



Vol. 1 No. 1 (2023)

Available since: 2023

Published: 2 times a year

Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

E-mail: etc@duet.edu.ua Journal homepage: <https://etc.org.ua>


JEL: L610


DOI: 10.62911/ete.2023.01.01.11


Increasing the efficiency of the furnace depending on the operating conditions of the furnaces. Part 1. Technology of loading of lumped anthracite and natural gas injection


Citation:


Chuprynov, Y., Kassim, D., Shmeltser, K., Lykhova, I., & Renkas, O. (2023). Increasing the efficiency of the furnace depending on the operating conditions of the furnaces. Part 1. Technology of loading of lumped anthracite and natural gas injection. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering", 1(1), 134–146. <https://doi.org/10.62911/ete.2023.01.01.11>

Yevhen Chuprynov
Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Ukraine,
e-mail: chuprynov_yv@duet.edu.ua
 ORCID iD: 0000-0001-8605-3434

Daria Kassim
Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
e-mail: kassim@duet.edu.ua
 ORCID iD: 0000-0002-1750-1237

Kateryna Shmeltser
Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Ukraine, e-mail:
shmeltser@duet.edu.ua
 ORCID iD: 0000-0001-6830-8747

Iryna Liakhova
Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Ukraine,
e-mail: liakhova_ia@duet.edu.ua
 ORCID iD: 0000-0001-7589-8351

Olha Renkas
Assistant, State University of Economics and Technology, Ukraine,
e-mail: renkas.olya.2002@gmail.com
 ORCID iD: 0009-0005-7890-4434

Received: 10/09/2023

Accepted: 25/10/2023

Abstract: The conducted literature review showed that blast furnace smelting technology with the injection of pulverized coal fuel (PCI) provides the highest technical and economic performance of blast furnaces in world practice. However, the lack of experience of the technological personnel, the inconsistency of the charge materials and a number of other factors do not lead to the improvement of the working conditions of the blast furnace, but on the contrary, to a decrease in technical and economic indicators due to the introduction of PCI. For example, at PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih", after the introduction of PCI blowing technology, blast furnace No. 9 was stopped almost every year for major (restorative) repairs with the replacement of coolers and restoration of the lining, and coolers and tuyeres continued to fail after each blowing on the furnace. It is noted that the use of anthracite to improve the economic performance of blast furnaces has not yet been properly evaluated, although this technology is far from new. An analysis of the fuel market shows that anthracite is much cheaper than coke and often has a higher carbon content, but is inferior to it in terms of strength, especially at high temperatures. This can be compensated for by using a special technology for preliminary preparation of anthracite, as well as by loading and distributing it along the radius of the blast furnace. The relevant technology was developed by specialists of the State University of Economics and Technology and PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih" back in 2000 and found its application in the furnaces of the first blast furnace workshop, and since 2003, this technology has been mastered in furnace No. 9 with a volume of 5,000 m³ of the second blast furnace workshop of PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih". The analysis carried out in the article clearly demonstrated that the technical and economic indicators of the operation of blast furnaces using the technology of blowing pulverized coal fuel in an amount less than about 200 kg/t are not higher than when loading lump anthracite into the furnace and blowing natural gas, and taking into account constant capital repairs, then generally lower.

Keywords: pulverized coal, anthracite, natural gas, coke consumption.




JEL: L610

**Increasing the efficiency of the furnace depending on the operating conditions of the furnaces.
Part 1. Technology of loading of lumped anthracite and natural gas injection**

Yevhen Chuprynov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: chuprynov_yv@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0001-8605-3434

Daria Kassim

Doctor of Technical Sciences, Professor, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: kassim@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0002-1750-1237

Kateryna Shmeltser

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: shmeltser@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0001-6830-8747

Iryna Liakhova

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: liakhova_ia@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0001-7589-8351

Olha Renkas

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: renkas.olya.2002@gmail.com

 ORCID iD: 0009-0005-7890-4434

Abstract: The conducted literature review showed that blast furnace smelting technology with the injection of pulverized coal fuel (PCI) provides the highest technical and economic performance of blast furnaces in world practice. However, the lack of experience of the technological personnel, the inconsistency of the charge materials and a number of other factors do not lead to the improvement of the working conditions of the blast furnace, but on the contrary, to a decrease in technical and economic indicators due to the introduction of PCI. For example, at PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih", after the introduction of PCI blowing technology, blast furnace No. 9 was stopped almost every year for major (restorative) repairs with the replacement of coolers and restoration of the lining, and coolers and tuyeres continued to fail after each blowing on the furnace. It is noted that the use of anthracite to improve the economic performance of blast furnaces has not yet been properly evaluated, although this technology is far from new. An analysis of the fuel market shows that anthracite is much cheaper than coke and often has a higher carbon content, but is inferior to it in terms of strength, especially at high temperatures. This can be compensated for by using a special technology for preliminary preparation of anthracite, as well as by loading and distributing it along the radius of the blast furnace. The relevant technology was developed by specialists of the State University of Economics and Technology and PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih" back in 2000 and found its application in the furnaces of the first blast furnace workshop, and since 2003, this technology has

been mastered in furnace No. 9 with a volume of 5,000 m³ of the second blast furnace workshop of PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih". The analysis carried out in the article clearly demonstrated that the technical and economic indicators of the operation of blast furnaces using the technology of blowing pulverized coal fuel in an amount less than about 200 kg/t are not higher than when loading lump anthracite into the furnace and blowing natural gas, and taking into account constant capital repairs, then generally lower.


