar.

пользование КО фракции 10–40 мм в количестве от 20 до 100 кг/т чугуна.

В доменном цехе ЧАО «ЕМЗ» в декабре 2005 – январе 2006 г. введен в эксплуатацию склад окатышей и кокса (СОК) [27]. В состав СОК входят: разгрузочное устройство, непосредственно склад окатышей и кокса, узел сортировки материалов, участок погрузки отсева окатышей, система конвейеров для транспортировки окатышей и кокса.

Через СОК предусмотрена конвейерная подача металлургического кокса к доменным печам. При подаче в одну нитку через этот склад (вагон – приемные бункера – склад – вибрационный грохот – валковая дробилка – бункера кокса доменных печей) кокс подвергается дополнительным ударно-стирающим нагрузкам по сравнению с подачей его по обычной схеме. При такой схеме кокс конвейером подается на вибрационный грохот, где из него отделяется крупная фракция (в зависимости от размера ячеек сита крупность фракции можно изменить от 60 до 90 мм), и эта фракция подается в валковую дробилку. Раздробленный кокс после дробилки и кокс-провал с виброгрохота объединяют в один поток и общим конвейером поочередно подают в бункера кокса доменных печей. Из стабилизированного кокса (по указанной новой схеме) отсев коксовой мелочи, как и при обычной схеме подачи кокса в доменные печи, производится в одну стадию на каждой доменной печи на вибрационных грохотах кокса перед его загрузкой в скипы. Мощность коксовой линии на СОК – 2-3 тыс. т кокса в сутки.

С использованием оборудования СОК:

- освоена и внедрена технология доменной плавки с введением в смеси с железорудной шихтой 30–40 кг/т чугуна КО (фракции 15–42 мм). Отсев кокса менее 15 мм используется для агломерации или направляется в штабель для приготовления ПУТ;

- разработана и внедрена в промышленных условиях технология получения скипового кокса фракции 80–42 и 70–42 мм с предварительным высевом и дроблением крупных фракций;

- расчеты показывают, что использование КО в количестве 25–40 кг/т чугуна обеспечивает снижение расхода металлургического кокса на 10,7–21,2 кг/т чугуна (1,8–3,5 %), в том числе за счет совершенствования технологии – 4-6 кг/т чугуна и 6,7–15,2 кг/т чугуна – за счет увеличения выхода из металлургического кокса КО и скипового кокса [28–30];

- для получения качественного КО использовали двухъярусные грохота с резиновыми ситами (размер просеивающих квадратных отверстий на нижнем сите 15–16 мм), что позволило снизить содержание мелочи 10–0 мм в орешке до 2 %;

- загрузка КО осуществляется из отдельного шихтового бункера последним компонентом в скип с окатышами по системе загрузки АОККК↓ 1,5 м. Объемная доля КО в смеси с железорудной шихтой составляла 5–8 %;

- освоена и внедрена технология отсева мелочи 5–0 мм из окатышей до уровня 3 % и ниже.

Ресурсы подготовки кокса к плавке весьма значительны, и на Украине они используются ограниченно: теоретические исследования и зарубежный промыш-

ленный опыт показывают, что оптимальный расход КО в шихту составляет до 30–50 % от расхода кокса (20–100 кг/т чугуна) [25]. Данная технология является высокоэффективным обязательным элементом современной ПУТ-технологии.

## II. Эффективность компенсации и перспективы ПУТ-технологии с повышенным расходом ПУТ

### 2.1. Методика расчета показателей доменной плавки и оптимизация технологии

Метод расчета показателей доменной плавки разработан на основе работ профессора Ленинградского политехнического института А.Н. Рамма [31].

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 характеристики теплового режима горна приняты 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]:

$$t_1 = t_n + \left( 1 - 0,7 \cdot \frac{r_{d_0} - r_{d_1}}{r_{d_0}} \right) \cdot \frac{K_0}{K_1} \cdot \frac{V_0}{V_1} \cdot (t_0 - t_n), \quad (2)$$

где  $t_0$  и  $t_1$  – необходимая теоретическая температура горения, при которой обеспечивается сохранение базовой температуры продуктов плавки, °С;  $t_n$  – температура в зоне замедленного теплообмена, °С;  $r_{d_0}$  и  $r_{d_1}$  – степень прямого восстановления, в долях единицы;  $V_0$  и  $V_1$  – выход горновых газов, м<sup>3</sup>/т кокса;  $K_0$  и  $K_1$  – расход кокса, кг/т чугуна.

Для характеристики газодинамического режима использовали уравнение [31]:

$$P_1 = P_0 \cdot \frac{V_{Г0}}{V_{Г1}} \cdot \left( \frac{\gamma_0 \cdot \Theta_0 \cdot d_0}{\gamma_1 \cdot \Theta_1 \cdot d_1} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где  $P_1$  и  $P_0$  – производительность доменной печи, %;  $V_{Г0}$  и  $V_{Г1}$  – выход газов, м<sup>3</sup>/т чугуна;  $\Theta_0$  и  $\Theta_1$  – средняя температура газов, °К;  $\gamma_0$  и  $\gamma_1$  – средняя плотность газов, кг/м<sup>3</sup>;  $d_0$  и  $d_1$  – показатель газопроницаемости шихты, %.

Для характеристики изменения восстановительных процессов при введении дополнительных топлив использовали уравнение Б.И. Китаева [32]:

$$D_1 = D_0 \cdot \left( 1 - e^{-0,63\tau_k} \right), \quad (4)$$

где  $D_1$  и  $D_0$  – равновесная и фактическая степень использования восстановительной энергии газа, в долях единицы;  $\tau_k$  – время контакта газов с окислами железа, с.

Время сгорания ПУТ в фурменных зонах рассчитывали по методике В.И. Бабия [33].

