

**В. Н. Захарченко, Ю. Р. Руденко\*, Ю. К. Лебедь\*, В. А. Бозылев**

Объединение предприятий «Металлургпром», Днепропетровск

\*ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского», Днепропетровск

## Определение эффективности применения пылеугольного топлива в доменной плавке

Представлены расчёты коэффициента замены кокса ПУТ и доли сгоревшего ПУТ на воздушных фурмах, с учётом изменения технико-экономических показателей доменной плавки в условиях ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского».

**Ключевые слова:** пылеугольное топливо, коэффициент замены кокса ПУТ, степень прямого восстановления, теплоотдача углерода

Энергоэффективная технология вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) в доменные печи освоена в пяти доменных цехах металлургических предприятий Украины: ПрАО «Донецксталь»-металлургический завод», ПАО «Алчевский металлургический комбинат», ОАО «Запорожсталь», ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича» и ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского» [1].

Ведутся работы по внедрению энергоэффективной технологии в доменных цехах на: ПАО «Енакиевский металлургический завод», ПАО «Металлургический комбинат «АЗОВСТАЛЬ», ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» и ПАО «ЕВРАЗ – Днепропетровский металлургический завод им. Петровского».

Наиболее важным определяющим требованием технологии вдувания пылеугольного топлива является обеспечение полного сгорания ПУТ в пределах фурменной зоны доменной печи. Выход частиц пылеугольного топлива за пределы фурменной зоны вызывает снижение коэффициента замены кокса, ухудшение вязкости шлака и газопроницаемости нижней части доменной печи. Полное сгорание частиц угольной пыли в фурменных очагах определяется фракционным составом угля, содержанием летучих веществ, температурой фурменной зоны и содержанием кислорода в дутье.

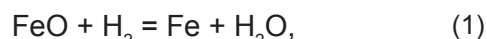
**Цель работы** – определение эффективности применения пылеугольного топлива в доменной плавке.

Для оценки эффективности применения ПУТ в доменной плавке определяется теоретический коэффициент замены кокса ПУТ.

При подаче в горн 1 кг ПУТ образуется  $1 \cdot 5 / 100 = 0,05$  кг водорода, где 5 – содержание водорода ПУТ, %.

Из образовавшегося 0,05 кг водорода только часть используется в реакциях косвенного восстановления. При расчёте эффективности применения ПУТ степень использования водорода – 0,3. Количество водорода, участвующего в реакциях косвенного восстановления, составит:  $0,3 \cdot 0,05 = 0,015$  кг.

Экономии углерода от поступления водорода в рабочее пространство доменной печи определяют, рассматривая реакции восстановления [2]:



По реакции (1) 0,015 кг водорода восстанавливают железа, кг:  $\Delta\text{Fe} = 0,015 \cdot 56 = 0,840$ , где 56 – атомная масса железа.

Снижение расхода кокса по реакции (2) составит, кг:  $0,840 \cdot 12 / 56 = 0,180$  кг, где 12 – атомная масса углерода.

Теплоотдача углерода составит:  $Q = [2340 + 0,933 \cdot (C_d - q \cdot C_k \cdot t_k) / O_2] \cdot K$ , где  $Q$  – теплоотдача углерода, ккал/кг; 0,933 – расход кислорода на газификацию 1 кг углерода до CO, м<sup>3</sup>/кг;  $C_d$  – теплосодержание дутья, с учётом диссоциации водяных паров, ккал/м<sup>3</sup>;  $q$  – выход колошникового газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $C_k$  – теплоёмкость колошникового газа, ккал/(м<sup>3</sup>·град);  $t_k$  – температура колошникового газа, °С;  $K$  – коэффициент использования тепла.

При расчёте теплоотдачи углерода приняты следующие параметры дутья и колошникового газа:

Температура дутья, °С	1000
Содержание кислорода, %	21
Влажность, %	1,0
Температура колошникового газа, °С	300
Выход колошникового газа, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	1,3
Теплоёмкость колошникового газа, ккал/(м <sup>3</sup> ·град.)	0,35
Коэффициент использования тепла	0,85

Теплосодержание дутья рассчитывалось с учётом теплоёмкости сухого воздуха и водяного пара [3].

При данных условиях  $Q = 2645$  ккал/кг.

