

18. A selective hydrometallurgical method for scandium recovery from a real red mud leachate: A comparative study. **Salman, A.D., Juzsakova, T., Jalhoom, M.G., ... Nadda, A.K., Nguyen, D.D.** Environmental Pollution, Vol. 308, 1 September 2022, 119596. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119596>
19. Valorization of Bayer Red Mud in a Circular Economy Process: Valuable Metals Recovery and Further Brick Manufacture. **Leiva, C., Arroyo-Torralvo, F., Luna-Galiano, Y., ... Vilches, L.F., Fernández Pereira, C.** Processes, 2022, 10, 2367. <https://doi.org/10.3390/pr10112367>
20. Experimental study and mathematical modelling of red mud leaching: application of Bayesian techniques. **Viegas, B.M., Magalhães, E.M., Orlande, H.R.B., Estumano, D.C., Macêdo, E.N.** International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 20 (5), pp. 5533–5546. DOI: 10.3390/pr10112367 <https://www.researchgate.net/publication/365318991>
21. Red mud recycling by Fe and Al recovery through the hydrometallurgy method: a collaborative strategy for aluminum and iron industry. **Liu, X., Zou, Y., Geng, R., Li, B., Zhu, T.** Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30 (15), pp. 43377–43386.

Рукопис подано до редакції 29.03.24

УДК 669.162

Д.О. КАССИМ, д-р техн. наук, проф., Є.В. ЧУПРИНОВ, канд. техн. наук, доц.,
І. А. ЛЯХОВА, канд. техн. наук, доц., М.Г. КОРЕНКО, канд. техн. наук, доц.
Державний університет економіки і технологій

УЗАГАЛЬНЕННЯ МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОВОГО ПОТОКУ В ГОРНІ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ ПРИ ВДУВАННІ КОМБІНОВАНОГО ДУТТЯ

Мета. Головною метою даної роботи є вдосконалення контролю зміни енергетичних параметрів газового потоку в горні доменних печей та розподілу газового потоку за радіусом на підставі адаптації методики визначення комплексних показників оцінки потоків комбінованого дуття та горнового газу, з урахуванням технологічних особливостей доменної плавки при вдуванні комбінованого дуття.

Методи дослідження. У роботі використано сучасні методи дослідження, у тому числі математичне моделювання, методи математичної статистики для дослідження впливу запропонованих комплексних параметрів на перебіг доменної плавки при різних технологічних режимах роботи доменної печі корисним об'ємом 5000 м³.

Наукова новизна. Розроблено методичні рекомендації щодо розрахунку повної енергії потоку горнового газу при вдуванні природного газу та пилувугільного палива в горні доменних печей.

Практична значимість. Отримані авторами даної роботи результати дозволяють контролювати як середні значення потоку горнового газу при вдуванні природного газу та пилувугільного палива в горні доменних печей, так і його значення по окремим фурмам доменної печі, що дає можливість контролювати та регулювати глибину проникнення потоку горнового газу до центру печі від кожної фурми, а, отже, дозволяє покращувати газодинамічні та відновлювальні умови доменної плавки.

Результати. У даній роботі авторами, на підставі аналізу результатів впровадження технології вдування пилувугільного палива на доменній печі корисним об'ємом 5000 м³, були запропоновані напрямки вдосконалення газодинамічних та відновлювальних умов доменної плавки на підставі контролю зміни розмірів зон горіння перед фурмами печі та розподілу газового потоку за радіусом її горна. З цією метою були узагальнені методичні підходи щодо визначення комплексних енергетичних показників оцінки потоків комбінованого дуття і горнового газу при впровадженні технології доменної плавки з вдуванням природного газу та пилувугільного палива.