Для оценки эффективности компенсирующих мероприятий использовали понятие суммарного коэффициента замены ( $\Sigma K_3$ ) кокса дополнительным топливом [4]:

$$\Sigma K_3 = \frac{\Delta Q_{\text{ККМ}} + \Delta Q_{\text{КДТ}}}{\Delta Q_{\text{ДТ}}},$$

где  $\Delta Q_{\text{ККМ}}$  и  $\Delta Q_{\text{КДТ}}$  – экономия кокса за счет компенсирующих мероприятий и повышения расхода дополнительного топлива, кг;  $\Delta Q_{\text{ДТ}}$  – прирост расхода дополнительного топлива, кг.

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), и на основании выполненных статистических исследований предложены определяющие параметры, превышение определенного уровня которых маловероятно в реальных сложившихся условиях. 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 – 4,5 тыс. м<sup>3</sup>/т кокса, количество мелочи 5–0 мм в железорудной шихте – 400 кг/т кокса, выход шлака – 1100 кг/т кокса [4].

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

Таким образом, по описанной методике принципиально возможно корректное обоснование технологических режимов с применением ПУТ и топливных смесей в количестве до 300 кг/т чугуна при снижении расхода кокса до 100–150 кг/т чугуна.

Для выполнения указанных расчетов используются персональные компьютеры, а также программы, написанные в базе данных Microsoft Access.

В связи с применением ПУТ и снижением расхода кокса возрастает напряженность и снижается устойчивость технологических режимов. Вследствие этого авторы статьи считают целесообразным внедрение указанной методики при проектировании технологических режимов для новых доменных печей, обосновании оптимальных технологических режимов при изменении шихтовых и других технологических условий, использование дополнительных видов топлива, внедрение элементов данной методики в практику эксплуатации доменных печей.

## **2.2. Эффективность и перспективы использования ПУТ для выплавки чугуна**

Технология доменной плавки с применением ПУТ освоена на Енакиевском металлургическом заводе (ЕМЗ) в 2016 г. [34]. Исследования по оптимизации ПУТ-технологии в основном проведены на доменной печи № 3 (ДП-3):  $V_n = 1719 \text{ м}^3$ , построена в 2011 г., 24 воздушные фурмы, температура дутья 1250 °С (воз-

духонагреватели Калугина), лотковое загрузочное устройство.

Пылеугольный комплекс введен в эксплуатацию по контракту с фирмой Kuttner в 2016 г. Пылеугольное топливо в печь начали дуть в апреле 2016 г. при одновременном прекращении подачи ПГ. Для приготовления ПУТ использовали кузнецкий слабоспекающийся уголь марки «СС» (зола 7 %, сера 0,2 %).

Показатели работы доменной печи в базовом и опытных с вдуванием ПУТ периодах приведены в табл. 5.

В качестве компенсирующих факторов использовали вывод из состава дутья ПГ (58,3 м<sup>3</sup>/т чугуна, что эквивалентно перерасходу кокса на 46,2 кг/т чугуна), повышение температуры дутья и содержания в нем кислорода, введение в смеси с железорудной шихтой КО фракции 15–40 мм, агломерат ЮГОК улучшенного качества, снижение основности шлака, отсева мелочи (5–0 мм) из окатышей СевГОК и другое.

Вдувание ПУТ в первом и втором опытных периодах (131,3 и 138,6 кг/т чугуна) позволило снизить расход кокса на 41,2 кг/т чугуна (8,66 %) и 77,6 кг/т чугуна (16,3 %), повысить производительность печи на 33,9 т/сут (1,06 %) и 370,06 т/сут (10,53 %). Коэффициент замены кокса ПУТ (без учета и с учетом компенсирующих мероприятий) составил соответственно 0,01 и 0,31 в первом периоде и 0,27 и 0,56 – во втором периоде. Расход условного топлива при вдувании ПУТ составил соответственно 606 и 577 кг/т чугуна в первом и втором опытных периодах.

Расчетные данные теплового баланса в основном подтверждают преимущества ПУТ-технологии. В приходе тепла замена теплоты горения кокса теплотой горения ПУТ составила 7,09 и 7,53 % (табл. 6).

Общий расход тепла повысился в первом опытном периоде – 89,8 ккал/кг чугуна (3,35 %) и снизился во втором опытном периоде – 16,2 ккал/кг чугуна (0,6 %) (табл. 6).

Период с повышенным расходом ПУТ 180 кг/т чугуна (табл. 5, 2б) рассчитан на основе результатов второго опытного периода работы ДП-3 с вдуванием ПУТ.

Компенсация негативного влияния ПУТ на технологию усилена за счет повышения температуры дутья до 1150 °С, повышения содержания кислорода в дутье (+ 3,2 %), изменения состава железорудной шихты в основном за счет введения агломерата ЮГОК, увеличения расхода КО (до 80 кг/т чугуна), улучшения качества кокса за счет использования кокса улучшенного качества, загрузки скипового кокса однородного фракционного состава (40–70 мм).

Реализация указанного режима (2б) позволила снизить расход кокса до 298,7 кг/т чугуна (на 176,9 кг/т чугуна, 37,2 %), коэффициент замены кокса ПУТ без учета и с учетом компенсирующих мероприятий составил соответственно 0,98 и 1,21 кг/кг. По сравнению с базовым периодом расход условного топлива снизился на 16,1 кг/т чугуна (2,76 %), производительность печи повысилась на 398,2 т/сут (12,7 %).