Keywords: pulverized coal, anthracite, natural gas, coke consumption

Підвищення ефективності доменної плавки в залежності від умов роботи доменних печей. Частина 1. Технологія завантаження кускового антрациту і вдування природного газу

Євген Чупринов

к. т. н., доцент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: chuprynov_yv@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0001-8605-3434

Дар'я Кассім

д. т. н., професор, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: kassim@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0002-1750-1237

Катерина Шмельцер

к. т. н., доцент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: shmeltser@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0001-6830-8747

Ірина Ляхова

к. т. н., доцент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: liakhova_ia@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0001-7589-8351

Ольга Ренкас

Асистент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: renkas.olya.2002@gmail.com

 ORCID iD: 0009-0005-7890-4434

Анотація: Доведено, що технологія доменної плавки з вдуванням пиловугільного палива (ПВП) забезпечує у світовій практиці найвищі техніко-економічні показники роботи доменних печей. Встановлено, що відсутність досвіду технологічного персоналу, невідповідність шихтових матеріалів та ряд інших факторів призводять не до покращення умов роботи доменної печі, а навпаки, до зниження техніко-економічних показників через впровадження ПВП. Встановлено, що використання антрациту для покращення економічних показників роботи доменних печей досі не отримало належної оцінки, хоча ця технологія зовсім ненова. Антрацит – значно дешевше за кокс і часто має більш високий вміст вуглецю, проте поступається йому за показниками міцності, особливо при високих температурах. Це може бути компенсоване при використанні спеціальної технології попередньої підготовки антрациту, а також завантаженням та розподілом його по радіусу колошника доменної печі. На промисловому досвіді застосування технології завантаження шматкового антрациту показана ефективність цього методу, яка призвела до зниження витрат коксу на всіх доменних печах. Відзначено, що для ефективного застосування технології завантаження антрациту

необхідно значне збільшення маси подачі, оскільки завантаження антрациту спільно з залізорудною частиною шихти, що виключає "засмічення" коксових шарів дрібницею при руйнуванні вугілля і забезпечує практично повну газифікацію вугільної дрібниці, що утворюється, киснем шихти та оптимальне розподілення антрациту по радіусу печі. Виконаний в статті аналіз наглядно продемонстрував, що техніко-економічні показники роботи доменних печей на технології вдування пиловугільного палива у кількості меншій, ніж близько 200 кг/т не знаходяться вище ніж при завантаженні в піч шматкового антрациту та вдування природного газу, а враховуючи постійні капітальні ремонти, то і взагалі нижче.

Ключові слова: пиловугільне паливо; антрацит; природний газ; витрата коксу

Вступ (Introduction)

Нині технологія доменної плавки з вдуванням пиловугільного палива (ПВП) забезпечує у світовій практиці найвищі техніко-економічні показники роботи доменних печей. Яскравим прикладом можуть бути результати роботи доменної печі №6 Hoogovens (2328 м³) з вдуванням ПВП 195 кг/т чавуну з питомою продуктивністю 2,59 т/(м³·добу) при витраті коксу 249 кг/т (Lyalyuk, V.P., 2021b). Ще одним прикладом високоефективного використання технології з вдуванням ПВП є досвід роботи печей фірми Corus IJmuiden, на яких середньорічна питома витрата ПВП у 2004 році склала 227 кг/т чавуну при питомій витраті коксу 290 кг/т та питомій продуктивності 2,9 т/(м³·добу). Такого результату було досягнуто при високій газопроникності стовпа шихти доменних печей, яка була забезпечена за рахунок зниження вмісту дрібниці в залізорудній шихті до 3 %, зменшення виходу шлаку до 200-220 кг/т чав. та високої якості коксу (CSR >60 %). Оптимальні умови згоряння високоякісного ПВП із вмістом летких 30-35 % були створені за рахунок підвищення температури дуття до 1200-1250 °С та вмісту у дутті кисню до 33 % (van Straaten, V., 2019).

Зовсім іншими були, наприклад, умови початку використання з січня 2016 технології вдування ПВП на доменній печі №9 ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" (АМКР) об'ємом 5000 м³. До цього на печі використовувалася технологія завантаження через колошник шматкового антрациту та вдування природного газу. Технологічні та, особливо, технічні проблеми стали переслідувати доменників цієї печі з перших днів вдування ПУТ. Почастішали випадки горіння холодильників системи охолодження, а також виходу з ладу повітряних фурм через їх прогар, про що було зроблено доповідь фахівцями підприємства на міжнародній науково-виробничій конференції "Досвід впровадження та шляхи вирішення проблем освоєння технології вдування ПУТ у доменному виробництві" (Кривий Ріг, АМКР, 12-13 травня 2016 р.).

