ECONOMIC AND TECHNICAL ENGINEERING

Scientific and practical journal "Economics and technical engineering"

Vol. 1 No. 2 (2023)

Available since: 2023
Published: 2 times a year

Founders: State University of Economics and Technology
ISSN: 3041-1246
E-mail: ete@duet.edu.ua Journal homepage: https://ete.org.ua

JEL: L6

DOI: 10.62911/ete.2023.01.02.09

Justification of methodical approaches to determining the theoretical fuel combustion temperature in a blast furnace when changing the parameters of the melting mode

Citation: Kassim, D., Chuprynov, Ye., Shmeltser, K, Liakhova, I. & Korenko, M. (2023). Justification of methodical approaches to determining the theoretical fuel combustion temperature in a blast furnace when changing the parameters of the melting mode. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering", 1(2), 115–127. https://doi.org/10.62911/ete.2023.01.02.09

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

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

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

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

Maryna Korenko
Senior lecturer, State University of Economics and Technology Kryvyi Rih Ukraine
e-mail: marinak20162010@gmail.com
ORCID iD: 0000-0002-4582-1756

Received: 10/09/2023
Accepted: 15/11/2023

Abstract: Based on the study of the practical experience of blast furnace smelting with the injection of pulverized coal fuel on a blast furnace with a useful volume of 5,000 m^3, the causes of frequent cases of deformation and burning of air nozzles and coolers were determined. In particular, such reasons include a significant unevenness of the length of the combustion zones in front of the tuyeres around the mine circle and an irrational change in the gas flow distribution along the blast furnace radius. In turn, this is due to the presence of a large unevenness in the distribution of the costs of blowing and pulverized coal fuel along the tuyeres, and therefore the theoretical temperature and output of mine gas along the circumference and radius of the mine blast furnace. Therefore, when determining the possible consumption of any fuel additive, it will be difficult to focus on the value of the theoretical combustion temperature, as a complex parameter of the fuel regime, which characterizes the temperature-oxidative conditions of the transformations of fuel additives in the nozzle cells. This especially applies to the known methods of determining this parameter, which are not sufficiently reliable in case of significant fluctuations in the input melting conditions. The purpose of this work is to develop methodical approaches to determine the theoretical fuel combustion temperature based on the actually controlled blowing parameters when natural gas and PUT are blown into the blast furnace on the basis of stoichiometric ratios and fuel technical analysis data. A method of determining the theoretical combustion temperature in the tuyere when natural gas and/or pulverized fuel is blown into the blast furnace is proposed, using operational information about blowing parameters, consumption of natural gas and pulverized fuel, which are taken from control and measuring devices and automation systems at the central control panel of the blast furnace.

Keywords: theoretical combustion temperature, blast furnace, natural gas, pulverized coal

JEL: L6

Justification of methodical approaches to determining the theoretical fuel combustion temperature in a blast furnace when changing the parameters of the melting mode

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

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

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

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

Maryna Korenko
Senior lecturer, State University of Economics and Technology Kryvyi Rih, Ukraine
e-mail: marinak20162010@gmail.com
ORCID iD: 0000-0002-4582-1756

Abstract: Based on the study of the practical experience of blast furnace smelting with the injection of pulverized coal fuel on a blast furnace with a useful volume of 5,000 m^3, the causes of frequent cases of deformation and burning of air nozzles and coolers were determined. In particular, such reasons include a significant unevenness of the length of the combustion zones in front of the tuyeres around the mine circle and an irrational change in the gas flow distribution along the blast furnace radius. In turn, this is due to the presence of a large unevenness in the distribution of the costs of blowing and pulverized coal fuel along the tuyeres, and therefore the theoretical temperature and output of mine gas along the circumference and radius of the mine blast furnace. Therefore, when determining the possible consumption of any fuel additive, it will be difficult to focus on the value of the theoretical combustion temperature, as a complex parameter of the fuel regime, which characterizes the temperature-oxidative conditions of the transformations of fuel additives in the nozzle cells. This especially applies to the known methods of determining this parameter, which are not sufficiently reliable in case of significant fluctuations in the input melting conditions. The purpose of this work is to develop methodical approaches to determine the theoretical fuel combustion temperature based on the actually controlled blowing parameters when natural gas and PUT are blown into the blast furnace on the basis of stoichiometric ratios and fuel technical analysis data. A method of determining the theoretical combustion temperature in the tuyere when natural gas and/or pulverized fuel is blown into the blast furnace is proposed, using operational information about blowing parameters, consumption of natural gas and pulverized fuel, which are taken from control and measuring devices and automation systems at the central control panel of the blast furnace. On the basis of the developed method of determining the output of mine gas and the theoretical temperature of fuel combustion, it is possible to solve practical problems

related to the optimization of blast parameters of blast furnace smelting, as well as when blowing pulverized coal fuel.