Приведенные данные свидетельствуют о высокой эффективности использования ПУТ, сопоставимой с современными европейскими образцами. О корректности и эффективности использования ПУТ в режи-

## Расчет эффективности вдувания ПУТ для условий ДП-3 ЕМЗ

Наименование	Периоды			Режим 5.10– 15.11.2016 с дополнительной компенсацией (2а)	Вдувание ПУТ, кг/т чугуна (2б)
	16.03– 21.04.2016 (базовый)	10–31.07.2016 (1-й опытный)	5.10– 15.11.2016 (2-й опытный)		
Производительность, т чугуна/ сут	3142,7	3176,6	3512,8	3607,6	3540,9
Кокс сухой скиповой, кг/т чугуна	475,6	434,4	398,0	380,4	298,7
Коксовый орешек, кг/т чугуна	34,0	34,5	34,2	34,2	80,0
Сумма кокса и коксового орешка, кг/т чугуна	509,6	469,9	432,2	414,6	378,7
Агломерат ЕМЗ, кг/т чугуна	769,8	373,9	814	654	654
Агломерат ЮГОК, кг/т чугуна	0	456,9	324	450	450
Окатыши СевГОК, кг/т чугуна	904,7	801,4	521	550	550
Известняк обычный, кг/т чугуна	35,8	43,4	24	14	12
Расход сухого дутья, м <sup>3</sup> /т чугуна	1460	1499	1261	1207	1216
Температура дутья, °С	1100	1100	1100	1150	1150
ПУТ, кг/т чугуна	0	131,3	138,6	138,6	180,0
ПГ	58,3	0	0	0	0
Содержание кислорода в дутье, %	22,76	23,35	25,2	25,2	25,2
Выход сухого колошниково- го газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	1947	2033	1810	1741	1759
Температура колошниково- го газа, °С	235	235	288	281	293
Степень использования СО, доли	0,3503	0,4451	0,434	0,447	0,438
Степень прямого восстановления, %	30,76	35,04	27,7	27,9	25,9
Выход горновых газов, м <sup>3</sup> /т чугуна	1859	1875	1716	1631	1671
Выход восстановительных газов, м <sup>3</sup> /т чугуна	781,14	777,17	761	726	759
Выход шлака, кг/т чугуна	428	385	400	389	387
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	6,07	6,04	5,3	5,1	4,9
Основность CaO/SiO <sub>2</sub>	1,09	1,09	1,05	1,00	1,00
Основность (CaO+MgO)/SiO <sub>2</sub>	1,28	1,20	1,18	1,12	1,12
[S]	0,074	0,081	0,082	0,098	0,095
Теоретическая температура горения, °С	2120	2207	2226	2254	2183
Расход условного топлива, кг/т чугуна	582	606	577,05	559,36	565,92
Изменение себестоимости чугуна с выпуска, грн/т	–	–	0,00	12,26	-8,95
Вынос колошниковой пыли, кг/т чугуна	36	25,8	23,9	23,9	23,9

ме с дополнительной компенсацией свидетельствуют повышение теоретической температуры горения до 2183 °С (+ 63 °С), степени использования газа ( $\eta_{CO}$ ) на 9 %, снижение выхода горновых газов на 188 м<sup>3</sup>/т

чугуна (- 10,1 %) и степени прямого восстановления оксида железа ( $r_d$ ) на 4,86 % до 43,8 %.

На основании массовой статистической обработки показателей работы доменных печей мира пред-

## Тепловые балансы работы ДП-3 ЕМЗ

Статьи прихода и расхода тепла	Периоды					
	16.03–21.04.2016 (базовый)		10–31.07.2016 (1-й опытный)		5.10–15.11.2016 (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>

ложено понятие так называемых определяющих показателей, характеризующих предельно допустимый уровень отдельных технологических показателей в зависимости от расхода кокса и технологических условий [3, 4]. Указанные показатели рассчитаны для режима 2б с повышенным расходом ПУТ (табл. 7).

Согласно расчету, все определяющие показатели соответствуют нормам (расчетные режима 2б и предельно допустимые): выход шлака, кг/т кокса (1021 и 1100), скорость газа в распаре, м/с (17,54 и 20), выход горнового газа, м<sup>3</sup>/т кокса (4412 и 4500), приход мелочи (5–0 мм) с шихтой, кг/т кокса (218 и 400). Снижение расхода кокса в расчетном периоде 2б составляет 176,9 кг/т чугуна.

Из промышленного опыта принимаем, что 50 % полученного в результате применения ПУТ снижения себестоимости чугуна составляют затраты на стоимость ПУТ, амортизацию и эксплуатацию ПУТ-установки, а 50 % – экономический эффект. Согласно данному условию, экономическая эффективность реализации ПУТ-технологии в расчетном периоде 2б

составляет 659,7 млн грн/год, что в 4,2 и 2,3 раза превышает соответственные эффекты в первом и втором опытных периодах (табл. 7).

Использованные в расчетном режиме компенсирующие мероприятия (улучшенное качество, повышение температуры дутья, подготовка кокса к плавке с использованием КО, методика расчета показателей доменной плавки и оптимизации технологии, экспериментально подтверждена полнота сгорания ПУТ в фурменных зонах свыше 99 %), опробованы и освоены в промышленных условиях [14, 16].

Для промышленного внедрения необходимо решение комплекса организационно-технических мероприятий по реализации технологического режима 2б. При этом внедрение может быть осуществлено в течение нескольких месяцев.

Описан массовый промышленный опыт работы современных мощных доменных печей с повышенным расходом ПУТ 200–260 кг/т чугуна и заменой им до 40–50 % кокса с расходом скипового кокса 250–280 кг/т чугуна и ниже [1, 4, 5, 8–10]. Однако для