На АМКР після впровадження технології з вдуванням ПВП доменна піч №9 практично щороку зупинялася на капітальні (відновлювальні) ремонти із заміною холодильників та відновленням футерування (Lyalyuk, V.P., 2017b). Після кожної задувки на печі продовжували виходити з ладу холодильники та фурми (доповідь фахівців АМКР на ХХІХ-й науково-технічній конференції з аглодоменного виробництва "Підвищення якості підготовленої залізорудної сировини для доменного виробництва України") (Кривий Ріг, АМКР, 16-18 жовтня 2019 р.) Результати впровадження технології з вдуванням ПВП на цій печі виявилися не кращими в порівнянні з роботою цієї печі на технології завантаження через колошник шматкового антрациту та вдування природного газу.

Щодо технології з вдуванням ПВП, то фахівці неодноразово висловлювалися про ризики впровадження цієї технології, насамперед через високі капітальні витрати для її реалізації. Крім економічних ризиків впровадження технології ПВП, пов'язаних із зростаючою вартістю капітальних вкладень на її реалізацію, все ще є на ряді заводів велика кількість технологічних обмежень, через які не вдається вдувати в доменні печі ПВП більше 150 кг/т чавуну (Ryzhenkov, A.N., 2010). Так, автори статті (Raygan, S., 2010) на основі відповідного аналізу показали існування сировинних та технологічних обмежень у гірничо-металургійному та паливному комплексах України, при яких утруднюється вдування ПВП із витратами понад 120 кг/т.

Аналогічна стурбованість висловлена авторами (Jianliang, Z., 2023), які закликають позбутися ейфорії простоти впровадження технології ПВП взагалі та за високих його витрат, зокрема, без кардинального поліпшення вугільної сировинної бази коксування (Zolotukhin, Y.A., 2009). Науковці (Suli, L.M., 2017), продемонстрували, що фактори, які лімітують розвиток чорної металургії у більшості країн світу, в даний час є енергетика, забруднення довкілля та дефіцит природних ресурсів. З огляду на це, фахівці різних країн вказали на низку ризиків, зумовлених виснаженням запасів коксівного вугілля та вугілля, придатного для приготування ПВП.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

У процесі дослідження був проведений аналіз наукових робіт щодо аспектів застосування технології вдування пиловугільного палива і альтернативних методів зменшення витрат коксу. Виконане порівняння різних періодів роботи доменних печей для зіставлення ефективності різних технологій, а в якості головних критеріїв були прийняті показники витрати антрациту, коксу, пиловугільного палива та продуктивності доменної печі.

Результати (Results)

Використання антрациту для покращення економічних показників роботи доменних печей досі не отримало належної оцінки, хоча ця технологія зовсім ненова. Експерименти щодо часткової заміни коксу в доменній плавці кам'яним вугіллям, що завантажуються через колошник печі, досить активно велися в 70-80-х роках минулого століття на низці металургійних підприємств Радянського Союзу. Спочатку випробування цієї технології проводили на малих печах об'ємом не більше 1033 м³ (Чусовський та Краматорський металургійні заводи), а потім – і на печах більшого об'єму 1300-1400 м³ (Кузнецький та Західно-Сибірський меткомбінати). Промислові плавки із застосуванням шматкового вугілля проводилися також у доменному цеху комбінату "Азовсталь", на доменній печі об'ємом 2000 м³ АК "Тулачермет" та на печах об'ємом 3000 м³ (Західно-Сибірський меткомбінат) (Lyalyuk, V.P., 2017a).

Результати цих випробувань показали практичну неможливість завантажувати через колошник шматкове вугілля у кількості понад 10-15 кг/т чавуну. У процесі досліджень встановили, що найбільш перспективним шматковим вугіллям для часткової заміни коксу в доменній плавці є антрацит з мінімальним вмістом летких та високим вмістом вуглецю.

Можливість збільшення витрати кускового антрациту понад зазначені межі при використуванних на той час технологіях його підготовки та завантаження стримувалася негативним впливом на газодинаміку доменної плавки в результаті інтенсивного руйнування шматків вугілля при приході їх у зону з високою температурою. Знижувалась газопроникність зони в'язко-пластичного стану матеріалів у печі (зони "когезії") через збільшення кількості дрібних фракцій у "коксових вікнах" при використанні спільного завантаження коксу та вугілля в один скіп. Були також ознаки захаращення горна дрібними вуглецевими матеріалами.

Антрацит – значно дешевше за кокс і часто має більш високий вміст вуглецю, проте поступається йому за показниками міцності, особливо при високих температурах. Компенсувати цей недолік можна при використанні спеціальної технології його попередньої підготовки, а також завантаженням та розподілом шматкового антрациту по радіусу колошника доменної печі. Така технологія була розроблена фахівцями ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" спільно з науковцями Криворізького металургійного інституту НМетАУ та Інституту чорної металургії НАНУ. Початок розробки цієї технології відноситься до 2000 року на печах першого доменного цеху ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" (Lyalyuk, V.P., 2021a). З 2003 року цю технологію почали освоювати і на печі №9 об'ємом 5000 м³ другого доменного цеху ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг". Вже до 2006 року вдалося вийти на завантаження в печі антрациту в середньому за рік до 52-59 кг/т та в окремі місяці – до 70-85 кг/т чавуну на печах №5-7 першого доменного цеху зі зниженням питомої витрати коксу до 400 кг/т чавуну на печі №9 та до 384

кг/т чавуну на печі №6 (Lyalyuk, V.P., 2021a). У окремі нетривалі періоди виходили на витрату антрациту навіть до 90-100 кг/т чавуну, що у постійному режимі стримувалося недостатніми його поставками на ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг".