Так как реакция (2) эндотермическая, уменьшение скорости её развития снижает расход углерода как теплоносителя:  $0,840 \cdot 649 / 2645 = 0,206$  (кг), где 649 – расход тепла на восстановление 1 кг железа по реакции  $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$  (ккал).

При вдувании в фурменную зону частиц размером 100 мкм и температуре дутья 1000 °С за время нахождения частицы в фурменной зоне (0,01...0,04 с) сгорит около 60...80 % угля, а остальная часть достигнет границ зоны в виде дегазированных частиц.

Дальнейшее поведение несгоревших частиц может развиваться по одному из сценариев:

- вторичная газификация углерода угольной пыли с помощью  $\text{CO}_2$ ;
- окисление углерода угольной пыли при помощи оксидов жидкой фазы ( $\text{FeO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$  и т. д.);
- улавливание частиц шихтой с переходом в нижние слои доменной печи с последующим сгоранием в фурменных очагах.

Независимо от расхода вдуваемого ПУТ 66 % всего несгоревшего угля выносятся через колошник, 23 % расходуется в реакции газификации углерода, а остальные 11 % попадают в центральную зону горна доменной печи.

Увеличение расхода углерода из-за расхода тепла на газификацию углерода ПУТ по реакции  $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$ , кг:  $694 \cdot 0,23 \times 0,3 / 2645 = 0,018$ , где 694 – расход тепла на газификацию 1 кг углерода, ккал; 0,3 – доля несгоревшего ПУТ в фурменной зоне; 0,23 – доля угля, расходуемого в реакции газификации.

Всего уменьшение расхода углерода по реакциям восстановления и изменения теплотребности процесса вследствие снижения степени прямого восстановления составляет  $0,180 + 0,206 - 0,018 = 0,368$  кг.

Общее уменьшение расхода углерода составит:  $0,63 \cdot 0,7 + 0,368 = 0,809$  кг/кг, где 0,63 – доля углерода ПУТ; 0,70 – доля сгоревшего углерода ПУТ, сгоревшего в фурменной зоне.

Коэффициент замены кокса ПУТ равен:  $0,809 / 0,87 = 0,930$ , где 0,87 – доля углерода в коксе.

Из расчётов следует, что 0,809 кг приходится на долю углерода ПУТ и снижения расхода углерода кокса в реакциях восстановления.

В результате статистической обработки производственных данных ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского» установлено, что увеличение содержания водорода ПУТ на 1 % приводит к снижению содержания углерода в нём на 13,4 % (рис. 1).

Зависимость коэффициента замены кокса ПУТ при степени использования водорода в реакциях восстановления – 0,30; доле угля сгоревшего в фурменной зоне – 0,7; температуре горячего дутья –  $1000^\circ\text{C}$ ; содержании кислорода в дутье – 21 %, температуре колошникового газа –  $300^\circ\text{C}$ ; выходе колошникового газа –  $1,3 \text{ м}^3/\text{м}^3$  приведена в таблице 1.

По разработанной методике рассчитана доля сгоревшего ПУТ в фурменной зоне в период освоения технологии доменной плавки с применением ПУТ на доменной печи с полезным объёмом  $1386 \text{ м}^3$ . Расчёт