## Эффективность использования ПУТ на ДП-3 ЕМЗ

	16.03– 21.04.2016 (базовый)	10– 31.07.2016 (1-й опыт- ный)	5.10– 15.11.2017 (2-й опыт- ный)	5.10–15.11.2016 расчетный с дополнитель- ной компенса- цией (2а)	5.10–15.11.2016 расчетный с дополнитель- ной компенса- цией и рас- ходом ПУТ 180 кг/т чугуна (2б)
Производство, т/сут	3142,7	3176,6	3512,8	3607,6	3540,9
Расход скипового кокса, кг/т чугуна	475,6	434,4	398,0	380,4	298,7
Расход ПУТ, кг/т		131,3	138,6	138,6	180
Изменение расхода кокса за счет компенсирующих мероприятий, кг/т чугуна:					
Расход ПГ ( $K_3 = 0,8$ )	–	46,6	46,6	46,6	46,6
Температура дутья	–			-7,13	-7,13
O <sub>2</sub> в дутье	–	0,56	2,32	2,32	2,32
[Si]	–	-0,76	-0,76	-2,28	-2,28
Расход известняка	–	1,81	-2,81	-5,18	-5,66
Выход шлака	–	-8,18	-5,33	-7,42	-7,80
Всего за счет технологии (с 6 по 10)	–	-6,57	-6,58	-19,69	-20,55
Расход коксового орешка ( $K_3 = 0,6$ )	–	–	–	–	-36,8
Переход на кокс улучшенного качества	–	–	–	–	-30
Суммарная эффективность компенсирующих мероприятий (без ПГ), кг/т чугуна	–	-6,57	-6,58	-19,69	-48,15
Суммарная эффективность компенсирующих мероприятий (с ПГ), кг/т чугуна	–	38,42	40,02	26,91	-1,55
Расход кокса с учетом компенсирующих мероприятий	–	<b>474,43</b>	<b>438,02</b>	<b>407,31</b>	<b>297,15</b>
Коэффициент замены кокса ПУТ (с компенсирующими мероприятиями)	–	<b>0,01</b>	<b>0,27</b>	<b>0,49</b>	<b>1,21</b>
Коэффициент замены кокса ПУТ (без компенсирующих мероприятий)	–	<b>0,31</b>	<b>0,56</b>	<b>0,69</b>	<b>0,98</b>
Замена кокса ПУТ, кг/т чугуна (%)	–	1,17 (0,25)	37,58 (7,9)	68,29 (14,36)	217,65 (45,76)
Замена кокса ПУТ и компенсирующими мероприятиями, кг/т чугуна (%)	–	41,20 (8,66)	77,60 (16,32)	95,20 (20,02)	176,90 (37,2)
Изменение производительности, т/сут (%)	–	33,9 (1,08)	370,1 (11,77)	464,9 (14,79)	398,2 (12,7)
Определяющие показатели:					
Рудная нагрузка, т/т кокса	3,49	3,63	4,03	4,19	4,58
Выход шлака, кг/т кокса	839	821	925	938	1021
Выход горнового газа, м <sup>3</sup> /т кокса	3820	4335	3971	4199	4412
Приход мелочи (0–5 мм) с шихтой, кг/т кокса	241,0	264,5	193	199	218
Скорость газа в распаре, м/с	10,24	11,62	12,93	13,56	17,54

реализации данной технологии необходимы: кокс с показателем горячей прочности CSR 65–75 %, температура дутья более 1200 °С, содержание кислорода в дутье более 30 %, выход шлака до 300 кг/т чугуна и т. д., что в наших условиях потребует значительных капитальных затрат.

Реализация современной ПУТ-технологии с расходом 180 кг/т чугуна ПУТ и усилением компенсации (режим 2б) обеспечит эффект на уровне современных европейских доменных печей, однако потребует на порядок меньших капитальных затрат и времени.

Следует отметить, что современная ПУТ-технология имеет существенные недостатки: очень высокий расход энергоносителей – расход условного топлива равен 400–600 кг/т чугуна, причем в основном это кокс и высококачественные угли, весьма дорогие и дефицитные; очень большие затраты требуются для повышения температуры дутья и содержания в нем кислорода; более глубокого обогащения шихты и снижения выхода шлака и др.

В связи с этим представляется весьма актуальной технология с использованием вторичных энергоносителей, в первую очередь доменного газа, выход которого составляет от 1500 до 3000 м<sup>3</sup>/т чугуна. Существуют различные методы переработки доменного газа в восстановительные газы. В частности, перспективным и опробованным в промышленных условиях представляется способ удаления CO<sub>2</sub> из доменного газа водой в скрубберах высокого давления (28–30 атм) [35–37].

Авторам статьи представляется, что снизить расход дефицитных энергоносителей и условного топлива до 200 кг/т чугуна и ниже невозможно без решения проблемы вторичного использования энергоносителей. Авторы считают необходимым и целесообразным начать проведение научных исследований по решению данной задачи.

## Выводы

### 1. На Украине с 2016 г. все основные металлур-

гические предприятия имеют в своем составе современные пылеугольные комплексы и освоили ПУТ-технологии. Однако эффективность ПУТ-технологии качественно ниже, чем за рубежом: доля замены кокса углем составляет 15–25 % при минимальном изменении производительности печей.

2. На основании требований к свойствам кокса улучшенного качества обоснована и сформулирована концепция производства высококачественного кокса, включающая в себя следующие основные направления: формирование рациональной сырьевой базы коксования, рациональной технологии коксования и послепечной обработки кокса.

Опытно-промышленные доменные плавки на коксе улучшенного качества проведены на ПАО «МК «Азовсталь», ПрАО «ДМЗ», ПАО «Запорожсталь», ЧАО «Енакиевский МЗ». Во всех доменных плавках было достигнуто существенное снижение расхода кокса и повышение производительности доменных печей: ДП № 5 ПАО «МК «Азовсталь» (-31 кг/т чугуна и +277 т чугуна/сутки); ДП № 5 ПАО «Запорожсталь» (-32 кг/т чугуна и +46 т чугуна/сутки); ДП № 5 ЧАО «ЕМЗ» (-21 кг/т чугуна и +153 т чугуна/сутки). Наилучшие результаты были получены на ДП № 2 ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод (ДМЗ), работавшей с применением ПУТ (167–172 кг/т чугуна): снижение расхода кокса составило 51 кг/т чугуна (11,6 %), повышение производительности – 343 т/сут (17,1 %).

