

## МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.1: 620.9

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/48>

**Тесленко О.І.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

**Куц Г.О.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

### ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЙ ЗАМІЩЕННЯ КОКСУ В ДОМЕННОМУ ВИРОБНИЦТВІ

*Проведено техніко-економічну оцінку двох технологій приготування заміщувачів скіпового коксу в доменних печах, а саме: пиловугільного палива (ПВП) та горючих відновлювальних газів (доменного газу). Порівнювання ефективності цих заміщувачів проводилась за показниками повної технологічної енергоємності їх приготування до вдування в доменну піч. За результатами розрахунків встановлено, що енергоємність технології приготування пиловугільного палива у 3,54 рази більше енергоємності технології приготування доменного газу внаслідок високої енергоємності вихідної сировини (кам'яного вугілля). Відповідно, вартість приготування ПВП у 2,57 разу вища ніж доменного газу, але технологія приготування доменного газу має високі капіталовкладення у технологічну схему очищення газу від CO<sub>2</sub>. Крім цього зазначена технологія має недостатній поширений досвід застосування процесу вдування доменного газу в доменну піч. Співвідношення повної енергетичної енергоємності розглянутих технологій приготування заміщувачів скіпового коксу у доменному виробництві та їх теплотворної здатності (калорійності): для ПВП складає 6,62%, для відновлювального (доменного) газу складає 9,45%. За останні роки у ряді країн у доменному виробництві проводяться дослідно-практичні роботи по удосконаленню технології приготування і процесу вдування доменного газу у доменну піч. Технологія вдування ПВП апробована та широко впроваджена на металургійних підприємствах як в Україні, так і в світовій практиці. Особливо привабливим напрямом розвитку цієї низьковуглецевої технології є розробки щодо електролізу водню з наступним його вдуванням разом з ДГ в доменну піч, а супутній продукт (кисень) буде додаватися до повітря дуття для інтенсифікації процесу згорання палива в доменній печі.*

**Ключові слова:** заміщувачі коксу, технологічна енергоємність, технологія приготування, пиловугільне паливо, доменний газ.

**Постановка проблеми.** Проведений аналіз технологічних напрямів зменшення обсягів споживання високовартісного та високо вуглецевмісного коксу у доменному виробництві чорної металургії показав, що до таких основних технологій відносяться заміщення скіпового коксу [1, 2]. До переліку видів заміщувачів коксу вноситься природний газ, пиловугільне паливо (ПВП) та горючі відновлювальні газу (доменний газ – ДГ). В минулому столітті широко використовувався природний газ, однак внаслідок стрімкого зростання вартості природного газу (в 10-20 разів) використання його в доменному виробництві було майже припинено.

**Аналіз останніх досліджень.** Особливо широке застосування у доменному виробництві чорної металургії як у світовій, так і вітчизняній

практиці набула технологія вдування пиловугільного палива. В доменних цехах освоєно більше ніж у 25 розвинутих країн світу з витратами ПВП 170–200 кг на тонну чавуну. У вітчизняній металургійній галузі використання ПВП досягло 120–140 кг на тонну чавуну, що практично забезпечило відмову від використання природного газу в доменному при зниженні витрат скіпового коксу до 20 % (перший етап впровадження ПВП в металургійній галузі) [3–5]. На другому етапі реалізації технологій вдування ПВП у доменну піч передбачається досягнути витрат заміщувача до 150–250 кг на тонну чавуну, що забезпечить зниження витрат коксу на 40–50 % і значно підвищить рентабельність металургійної галузі [4]. Але, як показав досвід доменних виробництв розвинутих країн, досягнення такого рівня викорис-

тання ПВП потребує відповідних технологічних заходів, а саме: підвищення температури дуття до 1300°C та вмісту кисню в повітрі доменного дуття до 25–33 %, збагачення залізорудної шихти до рівня 62–65 % вмісту заліза, зниження основності шлаку ( $\text{CaO/SiO}_2$ ) до 1–1,5 зі зниженням його утворення до  $200 \div 300$  кг/т чавуну [6, 7].

Приготування ПВП здійснюється на промислових комплексах доменних виробництв металургійних підприємств з повним технологічним циклом. Піловугільні комплекси обладнані молотковими і шаровими млинами, які одночасно є сушильними агрегатами, електромагнітними сепараторами, стрічковими конверторами, приладами контролю та обліку.

За результатами роботи [5] застосування технології вдування ПВП до 180–185 кг/т чавуну забезпечило припинення використання природного газу в доменному виробництві, як заміщувача коксу, зменшило витрати скіпового коксу на 130 – 140 кг/т чавуну (28,6–31,3 %) та підвищило продуктивність доменної печі на 23,0–23,7 %.