Ключові слова: доменна плавка, пилувугільне паливо, горновий газ, комбіноване дуття, зона горіння, кінетична енергія, повна енергія, фурма, горн.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-45-50

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Висока ціна природного газу та його дефіцит обумовили перехід металургійних підприємств України від технології роботи з природним газом до технології доменної плавки з використанням альтернативних видів палива, зокрема з вдуванням пилувугільного палива (ПВП). При цьому доменники зіштовхнулися з рядом складних аспектів даної технології, як організаційних (якість та стабільність постачання шихтових матеріалів, технологічних параметрів роботи печей), так і технічних (зменшення ресурсу роботи доменної печі, холодильного обладнання, фурм та іншого допоміжного обладнання), які знижують ефективність застосування технології ПВП в Україні порівняно із зарубіжною практикою. В цих умовах вдосконалення контролю та регулювання газоди-

намічних умов роботи горну доменних печей при зміні параметрів дуттьового режиму плавки є актуальним практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У 2016 році в рамках проведення міжнародної науково-виробничої конференції доменників “Досвід впровадження та шляхи вирішення проблем освоєння технології вдування ПВП у доменному виробництві” був проаналізований досвід впровадження цієї технології на печах багатьох металургійних комбінатів, у тому числі і на доменній печі об’ємом 5000 м³ підприємства “АрселорМіттал Кривий Ріг”. Авторами [1], на підставі вивчення представленої інформації, було зроблено висновок, що нерівномірний розподіл дуття та пиловугільного пилу по фурмам, який мав місце, призвів до значної нерівності теоретичної температури горіння, виходу горнового газу, повної енергії потоку комбінованого дуття на зрізі фурми, що відповідає за зміну розмірів зони горіння перед кожною фурмою та повної енергії потоку горнового газу, яка в свою чергу, впливає на глибину проникнення газового потоку до центру горна, а отже і на газодинамічні умови роботи доменної печі.

Вивченню впливу комплексних показники потоків повітряного та комбінованого дуття і горнового газу на розміри зон горіння та глибину проникнення газового потоку до центру горна, а також для управління газодинамікою горна та ходом доменної плавки присвячені чисельні роботи професора Лялюка В.П. із співавторами [2-6].

Постановка задачі. З огляду на це, метою даної роботи є вдосконалення контролю зміни розмірів зон горіння перед фурмами печі та розподілу газового потоку за радіусом її горна. Для досягнення поставленої мети поставлене завдання адаптації методики визначення комплексних показників оцінки потоків комбінованого дуття та горнового газу з урахуванням технологічних особливостей доменної плавки при вдуванні природного газу та пиловугільного палива.

Викладення матеріалу та результати. Тривалий час, для судження про зміни довжини зони горіння у повітряних фурм доменних печей, використовували поняття кінетичної енергії дуття. Проте, чисельні дослідження [3, 7] показали, що кінетична потужність дуттьового потоку слабо пов’язана з довжиною зони горіння і зовсім не характеризує глибину проникнення газового потоку до центру горна, оскільки становить лише невелику частину від повної енергії потоку, що включає і енергію тиску, частина якої також витрачається на утворення зони горіння і проштовхування газу до центру горна.

Тому, перш ніж перейти до методики розрахунку повної механічної енергії потоку горнового газу при вдуванні природного газу та ПВП, розглянемо рівняння визначення повних енергій потоку повітряного дуття [3].

Запас повної механічної енергії потоку атмосферного дуття на зрізі носка фурми доменної печі визначають за допомогою рівняння (1), Дж/с

$$E_{nm\delta} = 371,2 \frac{Q_{od} \cdot T_{\delta}}{n} + 68877,6 \frac{\rho_{od} \cdot Q_{od}^3 \cdot T_{\delta}^2}{n^3 \cdot S_{\phi}^2 \cdot P_{\delta}^2}, \quad (1)$$

де Q_{od} – нормальна об’ємна витрата дуття, виміряна приладами на печі, нм³/с; T_{δ} – температура дуття; K , n – кількість повітряних фурм, шт; ρ_{od} – щільність повітряного дуття, приведена до нормальних умов, кг/м³; S_{ϕ} – площа перерізу фурм, м², P_{δ} – тиск дуття, Па.

Перший доданок рівняння (1) характеризує запас енергії тиску, а другий – величину кінетичної енергії потоку нагрітого атмосферного дуття на зрізі носка фурми доменної печі.