3. Наименьшую горячую прочность (CSR) имеют крупные фракции кокса +80, 60–80 мм, а наибольшую – фракция 25–40 мм, поэтому в скиповом коксе рекомендуется ограничить фракционный состав

пределами 40–70 мм.

Кокс мелких фракций отрицательно влияет на газодинамику и производительность доменной печи. Выходом из ситуации является высев из общей массы скипового кокса мелких фракций (40–0 мм), производство КО (40–15 мм) и введение его в печь в смеси с железорудной шихтой.

Введение в смеси с железорудной шихтой КО способствует: повышению выхода скипового кокса и КО на 2–3 %; повышению однородности фракционного и химического составов скипового кокса; снижению содержания мелочи 10–0 мм в скиповом коксе; загрузка в печь смеси железорудной шихты с коксовым орешком способствует интенсификации процесса прямого восстановления оксидов железа в нижней части печи, ограничивает процесс прямого восстановления скипового кокса, что способствует сохранению его базовых физических свойств при поступлении в фурменную зону.

Ресурсы подготовки кокса к плавке весьма значительны: теоретические исследования и зарубежный промышленный опыт показывают, что эффективная ПУТ-технология невозможна без соответствующей подготовки кокса к плавке и использования КО в количестве 40–100 кг/т чугуна.

4. Разработана методика расчета показателей доменной плавки на основе работ профессора Ленинградского политехнического института А.Н. Рамма, основанная на определении расхода кокса по тепловым эквивалентам шихтовых материалов и дутьевым параметрам плавки, позволяющая на основе принципа полной и комплексной компенсации и компенсирующих мероприятий рассчитывать технологические режимы доменной плавки с применением ПУТ и топливных смесей в количестве до 300 кг/т чугуна при снижении расхода кокса до 100–150 кг/т чугуна. В расчетах используется понятие «определяющие показатели плавки», превышение определенного уровня которых маловероятно в реальных сложившихся условиях: скорость газа в распаре (м/с), выход горнового газа (м<sup>3</sup>/т кокса), выход шлака (кг/т кокса).

5. Технология доменной плавки с применением ПУТ освоена на Енакиевском металлургическом заводе в 2016 г.

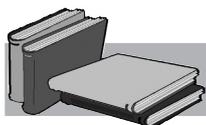
В первом и втором опытных периодах на ДП-3 вдувание ПУТ 131 и 138 кг/т чугуна позволило снизить расход кокса на 41,2 кг/т чугуна (8,7 %) и 77,6 кг/т чугуна (16,3 %), вывести природный газ 58,3 м<sup>3</sup>/т чугуна. Коэффициент замены кокса ПУТ (без учета и с учетом компенсирующих мероприятий) составил соответственно 0,01 и 0,31 в первом периоде и 0,27 и 0,56 во втором. Производительность ДП-3 повысилась при этом на 33,9 т/сут (1,1 %) и 370,06 т/сут (10,5 %).

На основе проведенных опытных плавков выполнены расчеты перспективной технологии с повышенным расходом ПУТ и усиленной компенсацией его негативного влияния за счет подготовки кокса к плавке, использования кокса улучшенного качества, КО (до 80 кг/т чугуна) повышения температуры дутья и др.

Указанные компенсирующие мероприятия и изменения технологии позволили повысить расход ПУТ до 180 кг/т чугуна. При этом расход кокса снизился

до 298,7 кг/т чугуна (176,9 кг/т чугуна, 37,2 % снижения от базового уровня), коэффициент замены кокса ПУТ без компенсирующих мероприятий составил 0,98 кг/кг, с учетом компенсирующих мероприя-

тий – 1,21 кг/кг, а прирост производства – 398,2 т/сут (12,7 %), что соответствует средним показателям эффективности использования ПУТ в мире.

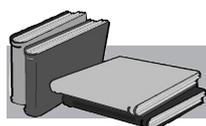


## ЛИТЕРАТУРА

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. – Днепропетровск: 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 Междунар. науч.-практ. конф. 11–14 февраля 2009 г.* Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 138–148.
5. Геердес М., Токсопеус Х., Ван дер Влит К. Введение в современный доменный процесс. – Нидерланды, 2004. – 131 с.
6. Последние шаги долгого ПУТи: металлурги завершают внедрение технологии, дающей им заметную экономию. URL: [http://www.ukrudprom.ua/digest/Poslednie\\_shagi\\_dolgogo\\_PUTi\\_metallurgi\\_zavershayut\\_vnedrenie\\_te.html](http://www.ukrudprom.ua/digest/Poslednie_shagi_dolgogo_PUTi_metallurgi_zavershayut_vnedrenie_te.html) (дата обращения 10.10.2018).
7. Терещенко В.П. История освоения пылеугольной технологии на Донецком металлургическом заводе: 1963–2006 гг. Труды международной научно-практической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна». – Донецк: Норд компьютер, 2006. – С. 13–23.
8. Ярошевский С.Л., Емченко А.В., Попов В.Е. и др. Эффективность и перспективы замены природного газа пылеугольным топливом в доменных цехах Украины // *Металл и литье Украины*. – 2010. – № 7. – С. 13–20.
9. Ярошевский С.Л. Пылеугольное топливо – реальная и эффективная альтернатива природному газу в металлургии // *Металл и литье Украины*. – 2006. – № 3. – С. 15–20.
10. Рыженков А.Н., Ярошевский С.Л., Крикунов Б.П. и др. Технологии плавки с использованием пылеугольного топлива и природного газа на дутье, обогащенном кислородом // *Сталь*. – 2005. – № 12. – С. 13–18.
11. Курунов И.Ф. Доменное производство Китая, Японии, Северной Америки, Западной Европы и России // *Труды международного конгресса доменщиков*. – М.: Издательский дом «Кодекс», 2010. – С. 6–17.
12. Дышлевич И.И., Изюмский Н.Н. Доменное производство Украины: новый подход к оценке качества кокса // *Сборник докладов 8-го международного семинара «Уголь в металлургии и энергетике»*, г. Ялта, 2002 г. – Ялта: Контраст, 2002. – С. 20–33.
13. Харахулах В.С., Захарченко В.Н. Доменное производство Украины // *Труды международного конгресса доменщиков*. – М.: Издательский дом «Кодекс», 2010. – С. 24–32.
14. Рыженков А.Н., Гордиенко А.И., Ковалев Е.Т. и др. Требования к качеству кокса для доменной плавки с использованием пылеугольного топлива и промышленный опыт производства такого кокса в Украине // *Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна»*, г. Донецк, 18–21 декабря 2006 г. – Донецк: УНИТЕХ, 2006. – С. 65–76.
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. Филатов Ю.В., Ковалев Е.Т., Шульга И.В. и др. Теория и практика производства и применения доменного кокса улучшенного качества: Монография. – Киев: Наукова думка, 2011. – 128 с.
17. Филатов Ю.В., Рыженков А.Н., Крикунов Б.П. и др. Влияние кокса повышенного качества на работу доменной печи с вдуванием пылеугольного топлива без природного газа // *Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна»*. – Донецк: УНИТЕХ, 2006. – С. 248–254.
18. Венц В.А., Черемискина А.Н., Киселев Н.И. и др. Исследование зависимости параметров прочности металлургического кокса от его гранулометрического состава // *Кокс и химия*. – 2006. – № 11. – С. 12–27.
19. Сибатагуллин С.К., Харченко А.С., Теплых Е.О. и др. Прочностные характеристики коксового орешка различного происхождения // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2012. – № 1. – С. 19–21.
20. Копырин И.А., Кроль В.Л., Андрианов В.Ф. Об оптимальной крупности кокса // *Металлургия*. – 1967. – № 8. – С. 10–13.
21. Логинов В.И., Берин А.Л., Соломатин С.М. и др. Влияние смешивания рудного сырья с коксом на газодинамические условия и технико-экономические показатели доменной плавки // *Сталь*. – 1977. – № 5. – С. 391–394.