На рисунках 1 та 2 наведено графіки зміни витрати антрациту та коксу з 2000 року по червень 2021 року по печах №5-7 об'ємом 2000 м³, №8 об'ємом 2700 м³ та №9 об'ємом 5000 м³. Розриви на лініях окремих печей пов'язані з їх тривалими стоянками в очікуванні капітальних ремонтів.

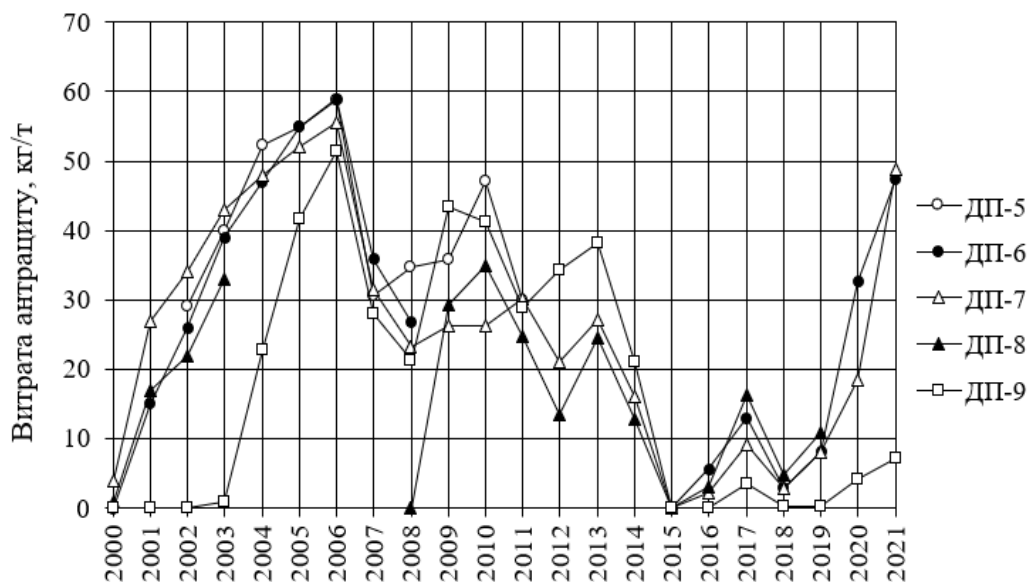


Рисунок 1. Зміна питомої витрати антрациту по печах №5-9 з 2000 р до червня 2021 р (включно)

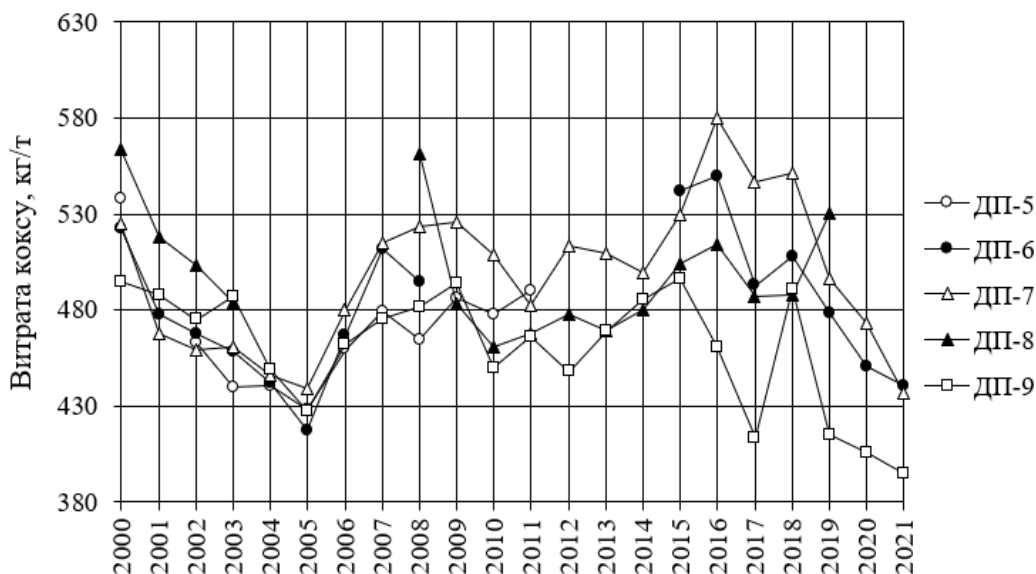


Рисунок 2. Зміна питомої витрати коксу по печах № 5-9 з 2000 р. до червня 2021 р. (включно)

З графіків на рис. 1 і 2 простежується чіткий зворотний зв'язок витрати антрациту та витрати коксу. З 2018 року почали збільшувати витрати антрациту на доменних печах №6 та 7 у зв'язку зі збільшенням його постачання на підприємство.