Для визначення запасу повної механічної енергії потоку комбінованого дуття $E_{nm\kappa\delta}$ (при вдуванні природного газу) на зрізі фурми доменної печі необхідно в рівнянні (1) замість витрати дуття використовувати приведену до нормальних умов витрату газоповітряної суміші Q_{oc} (нм³/с), що утворюється у зв’язку з частковим горінням природного газу в порожнині фурми, замість температури дуття – температуру цієї суміші T_c (К), замість нормальної щільності дуття – щільність суміші за нормальних умов – ρ_{oc} (кг/м³). Методика визначення даних параметрів наведена в [8].

Скориставшись розробленою методикою, можна розрахувати запас повної механічної енергії комбінованого дуття на зрізі доменної фурми печі за рівнянням (2), Дж/с

$$E_{nm\kappa\delta} = 371,2 \cdot \frac{Q_{oc} \cdot T_c}{n} + 68877,6 \cdot \frac{\rho_{oc} \cdot Q_{oc}^3 \cdot T_c^2}{n^3 \cdot S_{\phi}^2 \cdot P_{\delta}^2} \quad (2)$$

Струмінь дуття, що вийшов з фурми, утворює вільну розпушену порожнину з інтенсивним рухом газів і кусків коксу. На цій ділянці в струмінь підводиться енергія, пов’язана з виділенням

енергії від горіння коксу і природного газу. В результаті цього склад, маса, температура, щільність і теплоємність потоку горнового газу змінюються не тільки по відношенню до параметрів потоку повітряного або комбінованого дуття на зрізі фурми, але і по радіусу горна доменної печі.

Підведення енергії в потік горнового газу різко збільшує величину енергії тиску при інтенсивній витраті кінетичної енергії потоку дуття в зоні горіння (окислення). Тому, для визначення величини повної механічної енергії потоку горнового газу $E_{нм\ \varepsilon\varepsilon}$ в осередку горіння, в рівняння (1) потрібно внести наступні зміни, Дж/с

$$E_{нм\ \varepsilon\varepsilon} = 371,2 \frac{Q_{огг} \cdot T_m}{n} + 68877,6 \frac{\rho_{oc} \cdot Q_{oc}^3 \cdot T_c^2}{n^3 \cdot S_{\phi}^2 \cdot P_{\delta}^2}, \quad (3)$$

де $Q_{огг}$ – вихід горнових газів, приведений до нормальних умов, м³/с; T_m – температура у зоні горіння (теоретична температура горіння), К.

Вихід горнового газу можна знайти з виразу (4), м³/с

$$Q_{огг} = Q_{од} \cdot [2O_2 + (1 - O_2) + 1,5 \cdot \phi] + k_{нп} \cdot Q_{ог}, \quad (4)$$

де ϕ – вологість дуття, м³/м³; $k_{нп}$ – середній вихід водню при розкладанні вуглеводнів природного газу, який змінюється в діапазоні 1,95-2,05 в залежності від складу газу; $Q_{ог}$ – приведена до нормальних умов витрата природного газу, м³/с.

При поєднанні технологій вдування пиловугільного палива та природного газу, у струмись дуття, що вийшов із фурми в зону горіння, підводиться енергія, пов'язана з горінням коксу, природного газу і ПВП. В результаті цього склад, маса, температура, щільність і теплоємність потоку горнового газу змінюються. Тому для розрахунку повної механічної енергії потоку горнового газу з вдуванням ПВП в фурми доменної печі скористаємося рівнянням (3), підставивши у формулу позначення виходу горнового газу і теоретичної температури при вдуванні ПВП, Дж/с

$$E_{нм\ \varepsilon\varepsilon} = 371,2 \frac{Q_{огг\ нпн} \cdot T_{м\ нпн}}{n} + 68877,6 \frac{\rho_{oc} \cdot Q_{oc}^3 \cdot T_c^2}{n^3 \cdot S_{\phi}^2 \cdot P_{\delta}^2}, \quad (5)$$

де $Q_{огг\ нпн}$ – вихід горнових газів, приведений до нормальних умов при вдуванні ПВП спільно з природним газом, м³/с; $T_{м\ нпн}$ – температура в зоні горіння при вдуванні ПВП (теоретична температура горіння ПВП спільно з природним газом), К.