22. Коробов И.И., Котов К.И., Пинчук С.И. и др. О возможности использовании мелкого кокса в современной доменной технологии // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1969. – № 5. – С. 40–43.
23. Логинов В.И., Мусиенко К.А., Воронков Д.В. и др. Работа доменной печи при совместной загрузке железорудных материалов и кокса в скип // *Сталь*. – 1987. – № 12. – С. 7–12.
24. Готлиб А.Д. Доменный процесс. – М.: *Металлургия*, 1966. – 530 с.
25. Литвинов Л.Ф., Ярошевский С.Л., Кузнецов А.М. и др. Производство и использование коксового орешка в доменной плавке. – Донецк: Компьютер Норд, 2004. – 68 с.
26. Емченко А.В., Крикунов Б.П., Ярошевский С.Л. и др. Исследования эффективности применения коксового орешка в доменной плавке // *Металл и литье Украины*. – 2011. – № 9-10. – С. 25–30.
27. Ярошевский С.Л., Кузнецов А.М., Падалка В.П., Хлапонин Н.С., Кузин А.В. Эффективность технологии доменной плавки при использовании в шихте коксового орешка // *Сталь*. – 2006. – № 3. – С. 2–6.
28. Литвинов Л.Ф., Ярошевский С.Л., Кузнецов А.М. и др. Эффективность технологии доменной плавки при загрузке в печь коксового орешка в смеси с железорудной шихтой // *Металл и литье Украины*. – 2004. – № 12. – С. 5–9.
29. Ярошевский С.Л., Кузнецов А.М., Падалка В.П. и др. Промышленный опыт и эффективность использования коксового орешка в смеси с железорудной шихтой // *Металл и литье Украины*. – 2005. – № 6. – С. 3–6.
30. Рыженков А.Н., Савранский Л.В., Ярошевский С.Л. и др. Технология доменной плавки с дуванием в горн пылеугольного топлива и природного газа на обогащенном кислородом дутье, обеспечивающая замену 30–40 % кокса // *Металл и литье Украины*. – 2005. – № 1-2. – С. 3–10.
31. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. – М.: *Металлургия*, 1980. – 303 с.
32. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Л. Теплообмен в доменной печи. – М.: *Металлургия*, 1966. – 355 с.
33. Бабий В.И., Куваев В.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М.: *Энергоатомиздат*, 1986. – 208 с.
34. Кузнецов А.М., Зубенко А.В., Падалка В.П. и др. Освоение и эффективность технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива на ЧАО «Енакиевский металлургический завод» // *Металл и литье Украины*. – 2017. – № 8-10. – С. 4–11.
35. Курунов И.Ф., Савчук Н.А. Состояние и перспективы бездоменной металлургии железа. – М.: *Черметинформация*, 2002. – 198 с.
36. Ноздрачев В.А., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П. Перспективные технологии доменной плавки с применением кислорода и пылеугольного топлива. – Донецк: *Новый мир*, 1996. – 197 с.
37. Ситулин Н.А., Мельников Е.Я., Фурман М.С., Кричевский И.Р. Справочник азотчика. – М.: *Химия*, 1967. – 492 с.