Keywords: theoretical combustion temperature, blast, natural gas, pulverized coal

Обґрунтування методичних підходів до визначення теоретичної температури горіння палива в горні доменної печі при зміні параметрів дутьового режиму плавки

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

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

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

Марина Коренко
к.т.н, доцент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна
e-mail: marinak20162010@gmail.com
ORCID iD: 0000-0002-4582-1756

Анотація: На підставі вивчення практичного досвіду ведення доменної плавки з вдуванням пиловугільного палива на доменній печі корисним об'ємом 5000 м^3 були визначені причини частих випадків деформації і горіння повітряних фурм і холодильників. Зокрема, до таких причин відносяться значна нерівномірність протяжності зон горіння перед фурмами по колу горна і нераціональна зміна розподілу газового потоку по радіусу доменної печі. У свою чергу, це зумовлене наявністю великої нерівномірності розподілу витрат дуття та пиловугільного палива по фурмам, а отже і теоретичної температури і виходу горнового газу по колу і радіусу горна доменної печі. Таким чином, при визначенні можливої витрати будь-якої дутьової добавки, орієнтація на значення теоретичної температури горіння, як на комплексний параметр дутьового режиму, що характеризує температурно-окисні умови перетворень паливних добавок у фурмених осередках, буде ускладнена. Особливо це стосується відомих методик визначення цього параметру, які є недостатньо надійними при значних коливаннях вхідних умов плавки. Мета роботи – розробка методичних підходів до визначення теоретичної температури горіння палива за фактично контрольованими параметрами дуття при вдуванні в горн доменної печі природного газу та пиловугільного палива на основі стехіометричних співвідношень та даних технічного аналізу палива. Запропоновано методику визначення теоретичної температури горіння у фурм при вдуванні в горн природного газу та/або пиловугільного палива, з використанням оперативної інформації про параметри дуття, витрати природного газу та пиловугільного палива, що знімаються з контрольно-вимірювальних приладів та систем автоматизації на центральному

пульті управління доменною піччю. На основі розробленої методики визначення виходу горнового газу та теоретичної температури горіння палива можливе вирішення практичних завдань щодо оптимізації дутьових параметрів доменної плавки, особливо при вдуванні пиловугільного палива.
Ключові слова: теоретична температура горіння, дуття, природний газ, пиловугільне паливо, горновий газ.

Вступ (Introduction)

Незважаючи на розвиток альтернативних металургійних технологій прямого отримання заліза, доменна піч все ще залишається основним технологічним агрегатом для виробництва рідкого чавуну. Враховуючи зростаючий дефіцит вугілля, придатного для процесу коксування, та вдосконалення природоохоронних заходів, стратегічне завдання чорної металургії України полягає в зниженні рівня споживання коксу при виробництві чавуну. Головна роль у вирішенні цього завдання, як і раніше, належить саме доменному виробництву, як основному споживачу коксу.

Завдяки зусиллям науковців та технологів-доменників, за останні 50 років технологія доменної плавки зазнала значного вдосконалення. Так, питома витрата коксу скоротилася з 0,9 до 0,3 т/т чавуну, питома продуктивність доменної печі збільшилася з 1,3 до 3,2 т/(м^3·добу). Важливо відзначити, що таке суттєве скорочення питомої витрати коксу було досягнуто за рахунок впровадження та вдосконалення технології доменної плавки з використанням для заміщення частини коксу пиловугільного палива.

Пиловугільне паливо на підприємствах Східної Європи почали використовувати ще у 70-х роках XX століття. Суттєвих результатів використання цієї технології досягли на заводах Японії, США, Німеччини, Китаю та інших країн.

В Україні роботу доменних печей з вдування пиловугільного палива було розпочато ще 1963 року на Донецькому металургійному заводі (ДМЗ). Ця технологія пройшла етапи дослідної та дослідно-промислової експлуатації (1968-1978 рр.), а з 1980 року на базі першої в Європі промислової установки освоєно технологію спільного вдування в горн природного газу та пиловугільного палива на збагаченому киснем дуття, що дозволило замінити до 35% коксу доменного.

Однак на сьогоднішній день вже стали зрозумілими і деякі негативні сторони даної технології. Заміна коксу пиловугільним паливом суттєво підвищує вимоги до якості залізорудних шихтових матеріалів (міцність, вміст дріб'язку, вміст заліза), коксу (післяреакційна міцність, реакційна здатність, вміст золи, сірки, вузький фракційний склад), пиловугільного палива (вміст золи, сірки, реакційна здатність), параметрів дутьового та шлакового режимів плавки (вміст кисню в дутті, температура дуття), приладів та систем автоматики, що забезпечують оперативний технологічний контроль.

Температура горіння палива в фурменій зоні доменної печі є одним з найважливіших технологічних параметрів плавки. Це початкова температура газового потоку, від якої залежить ефективність використання його теплової та хімічної енергії в робочому просторі печі. Враховуючи технічну складність безперервного та безпосереднього вимірювання температури горіння палива в горні печі, в даний час її найчастіше розраховують, визначаючи таким чином так звану теоретичну (адіабатичну) температуру горіння.