У табл. 1 наведено техніко-економічні показники роботи печі №6 обсягом 2000 м³ зі збільшенням витрати антрациту з 30,4 до 43,9 та 58,3 кг/т чавуну. Зі зростанням витрати

антрациту фактична витрата коксу знижувалась з 463,2 до 438,0 та 426,5 кг/т, аналогічно знижувалась і приведена до однакових умов витрата коксу.

Таблиця 1. Техніко-економічні показники роботи доменної печі №6

Показники	Періоди		
	Б	Д ₁	Д ₂
Тривалість періоду, діб	31	28	30
Витрата антрациту (А), кг/т	30,4	43,9	58,3
Продуктивність, т/доб.	3440	3537	3571
Приведена продуктивність, т/доб.	3440	3405	3276,9
Витрата коксу (К), кг/т	463,2	438,0	426,5
Приведена витрата коксу, кг/т	463,2	443,9	438,6
Інтенсивність (К+А), кг/(м ³ ·доб.)	848,9	852,2	865,6
Дуття: витрата, м ³ /хв	3004	3063	3001
тиск, кПа (надлишковий)	205	219	226
температура, °С	984	1025	1013
Витрата природного газу, м ³ /т	85,1	80,5	78,5
Вміст кисню в дутті, %	26,3	26,2	26,6
Колошниковий газ:			
тиск, кПа (надл.)	84	92	92
температура, °С	275	260	245
вміст %: СО	21,3	21,7	21,4
СО ₂	16,6	16,9	17,3
Н ₂	5,2	5,2	5,5
Аналіз чавуну, %: Si	0,73	0,71	0,68
Mn	0,24	0,31	0,29
S	0,02	0,022	0,02
P	0,115	0,122	0,108
Уловлений колошниковий пил, кг/т	18,50	17,16	21,53
Поточні простой, %	2,20	2,07	1,33
Тихий хід, %	0,00	0,00	0,00
Вихід шлаку, кг/т	462,1	468,8	438,5
Вміст Fe у всій шихті, %	55,72	55,87	56,30
Рудне навантаження на кокс, кг/кг	3,88	4,02	4,06
Витрати, кг/т: залізна руда	8,8	6,0	12,9
агломерат АЦ №1	1658,9	1608,5	1308,3
агломерат АЦ №2	110,7	125,3	390,9
скрап металевий	30,8	39,6	37,2
вапняк	9,2	1,6	1,9
Основність шлаку, од.	1,12	1,10	1,12
Якість коксу, %: зола	11,7	11,8	11,8
сірка	0,5	0,5	0,5
M ₂₅	86,1	86,31	86,2
M ₁₀	8,1	8,03	8,0
+80 мм	8,3	7,77	6,9
-25 мм	7,1	6,97	7,1
CSR	51,4	55,96	55,4
CRI	35,1	32,13	33,8
Фракція -5 мм, %: агломерат АЦ №1	11,43	11,43	11,50
агломерат АЦ №2	6,97	6,86	7,05
Середньозважена фракція -5 мм, %	11,15	11,1	10,48

У таблиці 2 наведено техніко-економічні показники роботи доменної печі №7 обсягом 2000 м³ зі збільшенням витрати антрациту з 45,5 до 61,9 кг/т чавуну. Зі зростанням витрати антрациту фактична витрата коксу знизилася з 444,4 до 430,2 кг/т, аналогічно знизилася і приведена витрата коксу. Коефіцієнт заміни коксу антрацитом склав 0,80 кг/кг.

Таблиця 2. Техніко-економічні показники роботи доменної печі №7

Показники	Періоди	
	Б	Д
Тривалість періоду, діб	31	31
Витрата антрациту (А), кг/т	45,5	61,9
Продуктивність, т/доб.	3480	3570
Приведена продуктивність, т/доб.	3480	3502,8
Витрата коксу (К), кг/т	444,4	430,2
Приведена витрата коксу, кг/т	444,4	436,7
Інтенсивність (К+А), кг/(м ³ ·доб.)	852,4	878,4
Дуття: витрата, м ³ /хв	3016	3363
тиск, кПа (надлишковий)	217	236
температура, °С	1010	1028
Витрата природного газу, м ³ /т	62,8	72,3
Вміст кисню в дутті, %	25,7	26,6
Колошниковий газ:		
тиск, кПа (надл.)	88	108
температура, °С	220	183
вміст %: СО	20,9	21,8
СО ₂	18,2	16,9
Н ₂	55,5	5,1
Аналіз чавуну, %: Si	0,79	0,81
Mn	0,20	0,17
S	0,019	0,019
P	0,089	0,096
Уловлений колошниковий пил, кг/т	21,76	13,64
Поточні простой, %	1,15	1,56
Тихий хід, %	0	0
Вихід шлаку, кг/т	482,7	477,2
Вміст Fe у всій шихті, %	55,81	56,08
Рудне навантаження на кокс, кг/кг	4,19	4,43
Витрати, кг/т: залізна руда	3,2	4,3
агломерат АЦ №1	1520,8	1560,6
агломерат АЦ №2	164,7	317,0
скрап металевий	22,5	35,8
вапняк	14,4	14,6
Основність шлаку, од.	1,13	1,14
Якість коксу, %: зола	11,8	11,8
сірка	0,5	0,5
M ₂₅	86,1	85,8
M ₁₀	8,1	8,2
+80 мм	7,3	7,6
-25 мм	7,7	7,0
CSR	54,9	54,5
CRI	34,2	32,9
Фракція -5 мм, %: агломерат АЦ №1	11,44	11,41
агломерат АЦ №2	7,30	6,92
Середньозважена фракція -5 мм, %	11,03	10,6

Розроблена технологія завантаження антрациту включає три обов'язкові умови. Насамперед – це значне збільшення маси подачі. Доменні печі перевели з циклічної змішаної системи завантаження залізородних матеріалів і коксу, наприклад, (3ААКК↓ 2ККАА↓) на роздільну, наприклад, (АААА↓ КККК↓), що забезпечило збільшення товщини шарів коксу з 0,4 до 1,2-1,5 м.