Виведення комплексних формул для розрахунку теоретичної температури і виходу горнового газу при спільному використанні ПВП і природного газу дозволяє визначати їх значення і при окремому їх використанні.

Розрахувати теоретичну температуру горіння у фурм можна за будь-якою з відомих формул, але найбільш доцільно при цьому використовувати оперативну інформацію, яку фіксують прилади або обчислювальні машини, встановлені на пульті управління доменною піччю

При цьому необхідно враховувати, що поряд з горновим газом, який утворюється при горінні вуглецю і вуглеводнів палива в горні доменної печі та дисоціації води дуття, до загального об'єму горнового газу приєднуються леткі речовини ПВП і азот, що виконує функції носія вугілля. Середня ізобарна теплоємність суміші газоподібних сполук, що виділяються в горні з ПВП в інтервалі температури 800-1227 °С становить 2,252 кДж/м³·град [9].

З урахуванням теплоємності летких речовин вугілля, газу-носія ПВП і теплоти, що витрачається на утворення шлаку із золи ПВП, загальне рівняння для розрахунку теоретичної температури горіння при сумісному вдуванні в горні доменної печі природного газу та ПВП, може бути представлено в наступному вигляді, К [9]

$$T_m = 273 + \frac{1700 \cdot Q_{ог} + 10521,9 \cdot \left[Q_{од} - Q_{ог} \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right] O_2 + 1,4 \cdot Q_{од} \cdot t_{\delta} + \dots}{1,5 \cdot \left\{ \left(3 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) Q_{ог} + \left(2 + \frac{1 - O_2}{O_2} \right) \cdot \left[Q_{од} - Q_{ог} \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right] O_2 + 1,5 \cdot Q_{од} \cdot \phi \right\} + \dots} + \frac{2340 \cdot O_2 \left[Q_{од} - Q_{ог} \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) - 0,67 \cdot m_{нпн} \right] - 10806 \cdot Q_{од} \cdot \phi - C_{шл} \cdot A_{нпн} \cdot m_{нпн}}{(1,42 \cdot Q_{N_2} + 2,252 \cdot V^c) \cdot m_{нпн}}, \quad (6)$$

де $C_{шл}$ – теплоємність шлаку, що утворюється при плавленні золи ПВП, кДж/(кг·град) (у розрахунках можна прийняти $C_{шл} = 1700$ кДж/(кг·град)); $A_{нпн}$ – вміст золи в ПВП, д.од.; $m_{нпн}$ – витрата

ПВП, кг/с; 1,42 – середня теплоємність азоту в інтервалі температур 100-1227 °С, кДж/нм³·град; Q_{N_2} – питома витрата азоту-носія, м³/кг ПВП; 2,252 – середня теплоємність сухого коксового газу в інтервалі температур 800-1227 °С, кДж/нм³·град, що визначається за складом газу та середніми теплоємностями компонентів; V^c – вихід летючих речовин вугілля у перерахунку на суху масу, д.од.

Загальне рівняння для розрахунку виходу горнового газу при горінні природного газу та ПВП можна знайти з виразу, аналогічного (4), але доповненого доданком, що враховує вихід водню з ПВП ($k_{H_2} = 0,42 \div 0,48$ м³/кг) та об'єм азоту-носія, що вдувається в піч – Q_{N_2} , м³/с

$$Q_{O_2} = Q_{O_2} \cdot [2O_2 + (1 - O_2) + 1,5 \cdot \varphi] + k_{N_2} \cdot Q_{O_2} + (k_{H_2} + Q_{N_2}) \cdot m_{H_2} \quad (7)$$