Низка досліджень (Novokhatskii, 2018), (Bol'shakov, 2009), (Rostovskii, 1998), (Wu, 2011) переконливо доводить, що теоретична температура горіння палива в фурмених осередках доменної печі є одним з основних узагальнюючих показників на основі розрахункового контролю, які й визначають раціональні значення параметрів дутьового режиму.

Особливої актуальності набуває процес розрахунку та контролю узагальнюючих теоретичних показників, що характеризують роботу газового потоку в горні печі, а отже і газодинамічні процеси по висоті печі, набуває при сучасній доменній плавці з вдуванням в

горн печі пиловугільного палива. Це пояснюється тим, що технологія доменної плавки при вдуванні пиловугільного палива, не дивлячись на високу ефективність, є в багатьох випадках досить складною. Для усунення проблем і технологічних ризиків впровадження технології доменної плавки при вдуванні пиловугільного палива необхідна реалізація заходів повної і комплексної компенсації негативного впливу на доменну плавку виведення з шихти великої кількості коксу і подачі в горн вугільного пилу, які наведені в науково-практичній літературі (Chaika, 2019).

У доменних цехах теоретичну температуру горіння палива у фурмених осередках розраховують за наближеними формулами, наприклад, за емпіричною формулою, розробленою за участю фахівців інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова, яка наведена в довідковій літературі:

$$T_т = 2000 + 0{,}75(t_д - 1100) + 40(2{,}0 - \varphi + 50(\omega - 25{,}0) + 53(9{,}0 - D) - 26КГ - 4{,}0М, °C, \quad (1)$$

де ω – концентрація кисню в дутті, %; φ – вологість дуття, %; D – витрата природного газу, % у дутті; $t_д$ – температура дуття, °С; КГ – витрата коксового газу, % у дутті; М – витрата мазуту, г/м^3 дуття.

Однак, на думку професора Тараканова А.К. із співавторами (Tarakanov, 2015), дане рівняння часто дає в сучасних умовах завищені результати, що в свою чергу, утримує технологів-доменників від раціонального підвищення теоретичної температури.

Також запропоновані підходи для розрахунку теоретичної температури горіння з урахуванням елементарного аналізу палива, що вдувається, зміни параметрів дуття і кількості додаткових палив. Так, теоретичну температуру горіння коксу і додаткового палива в доменній печі, у найбільш поширених випадках, запропоновано визначати за формулою:

$$t_т = \frac{0{,}9341t_д + 8208\omega - \varphi(2402 - 1{,}2177t_д) - (1{,}9322 + 2{,}235W^p)S_р - \ldots}{1 + \omega + 2\varphi + (0{,}0012 + 0{,}0013W^p)S_p}$$

$$\ldots \frac{-(0{,}39 + 2{,}2175C^p_{тв})S_{тв} - 2673S_г + 94{,}76}{+ 0{,}0005S_{тв} + 2{,}026S_г}, °C, \quad (2)$$

де $t_д$ – температура дуття, °С; ω – вміст кисню у дутті, м^3/м^3; φ – вміст вологи у дутті, м^3/м^3; S_p, $S_{тв}$, $S_г$ – витрата рідкого, твердого та газоподібного палива, м^3/м^3; W^p – вологість робочого палива, д.од.; $C^p_{тв}$ – вміст вуглецю в твердому паливі , д.од.

Проте, слід відзначити, що елементарний аналіз палива, на відміну технічного, є досить складним, тому його здійснюють порівняно рідко та найчастіше обмежуються проведенням технічного аналізу. Отже, коефіцієнти рівняння (2) найчастіше розраховуються на підставі усереднених даних елементарного аналізу твердого та рідкого палива. Тому, ми вважаємо, що при нестабільній сировинній базі сучасних металургійних підприємств використання даного рівняння може знижувати коректність отриманих результатів.

З урахуванням елементарні склади пилоподібного палива для доменної плавки необхідно перераховувати коефіцієнти в розрахункових формулах, що залежать від складів. Зокрема, вміст вуглецю в робочому паливі змінюється від 0,5287 до 0,7979 кг/кг, золи – від 0,0634 до 0,3555 кг/кг тощо, що, природно, потребує перерахунку коефіцієнтів, що входять у вираз (2), а отже ускладнює розрахунковий контроль параметрів роботи печі.