Достатньо актуальною схемою є технологія заміщення коксу в доменній печі використанням горючих вторинних енергоресурсів, а саме: доменного газу, який є сировиною для отримання відновлювального газу після його очищення від двоокису вуглецю ( $\text{CO}_2$ ). Із діючих на сьогодні методів очищення доменного газу від  $\text{CO}_2$  в роботі розглядається метод застосування охолодженого метанолу (процес Ректизол). Перевагою зазначеного методу порівняно з іншими є його економічність, але технологія потребує громіздкого устаткування процесу очищення газу [8].

**Метою дослідження** є визначення та порівняльний аналіз техніко-економічних показників приготування заміщувачів скіпового коксу: піловугільного палива та відновлювального (доменного) газу.

**Виклад основного матеріалу.** Техніко-економічна оцінка зазначених заміщувачів скіпового коксу в доменних печах проводилась за показниками повної технологічної енергоємності їх приготування у відповідності до нормативних документів [9, 10] та науково-методичних розробок [11–12]. Для розрахунку енергоємності приготування ПВП було прийнято усереднені питомі витрати енергоресурсів піловугільними комплексами продуктивністю 10,0 і 25,0 т/год ПВП. Розрахунок повної технологічної енергоємності приготування проводився для 1 т ПВП при питомих витратах електроенергії в обсязі 48,6 кВт год, теплової енергії – 12,9 Мкал, відповідно. Результати розрахунку

надано в табл. 1, згідно яких повна технологічна енергоємність приготування ПВП складає 85,023 кг у.п./т ПВП з таким розподілом складових: енергоресурси – 18,289 кг у.п./т (21,5 % від повної енергоємності), енергоносії – 2,295 кг у.п./т (2,8 %), сировина – 64,439 кг у.п./т (75,7 %).

Для визначення енергоємності приготування ДГ питомі витрати енергоресурсів та сировини на 1000 м<sup>3</sup> ДГ за технологією рециклінга прийнято за даними роботи [8]. Показники повної технологічної енергоємності приготування ДГ для вдування в доменну піч приведено в табл. 2, згідно яких повна енергоємність дорівнює 23,988 кг у.п./1000 м<sup>3</sup> ДГ, у тому числі енергоресурси – 21,823 кг у.п. (90,9 % від повної енергоємності), енергоносії – 2,138 кг у.п. (8,9 %) і сировини 0,04 кг у.п. (0,02 %). Проведені дослідження на одному із металургійних заводів показали, що вдування ДГ у горн доменної печі дозволило знизити витрати коксу на 30 % та збільшити її продуктивність на 20–25 % [11]. Але впровадження зазначеного заміщувача коксу на даний час в металургійній галузі не знайшов промислової реалізації.

Порівняння показників приготування повної технологічної енергоємності та її складових заміщувачів скіпового коксу доменних печей показує, що енергоємність піловидного палива у 3,5 разу більше енергоємності колошникового газу за рахунок сировинної складової. Відсоток зниження обсягу використання скіпового коксу та ефективності доменної печі практично рівний між видами заміщувачів і складає 30 і 24 %, відповідно.

Співвідношення повної енергетичної енергоємності розглянутих технологій приготування заміщувачів скіпового коксу у доменному виробництві та їх теплотворної здатності (калорійності): для ПВП складає 6,62 % при теплотворній здатності антрацита 9000 ккал/кг, для відновлювального (доменного) газу складає 9,45 % при теплотворній здатності доменного газу 1800 ккал/м<sup>3</sup>.

Економічна ефективність заміщувачів оцінювалась за показниками повної технологічної енергоефективності їх приготування, а саме: кг у п /одиницю виміру. Перерахунок натуральних одиниць палива та енергії проводився за формулами та коефіцієнтами калорійних еквівалентів, наданих в науковій праці [13].

Визначення економічної ефективності заміщувачів скіпового коксу на 1 т чавуну за технологією приготування при вдуванні в доменну піч проводилось за наступними вихідними даними:

1. Обсяг вдування в горн доменної печі: піловугільного палива – 137 кг; відновлювального (доменного) газу – 162 м<sup>3</sup>.