Поступила 24.10.2018



## REFERENCES

1. Savchuk, N.A., Kurunov, I.F. (2000). Blast furnace production at the turn of the XXI century. *Novosti chernoï metallurgii za rubezhom*. Moscow: *Chermetinformatsiia*, 42 p. [in Russian].
2. Tovarovskij, I.G. (2003). Blast furnace smelting. Evolution, progress of processes, problems and prospects. Dnepropetrovsk: Porogi, 597 p. [in Russian].
3. Yaroshevskij, S.L. (1988). Smelting iron using pulverized coal. Moscow: *Metallurgiiia*, 176 p. [in Russian].
4. Yaroshevskij, S.L., Afanas'eva, Z.K., Kuzin, A.V. (2009). 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 Mezhdunar. nauch.-prakt. Konf. 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., Toksopeus, Kh., Van der Vliet, K. (2004). Modern blast furnace process. Introduction. Niderlandy, 131 p. [in Russian].
6. The last steps of a long way: metallurgists are completing the introduction of technology, giving them significant savings. URL: [http://www.ukrudprom.ua/digest/Poslednie\\_shagi\\_dolgogo\\_PUTi\\_metalurgi\\_zavershayut\\_vnedrenie\\_te.html](http://www.ukrudprom.ua/digest/Poslednie_shagi_dolgogo_PUTi_metalurgi_zavershayut_vnedrenie_te.html) (Last accessed 10.10.2018) [in Russian]
7. Tereshchenko, V.P. (2006). The history of the development of pulverized coal technology at the Donetsk Metallurgical Plant: 1963–2006. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Pyleugol'noe toplivo – al'ternativa prirodnomu gazu pri vyplavke chuguna"*. Proceedings of the international scientific-practical conference "Chimney fuel – an alternative to natural gas in the smelting of iron". Donetsk, Nord komp'juter, pp.13–23 [in Russian].
8. Yaroshevskij, S.L., Emchenko, A.V., Popov, V.E. et al. (2010). Efficiency and prospects for replacing natural gas with pulverized coal in blast furnaces of Ukraine. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 7, pp. 13–20 [in Russian].
9. Yaroshevskij, S.L. (2006). Coal fuel – a real and effective alternative to natural gas in metallurgy. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 3, pp. 15–20 [in Russian].

10. Ryzhenkov, A.N., Yaroshevskij, S.L., Krikunov, B.P. et al. (2005). Melting technologies using pulverized coal and natural gas on an oxygen-enriched blast. *Stal'*, no. 12, pp. 13–18 [in Russian].
11. Kurunov, I.F. (2010). The blast furnace production of China, Japan, North America, Western Europe and Russia. Trudy mezhdunarodnogo kongressa domenshchikov. Proceedings of the International Congress of ironmakers. Moscow: Izdatel'skii dom "Kodeks". pp. 6–17 [in Russian].
12. Dyshevich, I.I., Iziumskij, N.N. (2002). Ukrainian blast furnace production: a new approach to assessing the quality of coke. Sbornik dokladov 8-go mezhdunarodnogo seminar "Ugol' v metallurgii i energetike". Collection of reports of the 8th international seminar "Coal in metallurgy and power engineering", Yalta: Kontrast, pp. 20–33 [in Russian].
13. Kharahulakh, V.S., Zakharchenko, V.N. (2010). Blast production of Ukraine. Trudy mezhdunarodnogo kongressa domenshchikov. Proceedings of the International Congress of Ironmakers. Moscow: Izdatel'skii dom "Kodeks", pp. 24–32 [in Russian].
14. Ryzhenkov, A.N., Gordienko, A.I., Kovalev, E.T. et al. (2006). Requirements for the quality of coke for blast furnace smelting using pulverized coal and industrial experience in the production of such coke in Ukraine. Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Pyleugol'noe toplivo – al'ternativa prirodnomu gazu pri vyplavke chuguna". Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Dust-free fuel is an alternative to natural gas in the smelting of iron". Donetsk: UNITEH, pp. 65–76 [in Russian].
15. Zolotukhin, Yu.A., Andreichikov, N.S., Kukolev, Ya.B. (2009). Quality requirements for coke for blast furnaces operating with different specific consumption of pulverized coal. *Koks i khimiia*, no. 3, pp. 25–31 [in Russian].
16. Filatov, Yu.V., Kovalev, E.T., Shul'ga, I.V. et al. (2011). Theory and practice of production and use of improved quality coke. Kiev: Naukova dumka, 128 p. [in Russian].
17. Filatov, Yu.V., Ryzhenkov, A.N., Krikunov, B.P. et al. (2006). Effect of coke of improved quality on the operation of a blast furnace with injection of pulverized coal without natural gas. Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Pyleugol'noe toplivo – al'ternativa prirodnomu gazu pri vyplavke chuguna". Proceedings of the international scientific-technical conference "Dust-free fuel is an alternative to natural gas in the smelting of pig iron". Donetsk: UNITEH, pp. 248–254 [in Russian].
18. Vents, V.A., Cheremiskina, A.N., Kisel'ov, N.I. et al. (2006). Study of the dependence of the strength parameters of metallurgical coke on its particle size distribution. *Koks i khimiia*, no. 11, pp. 12–27 [in Russian].
19. Sibagatullin, S.K., Harchenko, A.S., Teplykh, E.O. et al. (2012). Strength characteristics of coke nut of different origin. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. Bulletin of Magnitogorsk State Technical University G.I. Nosov*, no. 1, pp. 19–21 [in Russian].
20. Kopyrin, I.A., Krol', V.L., Andrianov, V.F. (1967). On the optimal coke size. *Metallurg*, no. 8, pp. 10–13 [in Russian].
21. Loginov, V.I., Berin, A.L., Solomatin, S.M. et al. (1977). The effect of mixing ore with coke on gas-dynamic conditions and technical and economic indicators of blast-furnace smelting. *Stal'*, no. 5, pp. 391–394 [in Russian].
22. Korobov, I.I., Kotov, K.I., Pinchuk, S.I. et al. (1969). About the possibility of using small coke in modern blast furnace technology. *Metallurgicheskaja i gornorudnaia promyshlennost'*, no. 5, pp. 40–43 [in Russian].
23. Loginov, V.I., Musienko, K.A., Voronkov, D.V. et al. (1987). The operation of a blast furnace with the joint loading of iron ore materials and coke into a skip. *Stal'*, no. 12, pp. 7–12 [in Russian].
24. Gottlib, A.D. (1966). Ironmaking. Moscow: *Metallurgija*, 530 p. [in Russian].
25. Litvinov, L.F., Yaroshevskij, S.L., Kuznetsov, A.M. et al. (2004). Production and use of coke nut in blast furnace smelting. Donetsk: Komp'iuter Nord, 68 p. [in Russian].
26. Emchenko, A.V., Krikunov, B.P., Yaroshevskij, S.L. et al. (2011). Studies of the effectiveness of the use of coke nut in blast furnace smelting. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 9-10, pp. 25–30 [in Russian].
27. Yaroshevskij, S.L., Kuznetsov, A.M., Padalka, V.P. et al. (2006). Efficiency of blast furnace smelting technology when using in a mixture of coke nut. *Stal'*, no. 3, pp. 2–6 [in Russian].
28. Litvinov, L.F., Yaroshevskij, S.L., Kuznetsov, A.M. et al. (2004). Efficiency of blast furnace smelting technology when loading a coke nut mixed with an iron ore charge into the furnace. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 12, pp. 5–9 [in Russian].
29. Yaroshevskij, S.L., Kuznetsov, A.M., Padalka, V.P. et al. (2005). Industrial experience and efficiency of using coke nut mixed with iron ore charge. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 6, pp. 3–6 [in Russian].
30. Ryzhenkov, A.N., Savranskij, L.V., Yaroshevskij, L.V. et al. (2005). The technology of blast-furnace smelting with injection of pulverized coal and natural gas into a forge on an oxygen-enriched blast, providing replacement of 30–40 % of coke. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 1–2, pp. 3–10 [in Russian].
31. Ramm, A.N. (1980). Modern domain process. Moscow: *Metallurgija*, 303 p. [in Russian].
32. Kitaev, B.I., Yaroshenko, Yu.G., Lazarev, B.L. (1966). Heat exchange in a blast furnace. Moscow: *Metallurgija*, 355 p. [in Russian].
33. Babij, V.I., Kuvaev, V.F. (1986). Combustion of coal dust and the calculation of pulverized coal torch. Moscow: Energoatomizdat, 208 p. [in Russian].
34. Kuznetsov, A.M., Zubenko, A.V., Padalka, V.P. et al. (2017). Development and efficiency of blast-smelting technology using pulverized coal at JSC "Enakievsky Metallurgical Plant". *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 8-10, pp. 4–11 [in Russian].