Визначити теоретичну температуру горіння можна з відомого рівняння, наведеного в підручнику (Efimenko, 1981), в якому всі величини, що входять до нього, віднесені до 1 кг вуглецю, що згорає на фурмах:

$$T_T = 273 + \frac{9797 + m_г \cdot q_г + V_д \cdot \left[\left(C_д + \varphi \cdot C_{H_2O}\right) \cdot t_д - 10806 \cdot \varphi\right]}{V_г \cdot C_г}, \text{ К, (3)}$$

де 9797 – теплота згорання вуглецю коксу до CO, кДж/кг; $m_г$ – витрата природного газу в розрахунку на 1 кг вуглецю, що згорає у фурм, м^3; $q_г$ – сумарний тепловий ефект перетворень компонентів газоподібного палива в зоні горіння, кДж/м^3; $V_д$ – витрата сухого дуття, віднесеного до 1 кг вуглецю, що згорає у фурм, м^3; $t_д$ – температура дуття, °С; φ – вологість дуття, д.од.; $C_д$, C_{H_2O}, $C_г$ – теплоємність дуття, вологи та газу, кДж/(м^3·град); 10806 – тепловий ефект ендотермічного процесу розкладання 1 м^3 вологи, кДж; $V_г$ – загальна кількість газів, що утворюються у фурм, у розрахунку на 1 кг вуглецю, що згорає у фурм, м^3.

Даний вираз досить широко використовується у теоретичних розрахунках. При цьому, на думку професора Лялюка В.П. (Lyalyuk, 2019), в даному випадку не враховується ентальпія вуглецю коксу, що надходить у зону горіння, і тепловіддача від продуктів горіння до рідких продуктів плавки. Крім того, обчислення розрахункових величин, віднесених до 1 кг вуглецю, що спалюється на фурмах, не становить труднощів при наявності матеріального балансу, але є досить проблематичним в тих випадках, коли необхідно контролювати значення теоретичної температури горіння у виробничих умовах або проводити аналіз на основі виробничих даних.

На думку професора Товаровського І.Г. (Tovarovskii, 2016), при визначенні можливої витрати будь-якої дутьової добавки, зручно виходити із змін теоретичної температури горіння, яка, як комплексний параметр дутьового режиму, характеризує температурно-окисні умови перетворень паливних добавок у фурмених осередках. У цьому сенсі, орієнтацію на збереження перевірених на практиці значень теоретичної температури горіння, у разі підвищення витрати добавки, слід вважати виправданою.

Отже, як показав виконаний аналіз, сучасні методики визначення теоретичної температури горіння палива в горні доменної печі є недостатньо надійними при значних коливаннях вхідних умов плавки (витрати добавки, температури та витрати дуття, концентрації кисню в ньому).

Мета роботи – розробка методичних підходів до визначення теоретичної температури горіння палива за фактично контрольованими параметрами дуття при вдуванні в горн доменної печі природного газу та ПУТ на основі стехіометричних співвідношень та даних технічного аналізу палива. Виведення комплексних формул для розрахунку теоретичної температури і виходу горнового газу, при спільному використанні пиловугільного палива і природного газу, дозволить визначати їх значення і при окремому їх використанні.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

У ході дослідження був проведений аналіз даних спеціальних літературних джерел щодо сучасних уявлень про особливості ведення доменної плавки при вдуванні в горн печі пиловугільного палива, а також методів розрахунку теоретичної температури горіння, як одного з комплексних показників теплового стану горна печі. При розробці методичних підходів до визначення теоретичної температури горіння палива за фактично контрольованими параметрами дуття при вдуванні в горн доменної печі природного газу та ПУТ були використані стехіометричні співвідношення та дані технічного аналізу палива.

Результати (Results)

Виконані дослідження (Lyalyuk, 2017) результатів впровадження і освоєння технології доменної плавки з вдуванням пиловугільного палива на доменній печі корисним об'ємом 5000 м^3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» дозволили визначити причини частих випадків

деформації і горіння повітряних фурм і холодильників, до яких відносяться значна нерівномірність протяжності зон горіння перед фурмами по колу горна і нераціональна зміна розподілу газового потоку по радіусу доменної печі.

У квітні 2016 року на доменній печі №9 об'ємом 5000 м^3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» були виконані вимірні витрати пиловугільного палива по фурмам (Рис. 1).

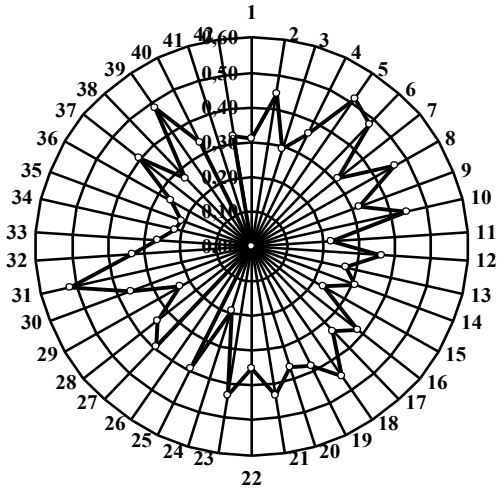

Рисунок. 1. Діаграма зміни витрати пиловугільного палива по фурмам (цифри по радіусу діаграми, т/годину).

Як видно з рис. 1, контроль витрати пиловугільного палива по фурмам доменної печі показав суттєву нерівномірність його розподілу. Наприклад, на фурмі №24 витрата палива була менше ніж на фурмі №31 на 63 %.