Встановлені на печах першого цеху двоконусні засипні апарати з пелюстковим розподільником шихти (Donskov, E.G., 2009) дозволяють приймати на великий конус до 6 скіпів матеріалу одного виду. Це забезпечує більшу товщину шарів коксу в стовпі шихти доменної плавки і особливо "коксових вікон" у зоні "когезії", що в першу чергу дозволило без ускладнень заміщати частину коксу антрацитом. Маса порції рудних матеріалів на печах об'ємом 2000 м³ дорівнює 60-85 т, але в печі 2700 м³ – 80-104 т при рудному навантаженні на кокс 3,5-3,8 т/т залежно від якості коксу і агломерату. Маса рудної калоші на доменній печі об'ємом 5000 м³ дорівнювала 110-124 т (Donskov, E.G., 2009).

Значна товщина шарів коксу дозволяє газовому потоку перерозподілятися під кожним рудним шаром, у результаті поліпшується обробка газом рудних матеріалів у районі "рудного гребеня". Це дає додатковий позитивний ефект. Другою обов'язковою умовою успішного використання даної технології є завантаження антрациту спільно з залізородною частиною шихти, що виключає "засмічення" коксових шарів дрібницею при руйнуванні вугілля і забезпечує практично повну газифікацію вугільної дрібниці, що утворюється, киснем шихти. Третьою умовою ефективного використання технології є оптимальне розподілення антрациту по радіусу печі. Найбільш легко це завдання вирішувалося на доменній печі №9, обладнаній безконусним завантажувальним пристроєм та транспортерною шихтоподачею. Антрацит завантажувався на залізородну порцію шихти на збірному конвеєрі в середню або головну частину порції з урахуванням використовуюваного набору кутів нахилу лотка при розвантаженні цієї порції в піч. У табл. 3 наведено результати досліджень на доменній печі №9 при збільшенні витрати антрациту з 13,9 до 87,1 кг/т чавуну.

Таблиця 3. Техніко-економічні показники роботи доменної печі №9 при частковій заміні коксу шматковим антрацитом

Показники	Періоди			
	1	2	3	4
Тривалість періоду, діб	14	12	72	27
Витрата антрациту (А), кг/т	0	13,9	25,2	37
Продуктивність, т/доб.	7783,1	7578	7712,8	6766
Витрата коксу (К), кг/т чав.	462	448	432	435
Інтенсивність (К+А), кг/(м ³ ·доб.)	0,719	0,700	0,705	0,639
Дугтя: витрата, м ³ /хв	6369	6381	6374	6545
тиск, кПа (надлишковий)	315	305	318	305
температура, °С	1103	1115	1106	1128
Витрата природного газу, м ³ /т	96	94	97	84
Витрата кисню, м ³ /т	121	99	105	39
Вміст О ₂ в дугті, %	28,3	26,7	27,2	22
Колошниковий газ: тиск, кПа (надл.)	125	109	124	110
температура, °С	120	149	146	191
вміст %: СО	18,1	17,9	17,7	16,4
СО ₂	24,8	24,6	25,0	23,1
Н ₂	6,1	7,0	6,6	6,3
Аналіз чавуну, %: Si	0,83	0,77	0,81	0,92
Mn	0,45	0,46	0,44	0,38
S	0,024	0,022	0,023	0,023
P	0,066	0,066	0,063	0,063