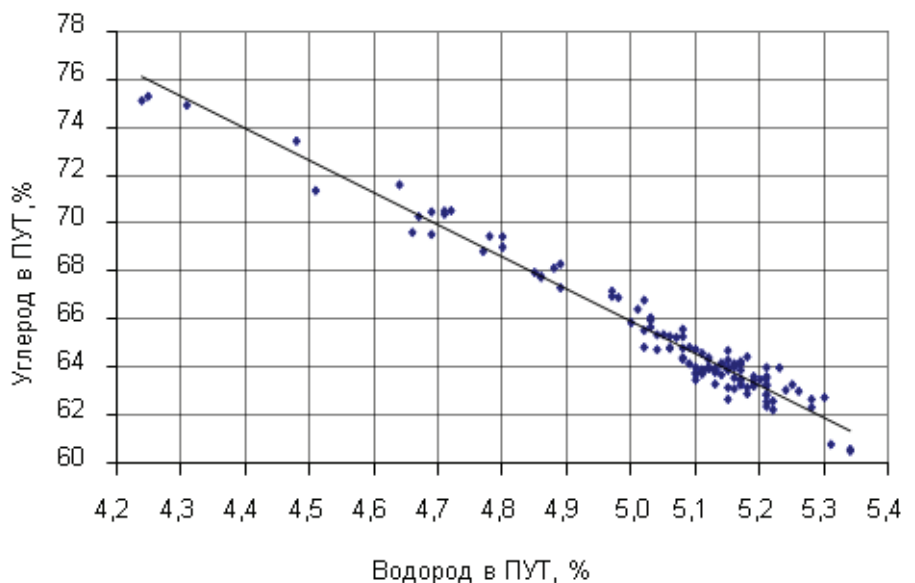


Рис. 1. Зависимость содержания углерода в ПУТ от водорода

Таблица 1

### Зависимость коэффициента замены кокса ПУТ

Показатели	Варианты		
	I	II	III
Содержание водорода ПУТ, %	4,0	5,0	6,0
Содержание углерода ПУТ, %	79,3	65,9	52,5
Участие водорода в реакциях восстановления, кг:			
количество железа, восстановленного водородом	0,672	0,840	1,008
снижение расхода углерода как восстановителя	0,144	0,180	0,216
снижение расхода углерода как теплоносителя	0,165	0,206	0,247
Суммарное снижение углерода в реакциях восстановления и теплообменных процессах, кг	0,147	0,188	0,229
Снижение углерода кокса от углерода ПУТ, кг	0,555	0,461	0,368
Экономия углерода кокса, кг	0,702	0,649	0,597
Расчетный коэффициент замены кокса ПУТ, кг	0,972	0,953	0,934

производился с учётом изменения основных технологических показателей. По результатам расчёта определена зависимость доли ПУТ, сгоревшего в фурменной зоне от его расхода (рис. 2). Из полученной зависимости следует, что увеличение количества вдуваемого ПУТ на 10 кг/т приводило к уменьшению доли ПУТ, сгоревшего в фурменной зоне, на 7 %.

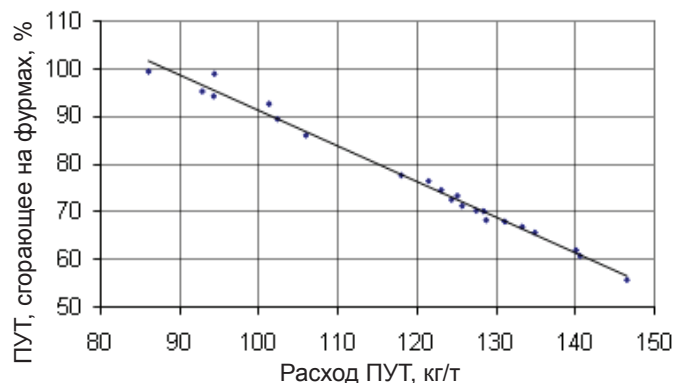


Рис. 2. Зависимость количества ПУТ, сгоревшего на воздушных фурмах, от его расхода

Таблица 2

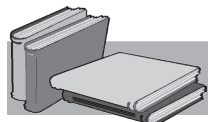
В табл. 2 приведены показатели плавки на доменной печи полезным объёмом 1386 м<sup>3</sup> при её работе в разных условиях по расходу ПУТ и параметрам дутья. В расчёте принята степень использования водорода в реакциях восстановления 0,30.

### Выводы

В результате статистической обработки производственных данных ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского» разработана методика расчёта коэффициента замены кокса ПУТ и доли сгоревшего ПУТ на воздушных фурмах в реальном масштабе времени, что позволяет оперативно оценивать влияние ПУТ на тепловую работу печи.