Спостереження за розподілом дуття по фурмам на доменній печі об'ємом 5000 м^3 також виявили значну нерівномірність цього параметру. На рис. 2-4 наведені діаграми зміни витрати дуття, теоретичної температури та виходу горнового газу перед фурмами доменної печі об'ємом 5000 м^3. Суцільним колом постійного діаметра відображаються середньодобові значення витрати дуття, теоретичної температури та виходу горнового газу по фурмам доменної печі, а ламані криві з точками у вузлах перед номером кожної фурми відображають їх фактичні значення.

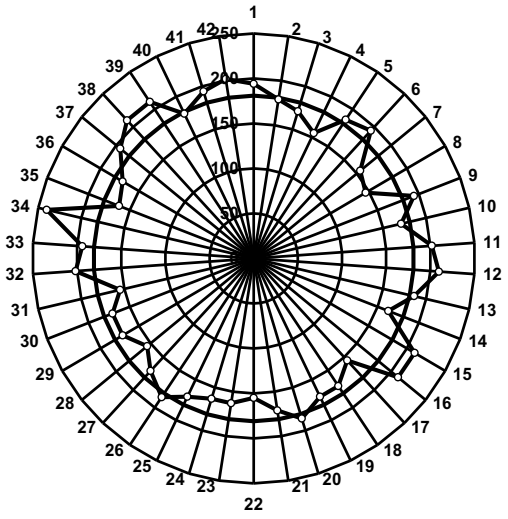

Рисунок 2. Діаграма зміни витрати дуття по фурмам печі об'ємом 5000 м^3 (цифри по радіусу діаграми, м^3/хв.)

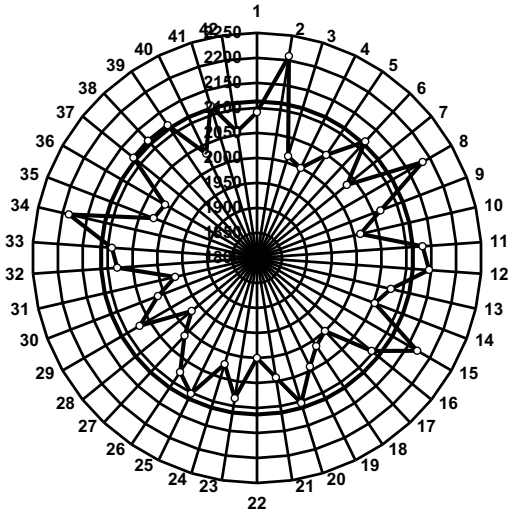

Рисунок 3. Діаграма зміни теоретичної температури по фурмам печі об’ємом 5000 м^3 (цифри по радіусу діаграми, К)

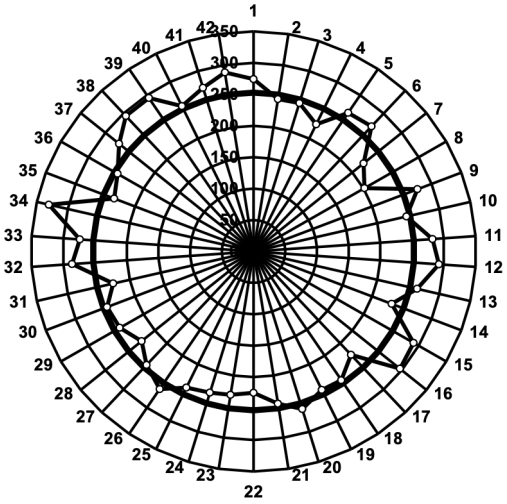

Рисунок 4. Діаграма зміни виходу горнового газу по фурмам доменної печі об’ємом 5000 м^3

(цифри по радіусу діаграми, м^3/хв.)

Аналіз діаграм показує наявність великої нерівномірності розподілу витрат дуття по фурмам, теоретичної температури і виходу горнового газу по колу і радіусу горна доменної печі. Нерівномірність розподілу дуття по фурмах по колу горна доменної печі суттєво впливає на розподіл та формування осередків горіння біля повітряних фурм в печі, глибину проникнення газового потоку в центр горна, зміну температурного поля по радіусу горна, конфігурацію та розташування зони когезії, хімічний склад газового потоку та фізичний стан конденсованих матеріалів, на нерівномірність сходження шихти, на профіль печі тощо, що, в свою чергу, впливає на рівність ходу доменної печі, на її продуктивність, питому витрату коксу та якість чавуну.

Таким чином, впровадження технології вдування пиловугільного палива на доменній печі об’ємом 5000 м^3 підприємства «АрселорМіттал Кривий Ріг», показало значну невизначеність в зміні розмірів зон горіння перед фурмами печі і розподілі газового потоку по радіусу її горну при впровадженні технології пиловугільного палива. Це вимагає розробки методики визначення і контролю теоретичної температури горіння та інших комплексних показників повітряного, комбінованого дуття і горнового газу для технології вдування в доменну піч пиловугільного палива.