Вміст Fe у всій шихті, %	54,82	54,79	54,75	55,07
Витратні коефіцієнти, кг/т чав.: залізна руда	11,6	26,9	20,7	0
агломерат АЦ №2	1219	1203	1232	1527
окатиші ПівнГЗК	411	406	399	116
вапняк	21	27	23	12
шлак збагачений	111	119	110	39
скрап металевий	0	0	0	44
Простої, %	0,793	0,783	0,204	0,115
Тихий хід, %	0,15	0,175	0,067	0
Якість коксу, %: зола	12,2	11,84	11,94	11,5
сірка	1,17	1,24	1,19	1,33
M ₂₅	86,49	86,8	86,45	86,4
M ₁₀	8,33	8,1	8,3	7,7
Показники	Періоди			
	5	6	7	8
Тривалість періоду, діб	18	28	15	13
Витрата антрациту (А), кг/т	43,8	60,8	57,1	87,1
Продуктивність, т/доб.	8270,8	8211,8	7921,4	8123,5
Витрата коксу (К), кг/т чав.	421	395	476,3	446,6
Інтенсивність (К+А), кг/(м ³ ·доб.)	0,769	0,749	0,760	0,867
Дуття: витрата, м ³ /хв	6979	6889	7357	7795
тиск, кПа (надлишковий)	322	326	294	351
температура, °С	1120	1097	949	975
Витрата природного газу, м ³ /т	86	87	34,5	30,5
Витрата кисню, м ³ /т	96	103	90,6	78
Вміст O ₂ в дутті, %	26,3	26,7	25,34	24,3
Колошниковий газ: тиск, кПа (надл.)	126	128	115	163
температура, °С	130	131	108	107
вміст %: CO	18,6	18,5	18,56	18,8
CO ₂	24,0	23,7	25,59	23,8
H ₂	6,5	7,2	4,29	4,5
Аналіз чавуну, %: Si	0,87	0,88	0,87	0,84
Mn	0,38	0,38	0,24	0,31
S	0,022	0,024	0,025	0,024
P	0,067	0,07	0,067	0,072
Вміст Fe у всій шихті, %	55,1	55,03	55,02	54,79
Витратні коефіцієнти, кг/т чав.: залізна руда	0	0	0	0
агломерат АЦ №2	1391	1408	1506	1494
окатиші ПівнГЗК	257	240	161	178
вапняк	26	14	18	22
шлак збагачений	81	74	37	64
скрап металевий	42	42	52	51
Простої, %	0	0	0	0
Тихий хід, %	0,038	0,05	0,092	0
Якість коксу, %: зола	11,4	11,4	11,57	11,35
сірка	1,27	1,24	1,20	1,06
M ₂₅	87,2	87,32	88,16	89,3
M ₁₀	7,5	7,44	7,21	6,95

З таблиці 3 видно, що при завантаженні в піч 60,8 кг/т чавуну антрациту і вдування в піч 87 м³/т газу фактична витрата коксу була 395 кг/т чавуну. При збільшенні витрати антрациту

до 87,1 кг/т та зменшенні витрати природного газу до 30,5 м³/т фактична витрата коксу зростає до 446,6 кг/т, що цілком прийнято для печі, на якій якість коксу та залізородної сировини явно не відповідає вимогам технології із вдуванням ПУТ. Якби витрата природного газу залишилася на тому ж рівні, то фактична витрата коксу була б 401,4 кг/т чавуну.

У роботі (Lyalyuk, V.P., 2016) були наведені аналітичні дослідження щодо потенціалу вдування ПВП у випадку ефективного впровадження цієї технології на печі №9.

Відзначено, якби в той час на печі №9 була можливість реалізувати комплекс заходів, який рекомендується для ефективного впровадження ПВП, то була б можливість скоротити витрату коксу до 318 кг/т при вдуванні природного газу до 70 м³/т чавуну та завантаження шматкового антрациту через колошник 70-74 кг/т чавуну. Слід зазначити, що на печі №9 навіть зараз при вдуванні ПВП часом завантажують антрацит у кількості до 11 кг/т чавуну.

У статті (Lyalyuk, V.P., 2017a) виконано аналіз роботи доменної печі №9 на технології завантаження шматкового антрациту з вдуванням природного газу порівняно з технологією вдування на цій печі ПВП при максимальних витратах і мінімально досягнутих витратах коксу. Порівняння результатів роботи цієї доменної печі при середньомісячній витраті антрациту 72,8 кг/т та вдуванні природного газу 27 м³/т з варіантом максимально досягнутої витрати ПВП у кількості 101,1 кг/т показує зниження фактичної питомої витрати коксу з 459,7 до 418,2 кг/т чавуну при вдуванні ПВП. Після приведення витрати коксу до однакових умов цей результат одразу нівелюється, оскільки якість коксу в періоді з ПВП була значно вищою, ніж у періодах із завантаженням антрациту. Порівняння результатів роботи печі з використанням однієї та іншої технології у періоди, коли на печі мала місце мінімальна витрата коксу, також свідчить не на користь технології вдування ПВП. Так, при середньомісячній витраті антрациту 57,2 кг/т та витраті природного газу 89,9 м³/т фактична витрата коксу була 400,1 кг/т, а при витраті ПВП 92 кг/т мінімальна фактична витрата коксу була 408,2 кг/т. Приведена до однакових технологічних та шихтових умов доменної плавки питома витрата коксу і в цьому випадку свідчить не на користь технології вдування ПВП на цій печі, особливо з урахуванням здійснених для забезпечення вдування ПВП значних капітальних витрат (Lyalyuk, V.P., 2017a).