35. Kurunov, I.F., Savchuk, N.A. (2002). The state and prospects of blast-furnace iron metallurgy. Moscow: Chernetinformatsiia, 198 p. [in Russian].
36. Nozdrachev, V.A., Yaroshevskij, S.L., Tereshchenko, V.P. (1996). Promising technologies for blast smelting using oxygen and pulverized coal. Donetsk: Novyi mir, 197 p. [in Russian].
37. Situlin, N.A., Mel'nikov, E.Ya., Furman, M.S., Krichevskij, I.R. (1967). Handbook of nitrogen engineer. Moscow: Khimiia, 492 p. [in Russian].

Received 24.10.2018

## Анотація

**С.Л. Ярошевський<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри;  
**В.В. Кочура<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доц., зав. кафедри,  
e-mail: kochura@ukr.net; **О.М. Кузнєцов<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, нач.  
доменного цеху; **І.В. Шульга<sup>3</sup>**, канд. техн. наук, доц., зав. відділу;  
**А.С. Хайбулаєв<sup>2</sup>**, нач. лабораторії; **З.К. Афанасьєва<sup>1</sup>**, ст. викладач

<sup>1</sup>Донецький національний технічний університет, м. Донецьк, Україна

<sup>2</sup>Єнакієвський металургійний завод, м. Єнакієво, Україна

<sup>3</sup>ДП «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут», м. Харків, Україна

## Ефективність та ресурси пиловугільної технології виплавки чавуну

Розглянуто ефективність і ресурси пиловугільної технології виплавки чавуну. Виконано розрахунки перспективної технології з витратою пиловугільного палива (ПВП) 180 кг/т чавуну і компенсації його негативного впливу за рахунок підготовки коксу до плавки, використання коксу поліпшеної якості, коксового горішка (до 80 кг/т чавуну), підвищення температури дуття, що дозволило знизити витрату коксу до 298,7 кг/т чавуну (176,9 кг/т чавуну, 37,2 % зниження від базового рівня) і підвищити продуктивність печі на 398,2 т/добу (12,7 %).

## Ключові слова

Пиловугільне паливо, чавун, кокс, природний газ, коксовий горішок, доменна піч.

## Summary

**S.L. Yaroshevskiy**<sup>1</sup>, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Professor at the Department; **V.V. Kochura**<sup>1</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Head of Department, e-mail: kochura@ukr.net; **A.M. Kuznetsov**<sup>2</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Blast-furnace Foreman; **I.V. Shulga**<sup>3</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Head of Department; **A.S. Khaibulaev**<sup>2</sup>, Head of Laboratory; **Z.K. Afanaseva**<sup>1</sup>, Senior Lecturer

<sup>1</sup>*Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine*

<sup>2</sup>*Yenakiieve Iron and Steel Works, Yenakiieve, Ukraine*

<sup>3</sup>*SE "Ukrainian State Research Institute of Coal Chemistry", Kharkov, Ukraine*

## Efficiency and resources of ironmaking with pulverized coal injection

*The efficiency and resources of pulverized coal ironmaking technology are considered. The promising technology was calculated with a flow rate of pulverized coal (PC) of 180 kg/t of pig iron and compensation of its negative impact by preparing coke for smelting, using coke of improved quality, coke nut (up to 80 kg/t of pig iron), increasing the blast temperature, which reduced coke consumption to 298.7 kg/t of pig iron (176.9 kg/t of iron, 37.2 % reduction from the base level) and increased the furnace productivity by 398.2 tons/day (12.7 %).*

## Keywords

*Pulverized coal, pig iron, coke, natural gas, coke nut, blast furnace.*