Як відомо, теоретична температура горіння палива розраховується як відношення приходу теплоти (суми ентальпії дуття, теплоти горіння палива та ентальпії коксу, що приходить на фурми) до об'єму фурменого газу, що утворюється, та його питомої теплоємності.

У загальному вигляді теоретична температура горіння може бути розрахована за рівнянням:

$$T_m = \frac{Q_\Sigma}{V_\Gamma \cdot c_\Gamma}, \quad (4)$$

де Q_Σ – сумарний прихід теплоти від згорання палива (вуглецю коксу, природного газу та пиловугільного палива), кДж/с; $V_г$ – вихід горнового газу, м^3/с; $c_г$ – теплоємність горнового газу, кДж/м^3·град.

Надходження теплоти за рахунок горіння природного газу:

$$Q_г \cdot 1700, \text{ кДж/с}, \quad (5)$$

де $Q_Г$ – витрата природного газу, м^3/с; 1700 – тепловий ефект реакції горіння 1 м^3 природного газу, кДж/м^3.

Враховуючи стехіометричні співвідношення, при горінні природного газу по реакції:

$$CH_4 + 0{,}5O_2 + \frac{\beta}{2}N_2 = CO + 2H_2 + \frac{\beta}{2}N_2, \quad (6)$$

витрачається кисню дуття:

$$O_2 \cdot \left[Q_\Gamma \cdot \left(0{,}5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right], \text{ м}^3\text{/с}, \quad (7)$$

де β – вміст азоту в сухому дутті, м^3/м^3, O_2 – вміст кисню в сухому дутті м^3/м^3.

Відповідно, решта кисню витрачається на спалювання вуглецю коксу та пиловугільного палива:

$$O_2 \cdot \left[Q_Д - Q_\Gamma \cdot \left(0{,}5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right], \text{ м}^3\text{/с}, \quad (8)$$

де $Q_д$ – приведена до нормальних умов витрата дуття, м^3/с.

При цьому виділяється теплоти:

$$10521{,}9 \cdot O_2 \cdot \left[Q_Д - Q_\Gamma \cdot \left(0{,}5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right], \text{ кДж/с}, \quad (9)$$

де 10521,9 – тепловий ефект горіння вуглецю на 1 м^3 кисню.

Залишком кисню спалюється вуглецю:

$$O_2 \cdot \left[Q_Д - Q_Г \cdot \left(0{,}5 + \frac{1-O_2}{2O_2} \right) \right] \cdot \frac{12}{11{,}2}, \text{ кг/с. (10)}$$

Тепловміст спаленого вуглецю коксу нагрітого до 1400 °С:

$$1400 \cdot 1{,}6 \cdot \left(O_2 \cdot \left[Q_Д - Q_Г \left(0{,}5 + \frac{1-O_2}{2 \cdot O_2} \right) \cdot \frac{12}{11{,}2} \right] - У \cdot C_у \right), \text{ кДж/с, (11)}$$

де 1,6 – середня теплоємність вуглецю при 1400 °С, кДж/кг·град; У – витрата вугілля, кг/с; $C_у$ – середній вміст вуглецю у вугіллі, д.од.

Прийнявши середній вміст вуглецю для газового вугілля 67,0 %, отримуємо:

$$2240 \cdot O_2 \cdot \left[Q_Д - Q_Г \cdot \left(0{,}5 + \frac{1-O_2}{2 \cdot O_2} \right) \cdot \frac{12}{11{,}2} - 0{,}67 \cdot У \right], \text{ кДж/с, (12)}$$

де член 0,67·У – враховує, що вугілля потрапляє у зону горіння холодним.
Прихід теплоти з нагрітим дуттям:

$$1{,}4 \cdot Q_Д \cdot t_Д, \text{ кДж/с, (13)}$$

де 1,4 – середня теплоємність дуття в інтервалі температур 1000-1200 °С, кДж/м^3·град.; $t_д$ – температура дуття, °С.

На дисоціацію вологи дуття витрачається теплота:

$Q_д$·10806·φ, кДж, (14)

де 10806 – тепловий ефект дисоціації вологи, кДж/м^3; φ – вологість дуття, м^3/м^3.

На плавлення та шлакоутворення золи пиловугільного палива витрачається теплоти:

$C_{шл}$·$А_{пвп}$·У, кДж, (15)

де $C_{шл}$ – теплоємність шлаку, що утворюється при плавленні золи пиловугільного палива, кДж/(кг·град) (у подальшому розрахунку $C_{шл}$ прийнята =1700 кДж/(кг·град)), $А_{пвп}$ – вміст золи в пиловугільному паливі, д.од.