За допомогою представлених рівнянь (2-6) були розраховані енергетичні показники газового потоку для двох періодів роботи доменної печі корисним об'ємом 5000 м³ при приблизно однакової інтенсивності доменної плавки: перший період – при вдуванні природного газу (ПГ) та завантаженні кускового антрацити (А) (жовтень 2006 р), другий період – при вдуванні ПВП [10]. Техніко-економічні показники роботи та отримані розрахункові результати наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Техніко-економічні показники роботи доменної печі об'ємом 5000 м ³ при роботі на ПГ и ПВП		
Техніко-економічні показники та результати розрахунків	Варіант технології	
	ПГ+А	ПВП
Тривалість періоду, днів	31	31
Продуктивність, т/добу	9826	9340
Приведена продуктивність, т/добу	9826	11479
Витрата коксу (К), кг/т	426,8	451,7
Приведена витрата коксу, кг/т	426,8	409,8
Витрата антрацити (А), кг/т	56	0,0
Витрата ПВП, кг/т	0,0	71,4
Інтенсивність (К+А+ПВП), кг/м ³ · добу	948,8	977,1
Дуття: витрата, м ³ /хв	7812	7953
тиск, кПа	337	328
температура, °С	1090	990
Витрата природного газу (ПГ), м ³ /т	87,1	11,0
Вміст кисню в дутті, %	30,5	24,3
Колошниковий газ: тиск, кПа	139	148
температура, °С	93	120
вміст %: CO/CO ₂	30,0/18,4	24,1/20,7
H ₂	6,2	4,5
Аналіз чавуну, %: Si	0,84	0,63
Mn	0,30	0,19
S	0,019	0,012
Рудне навантаження на кокс, т/т	4,07	3,78
Виніс колошникового пилу, кг/т чавуну	3,2	11,2
в т.ч. вловлен, кг/т чавуну	2,8	4,7
Поточні простой/тихий хід, %	0,83/0,03	9,55/0,08
Вихід шлаку, кг/т чавуну	402	429,7
Вміст Fe во всій шихті, %	54,9	55,81
Витратні коефіцієнти, кг/т чавуну: агломерат АЦ №1	134,4	51,6
агломерат АЦ №2	1192	1331,0
окатиші	300,3	259,0
шлак збагачений	56,4	55,0
скрап металевий	51,3	8,8
вапняк	28,0	0,0
Основність шлаку, од.	1,22	1,15
Якість коксу, %: волога	3,73	3,6
зола	11,2	10,4
сірка	0,63	0,5
M ₂₅	87,6	88,2
M ₁₀	7,0	6,6
+80 мм	7,9	6,6
-25 мм	3,6	3,4
CSR	54,9	59,9
CRI	31,3	29,6
Фракція -5 мм, %: агломерат АЦ №1	17,96	13,61
агломерат АЦ №2	4,8	7,89
окатиші	3,98	6,18
Середньозважена фракція -5 мм, %	5,74	7,8
Повна механічна енергія комбінованого дуття, кДж/с	2034,8	1555,7
Повна механічна енергія горнового газу, кДж/с	5113,7	3928,6

Порівняння отриманих результатів розрахунків повних механічних енергій комбінованого дуття і горнового газу, наведених у таблиці, вказують на зменшення значень енергетичних показників, а отже і довжини зони горіння і глибини проникнення горнового газу до центру горна при переході з вдування природного газу на вдування пиловугільного палива.

Таким чином, при однаковій інтенсивності доменної плавки, вдування ПВП, в порівнянні з вдуванням природного газу, сприяє зменшенню довжини зони горіння і розвитку периферійного потоку газу в доменній печі. Для забезпечення оптимального газорозподілу в нижній частині печі необхідно при будь-яких змінах технології доменної плавки контролювати величини повних механічних енергій дуття і горнового газу, що вказують на зміну довжини зони горіння і глибини проникнення горнового газу до центру печі. Важливо не допускати зміну цих енергетичних показників нижче значень, отриманих в періоди рівної високопродуктивної роботи доменної печі з низькою витратою коксу. При цьому важливо враховувати, що нерівномірні витрати дуття і ПВП по фурмам доменної печі призводять до значної нерівномірності повних енергій потоків горнового газу і відповідно глибини проникнення газового потоку до центру горна від чого залежить вся робота доменної печі і, тим паче, при вдуванні ПВП.