Таблиця 1

## Повна технологічна енергоємність приготування пиловидного палива (ПВП) до вдування в доменну піч, розраховано на 1 т ПВП

Види енергоресурсів, енергоносіїв і сировини	Одиниці виміру	Обсяг витрат енергоресурсів, енергоносіїв та сировина на 1 т ПВП	Повна енергоємність ПВП за складовими, кг у.п./т	Частка енергоємності складових до повної енергоємності, %
1. Енергоресурси:			18,289	21,5
– електроенергія	кВт·год	48,0	16,342	
– теплова енергія	Мкал	12,9	1,947	
2. Енергоносії			2,295	2,8
– електроенергія	кВт·год	48,6	2,090	
– теплова енергія	Мкал	12,9	0,205	
3. Сировина				
– кам'яне вугілля	кг	1100,0	64,439	75,7
4. Повна технологічна енергоємність			85,023	100

Таблиця 2

Повна технологічна енергоємність приготування доменного газу з уловлюванням CO<sub>2</sub> (на 1000 м<sup>3</sup> ДГ)

Види енергоресурсів, енергоносіїв і сировини	Одиниці виміру	Обсяг витрат енергоресурсів, енергоносіїв та сировина на 1000 м <sup>3</sup> ДГ	Повна енергоємність відновлюваного газу, кг у. п./ 1000м <sup>3</sup> ДГ	Частка енергоємності складових до повної енергоємності газу, %
1. Енергоресурси:			21,823	90,98
– електроенергія	кВт·год	53,0	17,821	
– теплова енергія	Мкал	26,5	4,002	
2. Енергоносії			2,138	8,91
– електроенергія	кВт·год	0,5	1,464	
– теплова енергія	Мкал	0,08	0,674	
3. Сировина				
– метанол	кг	0,04	0,027	0,11
4. Повна технологічна енергоємність			23,988	100

Таблиця 3

## Порівняння ефективності заміщувачів скіпового коксу доменних печей

Вид заміщувача коксу	Повна технологічна енергоємність	У тому числі за складовими:			Зменшення споживання скіпового коксу, %	Підвищення ефективності доменної печі, %
		енерго-ресурси	енергоносії	сировина		
Пиловугільне паливо (ПВП), кг у.п./т ПВП, (%)	85,023 (100)	18,289 (21,5)	2,295 (2,80)	64,439 (75,7)	28,6...31,8	23...23,7
Доменний газ, кг у.п./1000м <sup>3</sup> , (%)	23,988 (100)	21,823 (90,9)	2,138 (8,9)	0,027 (0,02)	до 30,0	20 ÷ 25

2. Повна технологічна енергоємність приготування: пиловугільного палива (на 137 кг ПВП) – 11,648 кг у.п., у тому числі енергоносії – 2,820 кг у.п.; сировина – 8,828 кг у.п., відповідно; відновлювальний газ (на 162 м<sup>3</sup> ДГ – 3,886 кг у.п., з нього енергоресурси разом з енергоносіями – 3,886 кг у.п., сировина – 0,027 кг у.п., відповідно.

3. Вартість вугілля у 2022 році приймалась рівною 321,35 дол. США/т [14].

Перерахунок вартості вугілля з натуральних одиниць в умовні проводився за наступним алгоритмом:

$$C_{у.п.} = \frac{C_{н.у.}}{k_{екв}},$$

де  $C_{у.п.}$  – вартість умовного палива;

$C_{н.у.}$  – вартість натурального палива;

$k_{екв}$  – еквівалентний коефіцієнт перерахунку натурального палива в умовне (за даними [13]).

$k_{екв}$  прийнято рівним 0,98, що відповідає маркам антрацитового і пісного вугілля, які використовуються для приготування пиловугільного палива.

Вартість вугілля в тонах умовного палива дорівнює 327,9 дол. США/т у.п.

Таблиця 4

## Економічна оцінка повної технологічної енергоємності приготування заміщувачів скіпового коксу

Заміщувачі скіпового коксу	Обсяг вдування в горн доменної печі на 1 т чавуну	Повна технологічна енергоємність заміщувачів, кг у. п.	у тому числі		Вартість приготування заміщувачів, дол. США	у тому числі	
			енергоресурсів та енергоносіїв	сировини		енергоресурсів, енергоносіїв	сировини
Пиловугільне паливо (ПВП)	137 кг	11,648	2,820	8,828	3,820	0,925	2,895
Відновлювальний (доменний) газ	162 м <sup>3</sup>	3,886	3,886	-	1,274	1,274	-

Вартість відновлювального газу прийнято рівним нулю, оскільки колошниковий (доменний) газ відноситься до горючих вторинних енергоресурсів, які використовуються в основному на металургійних підприємствах (джерелах доменного газу) і не мають ринкові вартості.