Вихід горнового газу при горінні газу за реакцією:

$CH_4 + 0{,}5O_2 = CO + 2H_2$: (16)

$$Q_Г \cdot \left(3 + \frac{1-O_2}{2O_2} \right). \text{(17)}$$

Вихід горнового газу при горінні вуглецю коксу та вугілля:

$$\left(2+\frac{1-O_2}{O_2}\right)\cdot\left[Q_{\text{Д}}-Q_{\text{Г}}\cdot\left(0{,}5+\frac{1-O_2}{2O_2}\right)\right]\cdot O_2,\ \text{м}^3/\text{с},\ (18)$$

Вихід горнового газу за рахунок дисоціації вологи дуття:

$1{,}5\cdot Q_{д}\cdot\varphi,\ \text{м}^3/\text{с}.\ (19)$

Отже, загальне рівняння для розрахунку виходу горнового газу під час горіння палива, має вигляд:

$$V_{\text{Г}}=Q_{\text{Г}}\cdot\left(3+\frac{1-O_2}{2\cdot O_2}\right)+\left(2+\frac{1-O_2}{O_2}\right)\cdot\left[Q_{\text{Д}}-Q_{\text{Г}}\cdot\left(0{,}5+\frac{1-O_2}{O_2}\right)\right]\cdot O_2+1{,}5Q_{\text{Д}}\cdot\varphi.\ (20)$$

Поряд з горновим газом, що утворюється в горні доменної печі при горінні вуглецю та вуглеводнів палива та дисоціації вологи дуття, до загального об'єму горнового газу приєднуються леткі речовини пиловугільного палива та азот, що виконує функцію газу-носія пиловугільного палива. Якщо припустити, що склад летких речовин, які виділяються в горні доменної печі, відповідає складу коксового газу, то розрахувати теплоємність летких речовин можна за даними, наведеними в довідниках для розрахунків апаратури для уловлювання хімічних продуктів коксування (табл. 1).

Таблиця 1. Середня ізобарна теплоємність газів

Компонент	**Вміст (X_i), %**	**Середня C_p, кДж/м^3·град в інтервалі температур 800-1227 °С**
H_2	57,9	1,406
CH_4	26,2	3,742
CO	6,0	1,502
N_2	4,6	1,490
CO_2	2,2	2,466
C_6H_6	2,5	9,372
O_2	0,6	1,589
Суміші	100	2,252

Тобто середня ізобарна теплоємність суміші газоподібних з'єднань, що виділяються в горні з пиловугільного палива в інтервалі температур 800-1227 ºС становить 2,252 кДж/м^3·град. З урахуванням теплоємності газів виділяються з летких речовин вугілля, газу-носія пиловугільного палива (азоту) та теплоти, що витрачається на шлакоутворення із золи пиловугільного палива, загальне рівняння для розрахунку теоретичної температури горіння, при вдуванні в горн печі природного газу та пиловугільного палива, може бути представлено в наступному вигляді:

$$T_m=273+\frac{1700\cdot\text{Q}_{\text{ог}}+10521{,}9\cdot O_2\left[Q_{\text{од}}-Q_{\text{ог}}\left(0{,}5+\frac{1-O_2}{2O_2}\right)\right]+1{,}4\cdot Q_{\text{од}}\cdot t_{\text{д}}+}{1{,}5\cdot\left\{\left(3+\frac{1-O_2}{2O_2}\right)Q_{\text{ог}}+\left(2+\frac{1-O_2}{O_2}\right)\cdot\left[Q_{\text{од}}-Q_{\text{ог}}\left(0{,}5+\frac{1-O_2}{2O_2}\right)\right]O_2+1{,}5\cdot Q_{\text{од}}\cdot\varphi\right\}+}\ldots$$

$$\ldots\frac{+2340\cdot O_2\left[Q_{\text{од}}-Q_{\text{ог}}\left(0{,}5+\frac{1-O_2}{2O_2}\right)-0{,}67\cdot У\right]-10806Q_{\text{од}}\cdot\varphi-C_{ш}\cdot A_{пут}\cdot m_{\text{ПУТ}}}{+(1{,}42\cdot Q_{N_2}+2{,}252\cdot V^{c})\cdot m_{\text{ПУТ}}},\ (21)$$

де 1,5 – теплоємність горнового газу, кДж/м^3·град; 1,42 – середня теплоємність азоту в інтервалі температур 100-1227 °С, кДж/нм^3·град; Q_{N2} – питома витрата азоту-носія, м^3/кг пиловугільного палива; 2,252 – середня теплоємність сухого коксового газу в інтервалі температур 800-1227 °С, кДж/нм^3·град, яка визначається за складом газу та середніми теплоємкостями компонентів; V^c – вихід летучих речовин вугілля, д.од.

З метою оцінки впливу зміни витрати ПУТ на значення теоретичної температури горіння нами були виконані розрахунки даного теоретичного показника за рівняння для умов роботи доменної печі корисним об'ємом 1033 м^3 з використанням запропонованого рівняння (21).

Як вихідні параметри для розрахунку були обрані наступні фактичні показники роботи доменної печі №1: $Q_д$ – 2021 м^3/хвилину; $t_д$ – 1067 °С; O_2 – 22,5 %; φ – 0,01 м^3/м^3; $Q_г$ – 75,2 м^3/т чавуну. Як показники якості пиловугільного палива прийняли наступні: вміст золи (А) – 9 %; вихід летучих речовин (V^d) – 24 %; Q_{N2} – 0,75 м^3/кг пиловугільного палива.