Висновки та напрямок подальших досліджень. В роботі узагальнені методичні рекомендації щодо розрахунку повної енергії потоку горнового газу при різних варіантах технології доменної плавки, зокрема при вдуванні природного газу та пиловугільного палива. Наведені рівняння, які дозволяють контролювати як середні значення даного комплексного показника, так і його значення за фурмами доменної печі, що дає можливість контролювати та регулювати глибину проникнення потоку горнового газу до центру печі, для кожної фурми, а, отже, дозволяють покращувати газодинамічні та відновлювальні умови доменної плавки.

На підставі виконаних розрахунків встановлено, що при однаковій інтенсивності доменної плавки, вдування ПВП, в порівнянні з вдуванням природного газу, сприяє зменшенню довжини зони горіння і розвитку периферійного потоку газу в нижній частині доменної печі, що буде використано у подальших дослідженнях.

Список літератури

1. Проблемы технологии с вдуванием пылеугольного топлива на доменной печи объемом 5000 м³ / **Лялюк В.П., Тараканов А.К., Кассим Д.А.** и др. // Сталь. 2017. №10. С. 4-10.1. Лялюк В.П. Современные проблемы технологии доменной плавки. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – 164 с.
2. **Лялюк В.П., Товаровский И.Г.** Выбор режимов доменной плавки на комбинированном дутье с оценкой параметров фурменной зоны // Черные металлы. 2003. №11. С. 13-16.
3. **Лялюк В.П.** Механизм образования и влияние процессов в фурменных очагах на ход доменной плавки / Монография: Коллективный труд. Познание процессов доменной плавки / Под редакцией В.И. Большакова и И.Г. Товаровского // Днепропетровск: Пороги, 2006. 439 с.
4. **Tovarovskiy I.G., Gordon Y.M., Lyalyuk V.P.** Optimization of Tuyere Parameters for Natural Gas Injection and Control of Heterogeneity of Blast Furnace Operation // The Iron & Steel Society's International Technology Conference 2003, Indiana Convention Center, Indianapolis, Indiana, USA. 2003. April 27-30. Str. 805-816.
5. Application of the First Law of Thermodynamics to Analyze Raceway Phenomena and Optimize the Tuyere Parameters / **V. Shvedov, Y. Gordon, I. Tovarovskiy, V. Lyalyuk** // Proceedings 6th European Coke and Ironmaking Congress (ECIC-186). Modelling in coke and ironmaking Session 18. Düsseldorf. 2011. 27 June – 1 July. P. 1-7.
6. Лялюк В.П. Уравнение Клапейрона-Менделеева и изменение перепада статического давления газа в доменной печи // **Сталь. 2016. №2. С. 2-8.**
7. **Лялюк В.П., Кассим Д.А., Онопа В.Н., Донсков Е.Е.** Теоретические и экспериментальные исследования доменной плавки. – Кривой Рог: Дионат, 2016. – 621 с.
8. **Лялюк В.П., Тараканов А.К., Кассим Д.А.** Методика расчета полной энергии горнового газа при вдувании пылеугольного топлива // **Сталь. – 2017. – №3. – С. 2-8.**
9. Определение теоретической температуры горения при вдувании в горн доменной печи природного газа и пылеугольного топлива / **Д.А.Кассим, В.П. Лялюк, А.К. Тараканов** и др. // **Металлургическая и горнорудная промышленность. 2016. №2. С. 38-43.**
10. Опыт внедрения и пути решения проблем освоения технологии вдувания ПУТ на доменной печи объемом 5000 м³ / **Д.В. Пинчук, П.И. Огорвин, А.В. Романчук** и др. // **Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти: всеукраїнська науково-технічна конференція 4-5 квітня 2017 р.: Збірник доповідей. – Дніпропетровськ. – С. 122-129**

Рукопис подано до редакції 20.03.24