За результатами економічної оцінки приготування заміщувачів скіпового коксу (табл. 4) у обсягах для вдування в горн доменної печі вартість повної технологічної енергоємності приготування пиловугільного палива дорівнює 3,820 дол. США/137 кг ПВП (або 27,883 дол. США/1т ПВП), у тому числі енергоресурси і енергоносії – 0,925 і сировини – 2,895 дол. США, відновлювальних газів – 1,274 дол. США/162 м<sup>3</sup> ДГ (або 7,864 дол. США/1000 м<sup>3</sup> ДГ). Це відноситься до вартості енергоресурсів, енергоносіїв і сировини, тобто вартість приготовленого пиловугільного палива визначається головним чином енергоємністю сировини (кам'яного вугілля).

Аналіз наведених результатів розрахунку вартості технологій приготування заміщувачів скіпового коксу демонструє, що вартість приготування ПВП у 2,57 рази вища, ніж ДГ внаслідок суттєво більшої вартості вихідної сировини (кам'яного вугілля). Але, незважаючи на більш низьку вартість приготування ДГ, як заміщувача скіпового коксу порівняно з ПВП, процес вдування відновлювальних газів в доменному виробництві чорної металургії України, так і у розвинутих країнах, поки що не знайшов застосування. Це пов'язано з відносно значними капіталовкладеннями у технологічне устаткування та відсутністю промислового досвіду вдування ДГ в доменну піч. За останні роки проводиться удосконалення технології очищення ДГ методом глибокої рекуперації регенеруючого розчину, що знижує енергетичні витрати у 2,0–2,5 рази без збільшення капіталовкладень і, як результат, підвищує актуальність

застосування відновлюваних газів у доменному виробництві [15].

Особливо привабливим напрямом розвитку цієї низьковуглецевої технології є розробки щодо електролізу водню з наступним його вдуванням разом з ДГ в доменну піч, а супутній продукт (кисень) буде додаватися до повітря дуття для інтенсифікації процесу згорання палива в доменній печі [16, 17].

**Висновки.** Проведена техніко-економічна оцінка ефективності застосування заміщувачів скіпового коксу у доменних печах за показниками їх повної технологічної енергоємності їх приготування показала наступне:

- повна технологічна енергоємність технології приготування ПВП у 3,54 рази більша технології приготування відновлювального (доменного) газу – 85,023 кг у.п./1 т ПВП проти 23,988 кг у.п./1000 м<sup>3</sup> ДГ, відповідно;

- висока технологічна енергоємність ПВП порівняно з енергоємністю ДГ обумовлена високою енергоємністю вихідної сировини (кам'яного вугілля);

- внаслідок цього вартість приготування ПВП у 2,57 рази більша, ніж відновлювального газу (3,82 дол. США/137 кг ПВП проти 1,274 дол. США/162 м<sup>3</sup> ДГ, відповідно у обсягах вдування в доменну піч);

- технологія вдування відновлювального газу поки що не знайшла широкого застосування в доменному виробництві України та у розвинутих країнах світу з причин високих капіталовкладень у технологічну схему та відсутність достатнього промислового досвіду процесу його вдування в доменну піч;

- за останні роки у доменному виробництві ряду країн проводиться удосконалення технології приготування відновлювального газу, що дає надію на широке застосування даного заміщувача скіпового коксу.

Список літератури:

1. Смірнов О. М., Тімошенко С. М., Нарівський А. В. Відновлення та інноваційний розвиток виробництва сталі в Україні в контексті енергоефективності та європейського зеленого курсу. *Вісн. НАН України*. 2023. № 4. С. 23 – 38. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2023.04.021>
2. Тесленко О.І., Куц Г.О. Структурні та технологічні напрями зменшення викидів парникових газів підприємствами чорної металургії. *Вчені записки Таврійського національного університету В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. 33 (72), №6. С. 165–173. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/27>
3. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. European Commission. Joint Research Centre & Institute for technological studies. 2013. URL: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu> (дата звернення: 20.08.2023).
4. Zhang W., Wang Z.Y., Wang X.L., Zhang L.G. Experimental study of pulverized coal added dust injection into blast furnace. The 9th CSM Steel Congress Proceeding. Beijing. 2009.
5. Ярошевський С.Л., Ємченко О.В., Попов В.Є. та ін. Ефективність та перспективи заміни природного газу пиловугільним паливом у доменних печах України. *Метал та лиття України*. 2010. №7. С. 13–20.
6. Назюта Л. Ю. До питання ефективності технології вдування ПВП в умовах металургійних підприємств України. *Метал та лиття України*. 2014. №1 (248). С. 3–14.
7. Van der Stel J. et al. Developments of the ULCOS low CO<sub>2</sub> blast furnace process at the LKAB Experimental BF in Luleå. 1st Intern. Conf. on Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Reduction in the Steel Industry (EECR). Dusseldorf, Germany. 27 June – 1 July 2011.
8. Чайка О.Л. Аналіз тенденцій розвитку уявлень та технологій, спрямованих на зменшення емісії діоксиду вуглецю в доменному виробництві/ О.Л. Чайка, Б.В. Корнілов, О.Є. Меркулов, А.О. Москалина, В.В. Лебідь, Ізюмський М.М.// *Метал та лиття України*. 2022. Т.30. №2 (329). С. 8–19. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>
9. ДСТУ 3682-98 (ГОСТ 30583-98) Енергозбереження. Методика визначення повної енергоємності продукції, робіт, послуг. Держстандарт України. Київ. 1998. 11 с.
10. ДСТУ 3740-98. Енергозбереження. Методи аналізу та розрахунку зниження витрат палива та енергії на металургійних підприємствах. Держстандарт України Київ. 1999. 11 с.
11. Hiroshi Nogami, Jun-ichiro Yagi, Shin-ya Kitamura, Peter Richard Austin. Analysis on Material and Energy Balances of Ironmaking Systems on Blast Furnace Operations with Metallic Charging, Top Gas Recycling and Natural Gas Injection. ISIJ International. 2006. V.46. № 12. Pp.1759–1766. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.1759>
12. Maliarenko O., Horskii V., Stanytsina V., Bogoslavskaya O., Kuts H. (2020). An improved approach to evaluation of the efficiency of energy saving measures based on the indicator of products total energy intensity. *Studies in Systems, Decision and Control* 298, 201–216. DOI:10.1007/978-3-030-48583-2\_13
13. Куц Г.О., Галіновський Є.І., Мельник В.І. Методичні положення щодо визначення теплоти згорання палива та перерахунку електро- і теплоенергії з натуральних одиниць на умовне паливо. *Проблеми загальної енергетики*. 2004. № 11. С. 53–59.
14. Енергомоніторинг / Енергобізнес. 04.2022, Expro Ellectricity URL: <http://expro.com.ua> (дата звернення: 21.08.2023).
15. Катаєв А.А. Досвід та перспективи енергозбереження ресурсомістких підприємств чорнометалургійного комплексу України. *Економіка України*. 2013. №9 (614). С. 18–30.
16. Томаш М. О., Сущенко А.В. Застосування пароводяної конверсії природного газу в доменному виробництві. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2011. Вип. 22. С.31–35.
17. A new way to clean up the steel industry. *The Economist*. Feb 15th 2023. URL: <https://www.economist.com/science-and-technology/2023/02/15/a-new-way-to-clean-up-the-steel-industry> (дата звернення: 21.08.2023).

**Teslenko O.I., Kuts H.O. TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF THE COKE SUBSTITUTION TECHNOLOGIES IN THE BLAST FURNACE PRODUCTION**

*A technical and economic evaluation of two technologies for the preparation of substitutes for skip coke in blast furnaces, namely: pulverized coal fuel (PCF) and combustible reducing gases (blast furnace gas), was carried out. The comparison of the efficiency of these substitutes was carried out according to the indicators of the full technological energy intensity of their preparation before blowing into the blast furnace. Based on the results of the calculations, it was established that the energy intensity of the pulverized coal fuel preparation technology is 3.54 times greater than the energy intensity of the furnace gas preparation technology due to the high energy intensity of the raw material (hard coal). Accordingly, the cost of PCF preparing is 2.57 times higher than that of blast furnace gas, but the technology of blast furnace gas preparation has high capital*

*investments in the technological scheme of gas purification from CO<sub>2</sub>. In addition, the specified technology has insufficient widespread experience in the process of blowing blast furnace gas into a blast furnace. The ratio of the total energy intensity of the considered technologies for the preparation of skip coke substitutes in blast furnace production and their calorific value (calorific value): for PCF is 6.62%, for reducing (blast) gas is 9.45%. In recent years, in a number of countries, experimental and practical work has been carried out in blast furnace production to improve the technology of preparation and the process of blowing blast furnace gas into the blast furnace. The PCF blowing technology has been tested and widely implemented at metallurgical enterprises both in Ukraine and in global practice. A particularly attractive direction of development of this low-carbon technology is the development of electrolysis of hydrogen followed by its injection together with blast furnace gas into the blast furnace, and the by-product (oxygen) will be added to the blast air to intensify the fuel combustion process in the blast furnace.*

**Key words:** coke substitutes, technological energy intensity, preparation technology, pulverized coal fuel, blast furnace gas.