Розрахунки теоретичної температури горіння були виконані при зміні витрати пиловугільного палива від 0 до 300 кг/т чавуну з кроком 50 кг/т чавуну для двох варіантів витрати природного газу: 75,2 та 0 м^3/т чавуну.

Результати розрахунків наведено у таблиці 2.

Таблиця 2. Розрахункові значення теоретичної температури горіння

Витрата пиловугільного палива, кг/т	**Теоретична температура горіння, °С**	
	$Q_г$ = 75,2 м^3/т	**$Q_г$ = 0 м^3/т**
0	2033	2301
50	1977	2233
100	1923	2170
150	1872	2109
200	1823	2051
250	1776	2096
300	1732	1944

Таким чином, при збільшенні витрат пиловугільного палива з газового вугілля від 0 до 300 кг/т чавуну теоретична температура горіння без вдування природного газу знижується на 357 ºС, при витраті природного газу 75,2 м^3/т – на 301 ºС, що при інших рівних умовах, відповідає зниженню на 1,2 ºС/м^3 природного газу і на 1,0 ºС/кг пиловугільного палива із газового вугілля.

Висновки (Conclusions)

1. На основі стехіометричних співвідношень та даних технічного аналізу палива розроблені методичні підходи до визначення теоретичної температури горіння палива за фактично контрольованими параметрами дуття при вдуванні в горн доменної печі природного газу та ПУТ.

2. Встановлено, що при збільшенні витрати пиловугільного палива з газового вугілля від 0 до 300 кг/т чавуну теоретична температура горіння без вдування природного газу знижується на 357 ºС, при витраті природного газу 75,2 м^3/т – на 301 ºС, що при інших рівних умовах, відповідає зниженню на 1,2 ºС/м^3 природного газу і на 1,0 ºС/кг пиловугільного палива із газового вугілля.

3. На основі розробленої методики визначення виходу горнового газу та теоретичної температури горіння палива за фактично контрольованими параметрами дуття можливе вирішення практичних завдань щодо оптимізації дутьових параметрів доменної плавки, особливо при вдуванні пиловугільного палива.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Дане 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 Ч.Є.; візуалізація, Ч.Є., та К.М.; оригінальна чернетка, К.Д. та Ч.Є.; перегляд і редагування, Л.І. та К.М. Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

Література (References)

Bol'shakov, V.I., Murav'eva, I.G., Semenov, Y.S. et al. (2009) Predicting the thermal state of the blast-furnace hearth. *Steel Transl*., 39, 402–405. https://doi.org/10.3103/S096709120905009X

Chaika, A.L., Sokhatskii, A.A., Vasil'ev, L.E. et al. (2019) Investigation of the Influence of the Technology of Blast-Furnace Smelting with the Use of Pulverized Coal Fuel and Natural Gas on the Performance Indicators of Blast Furnaces. *Metallurgist*, 62, 1201–1212. https://doi.org/10.1007/s11015-019-00775-1

Efimenko, G.G., Gimmel'farb, A.A., and Levchenko, V.E. (1981) *Metalurgiya chuguna* (Metallurgy of the Cast Iron), 496.

Lyalyuk, V.P., Tarakanov, A.K., Kassim, D.A. et al. (2017) Pulverized-coal injection in a 5000-m^3 blast furnace. *Steel Transl*., 47, 675–681. https://doi.org/10.3103/S0967091217100060

Lyalyuk, V.P., Tarakanov, A.K. (2019) Gas-Dynamic Assessment of Blast-Furnace Smelting. *Steel Transl*., 49, 535–542. https://doi.org/10.3103/S0967091219080096

Novokhatskii, A.M., Diment'ev, A.O. & Padalka, A.V. (2018) Theoretical Combustion Temperature in Blast Furnaces. *Steel Transl.,* 48, 593–596. https://doi.org/10.3103/S0967091218090115

Rostovskii, A.V., Paren'kov, A.E. & Chernousov, P.I. (1998) Refining theoretical combustion temperature during the blow-in of a blast furnace. *Metallurgist*, 42, 474–476. https://doi.org/10.1007/BF02511767

Tarakanov, A.K., Bochka, V.V., Kostomarov, A.S. (2015) Optymyzatsyia parametrov dutevoho rezhyma domennoi plavky. *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promushlennost*, 2, 11-15. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP_2015_2_6

Tovarovskii, I.G., Merkulov, A.E. (2016) Features of Temperature and Concentration Fields During Pig and Cast Iron Smelting in a Blast Furnace Workspace. *Metallurgist,* 60, 589–593. https://doi.org/10.1007/s11015-016-0336-1

Wu, Sl., Liu, Cs., Fu, Cl. et al. (2011) Improvements on Calculation Model of Theoretical Combustion Temperature in a Blast Furnace. J. *Iron Steel Res. Int.,* 18, 1–5. https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60001-6