Порівняння результатів роботи печі у найкращий рік використання технології завантаження шматкового антрациту (2005 р.) з будь-яким роком освоєння на доменній печі №9 технології вдування ПВП показує, що при середньорічній витраті шматкового антрациту (А) 41,7 кг/т та витраті природного газу (ПГ) 89,3 м³/т мала місце фактична витрата коксу (К) 427,4 кг/т, тоді як у 2016 році за середньорічної витрати ПВП – 73,7 кг/т та ПГ – 10,6 м³/т фактична питома витрата коксу була 444,8 кг/т. У наступні роки видаткові коефіцієнти були такі: у 2017 році ПВП – 85,9 кг/т, ПГ – 26,8 м³/т та А – 3,5 кг/т, К – 413,3 кг/т; у 2018 році ПВП – 30,3 кг/т, ПГ – 33 м³/т, А – 0,3 кг/т, К – 472,1 кг/т; у 2019 році ПВП – 85 кг/т, ПГ – 21,1 м³/т, А – 0,2 кг/т, К – 415,2 кг/т; 2020 року ПВП – 83,2 кг/т, ПГ – 32,7 м³/т, А – 4,2 кг/т, К – 405,6 кг/т. Приведена до однакових умов витрата коксу в кожному річному періоді роботи також не показує переваги технології вдування ПВП на цій доменній печі перед технологією завантаження в піч шматкового антрациту та вдування природного газу.

Висновки (Conclusions)

1. У даний час технологія доменної плавки з вдуванням пиловугільного палива забезпечує у світовій практиці найвищі техніко-економічні показники роботи доменних печей, однак у зв'язку з високими капітальними вкладеннями при впровадженні технології з вдуванням ПВП вона стає економічно ефективною при мінімальній питомій витраті пиловугільного палива 200 кг/т чавуну, що технологічно важко досягти. Крім цього для її використання необхідне забезпечення плавки якісними коксом та залізородною сировиною, що також пов'язано з підвищеними витратами.

2. Крім вирішення проблем раціонального вибору заміників коксу, перспективи підвищення ефективності доменної плавки у значній мірі визначаються вдосконаленням технологій підготовки залізорудної сировини.

3. Наступним етапом дослідження буде аналіз роботи доменної печі при застосуванні технології завантаження шматкового антрациту і нового виду залізорудної сировини – офлюсованих локальних спеків.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Внесок авторів (Authors contribution)

Концептуалізація, К.Д., Ч.Є. та Ш.К.; формальний аналіз, Ш.К.; методологія, Л.І. та К.Д.; візуалізація, Ч.Є. та Р.О.; оригінальна чернетка, К.Д. та Ч.Є.; перегляд і редагування, Л.І. та Р.О. Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- Donskov, E.G., Lyalyuk, V.P., Il'chenko, V.I. et al. (2009). Blast-furnace charging with a lobed batch distributor. *Steel Transl.* 39, 479–485. <https://doi.org/10.3103/S0967091209060102>
- Jianliang, Z., Kuangdi, X. (2023). Pulverized Coal Injection of Blast Furnace Ironmaking. In: Xu, K. (eds) *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0740-1_1047-1
- Lyalyuk, V.P., Tarakanov, A.K., Kassim, D.A. et al. (2016). Technological Aspects of the Use of Lump Anthracite in Blast-Furnace Smelting. *Metallurgist* 60, 142–149. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0264-0>
- Lyalyuk, V.P., Tarakanov, A.K., Kassim, D.A. et al. (2017, a). Blast-furnace operation with pulverized-coal injection and with chunk anthracite. *Steel Transl.* 47, 469–472. <https://doi.org/10.3103/S0967091217070063>
- Lyalyuk, V.P., Tarakanov, A.K., Kassim, D.A. et al. (2017, b). Pulverized-coal injection in a 5000-m³ blast furnace. *Steel Transl.* 47, 675–681. <https://doi.org/10.3103/S0967091217100060>
- Lyalyuk, V.P. (2021, a). Diameter Selection of Blast Furnace Tuyeres Based on the Rate and Energy of the Fuel-Enriched Blast and Tuyere Gas Flows with the Injection of the Pulverized Coal. *Steel Transl.* 51, 627–639. <https://doi.org/10.3103/S0967091221090072>
- Lyalyuk, V.P., Tarakanov, A.K., Chuprinov, E.V. et al. (2021, b). Possibility of Increasing the Efficiency of Blast Furnace Smelting Depending on the Operating Conditions of Blast Furnaces. *Steel Transl.* 51, 795–804. <https://doi.org/10.3103/S0967091221110085>
- Raygan, S., Abdizadeh, H. & Eskandari Rizi, A. (2010). Evaluation of four coals for blast furnace pulverized coal injection. *J. Iron Steel Res. Int.* 17, 8–12. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60065-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60065-9)
- Ryzhenkov, A.N., Minaev, A.A., Yaroshevskii, S.L. et al. (2010). Coal-dust fuel and blast-furnace production in Ukraine. *Steel Transl.* 40, 901–908. <https://doi.org/10.3103/S0967091210100098>
- Suli, L. M., Ibrahim, W. H. W., Aziz, B. A., Deraman, M. R., & Ismail, N. A. (2017). A Review of Rare Earth Mineral Processing Technology. *Chemical Engineering Research Bulletin*, 19, 20–35. <https://doi.org/10.3329/ceerb.v19i0.33773>
- van Straaten, V., de Graaff, B. & Engel, E. (2019). Hot Blast System Development: Technology, Operations, Campaign Management. *Berg Huettenmaenn Monatsh* 164, 452–460.

<https://doi.org/10.1007/s00501-019-00916-8>

Zolotukhin, Y.A., Andreichikov, N.S. (2009). Coke quality for blast furnaces with coal-dust fuel. *Steel Transl.* 39, 470–474. <https://doi.org/10.3103/S0967091209060084>