### Показатели доменной плавки

Показатели	Период		
	I	II	III
Производство, т/сутки	2561,00	2581,00	2677,00
Расход сухого скипового кокса, кг/т	400,60	487,30	408,6
Содержание углерода в коксе, %	86,40	85,90	86,6
Расход ПУТ, кг/т	118,50	77,30	123,5
Содержание в ПУТ, %:			
Н <sub>2</sub>	4,80	5,00	5,2
С	79,70	85,20	84,8
Состав чугуна, %:			
кремний	0,690	0,790	0,70
марганец	0,091	0,101	0,099
сера	0,037	0,020	0,017
фосфор	0,074	0,072	0,072
Давление, кг/см <sup>2</sup> :			
горячего дутья	2,33	2,41	2,39
колошникового газа	1,16	1,19	1,16
Расход горячего дутья, м <sup>3</sup> /мин	2590,00	2824,00	2622,00
Влажность дутья, %	1,16	1,32	1,26
Температура горячего дутья, °С	959,00	884,00	952,00
Содержание кислорода в дутье, %	23,60	23,80	23,70
Состав колошникового газа, %:			
СО <sub>2</sub>	17,80	19,00	21,9
СО	19,70	21,00	22,7
Н <sub>2</sub>	2,60	2,90	3,3
Выход колошникового газа, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	1,26	1,09	1,18
Температура колошникового газа, °С	339,00	336,00	344,00
Количество водорода в колошниковом газе, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	0,033	0,032	0,039
Скорость истечения дутья, м/с	211,0		212,00
Коэффициент замены кокса ПУТ	1,02	1,10	0,99
Доля сгоревшего ПУТ в фурменной зоне	65,30	66,50	55,70



## ЛИТЕРАТУРА

1. Захарченко В. Н. Технично-економическі показателі роботи доменних і агломерационних цехів металургічних підприємств України за 2014 рік / В. Н. Захарченко. – Днепропетровск.: ОП «Металургпром», 2015. – 18 с.
2. Васюра Г. Г. Определение эффективности использования природного газа в доменной плавке / Г. Г. Васюра // Чёрная металлургия. – 2003. – № 11. – С. 35-40.
3. Полтавец В. В. Доменное производство / В. В. Полтавец. – М.: Металлургия. – 1981. – 242 с.

### Анотація

Захарченко В. М., Руденко Ю. Р., Лебідь Ю. К., Бозильов В. А.  
Визначення ефективності вживання пиловугільного палива  
в доменній плавці

Представлено розрахунок коефіцієнта заміни коксу ПВП та частки згорілого ПВП на повітряних фурмах, з урахуванням зміни техніко-економічних показників доменної плавки в умовах ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Ф. Е. Дзержинського».

### Ключові слова

пиловугільне паливо, коефіцієнт заміни коксу ПВП, ступінь прямого відновлення, тепловіддача вуглецю

The calculation of coke CDF replacement factor and part of burned away CDF on air tuyeres are presented taking into account the change of technical-and-economic indexes of blast-furnace melting under conditions of the Public joint-stock company «F. E. Dzerzhinskogo's Dnepr integrated iron-and-steel works»

### Оформление рукописи для опубликования в журнале "Металл и литьё Украины":

Материалы для публикации необходимо  
подавать в формате, поддерживаемом Microsoft Word,  
размер страницы А4, книжная ориентация,  
шрифт – Arial, 10, междустрочный интервал – 1,5.  
Объём статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.

#### Рукопись должна содержать:

- УДК;
- фамилии и инициалы всех авторов (на русском, украинском и английском языках);
- название статьи (на русском, украинском и английском языках);
- название учреждения(й), в котором(ых) работает(ют) автор(ы);
- аннотации (на русском, украинском и английском языках);
- ключевые слова (не менее шести) – на русском, украинском и английском языках;
- предлагаемая структура текста (Arial 10, прямой) научной статьи:  
«Введение», «Материалы и методы», «Результаты и обсуждение», «Выводы».
- таблицы должны иметь порядковый номер (Arial 10, курсив) и заголовок (Arial 10, п/ж),  
текст в таблице (Arial 9, прямой), примечания к таблицам размещаются непосредственно  
под таблицей (Arial 8, курсивом).
- формулы (Arial 11, русские символы – прямым, английские – курсивом, греческие –  
Symbol 12, прямым) должны иметь порядковый номер (Arial 10, прямой);
- рисунки, схемы, диаграммы и другие графические материалы должны быть чёрно-  
белыми, чёткими, контрастными, обязательно иметь номер и подрисуночную подпись  
(Arial 9, прямой); все громоздкие надписи на рисунке следует заменять цифровыми или  
буквенными обозначениями, объяснение которых необходимо выносить в подрисуночную  
подпись;
- список литературы (Arial 9);
- ссылки нумеруются в порядке их упоминания в тексте, где они обозначаются  
порядковой цифрой в квадратных скобках (например - [1]).