

УДК 669.162.231

DOI:10.26661/2071-3789-2019-2-42-10

Грес Леонід Петрович ⁽¹⁾, професор, доктор технічних наук
 Гупало Олена В'ячеславівна ⁽¹⁾, доцент, кандидат технічних наук
 Єрьомін Олександр Олегович ⁽¹⁾, завідувач кафедри, доктор технічних наук
 Карпенко Сергій Анатолійович ⁽²⁾, голова правління, кандидат технічних наук
 Самойленко Тетяна Вікторівна ⁽³⁾, інженер, кандидат технічних наук
 Каракаш Євген Олександрович ⁽¹⁾, доцент, кандидат технічних наук

ЕКОНОМІЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ПРИ НАГРІВАННІ ДОМЕННОГО ДУТТЯ

⁽¹⁾ Національна металургійна академія України, Дніпро

⁽²⁾ Концерн «СоюзЕнерго», Дніпро

⁽³⁾ ПП «Дніпро-Інтерсталь», Дніпро

З використанням математичного моделювання досліджено роботу блоку повітрянагрівачів доменної печі при їх опаленні природно-доменною сумішшю. Визначено основні параметри роботи повітрянагрівачів. Показано, що економія природного газу може бути досягнута за переведенням повітрянагрівачів на опалення доменним газом. Для забезпечення заданої температури дуття розглянуто два варіанти роботи повітрянагрівачів на доменному газі, що передбачають збагачення повітря горіння технологічним киснем або підігрівання компонентів горіння (палива й атмосферного повітря) перед спалюванням. Реалізація першого варіанту потребує збільшення частки кисню у повітрі горіння до 26 % та витрати доменного газу на 32 %, що призводить до підвищення питомих витрат на нагрівання доменного дуття на 21 %. Реалізацію другого варіанту забезпечують нагріванням компонентів горіння до 150 °С і збільшенням витрати доменного газу на 20 %, проте досягають скорочення питомих витрат на нагрівання доменного дуття на 6,6 %, що можна вважати економічно доцільним.

Ключові слова: повітрянагрівач, температура дуття, природний газ, доменний газ, природно-доменна суміш, економія природного газу, збагачення повітря горіння киснем, підігрівання компонентів горіння.

Вступ. Споживання природного газу підприємствами чорної металургії України становить близько 4 млрд. м³/рік, третину яких використовують у доменному виробництві [1]. За даними роботи [2] на нагрівання доменного дуття витрачають близько 129 млн.м³/рік природного газу, в той час як за кордоном на більшості металургійних підприємств давно відмовилися від його використання для опалення повітрянагрівачів.

На українських металургійних підприємствах доменні печі працюють з температурою підігрівання дуття 1050-1180 °С, одночасно температура під куполом повітрянагрівачів досягає 1250-1350 °С. Повітрянагрівачі опалюють, як доменним газом, так і природно-доменною сумішшю (ПДС) з теплотою згоряння 3,9-4,5 МДж/м³ і вмістом природного газу (ПГ) у суміші 1,5-3 % [3].

Для досягнення температури дуття 1100-1200 °С необхідно забезпечити температуру під куполом повітрянагрівача 1300-1350 °С, а калориметрична температура горіння палива повинна досягати 1400-1450 °С. Хімічний склад і теплота згоряння доменного газу не можуть забезпечити таку температуру. Тому в даний час у вітчизняній і зарубіжній практиці застосовують

ряд способів, спрямованих на підвищення калориметричної температури горіння палива при опаленні повітрянагрівачів доменним газом (ДГ). Найбільш поширеними з них є збагачення повітря горіння технологічним киснем і підігрівання компонентів горіння димовими газами, що відходять з повітрянагрівачів.

Мета роботи полягає в оцінці економічної ефективності застосування таких способів для економії природного газу при нагріванні доменного дуття.

Методика дослідження. Як об'єкт дослідження вибрано блок повітрянагрівачів, які обслуговують доменну піч об'ємом 1386 м³, що складається з трьох працюючих і одного резервного повітрянагрівача. Основні характеристики повітрянагрівачів наведено в табл. 1.

Для виконання розрахунків горіння палива використовували методику, що наведена в роботі [3]. Для виконання теплового розрахунку повітрянагрівачів використано математичну модель [4], що дозволяє за відомими конструктивними параметрами повітрянагрівача та його насадки, складом палива і умовами його спалювання, заданою витратою дуття, визначити температуру нагрівання дуття, витрату газу, повітря горіння та димових газів, температуру димових газів і насадки за її висотою в період нагрівання, а також змінювання температури дуття за висотою насадки у період дуття.

Як вихідні дані задаються: склад доменного і природного газів, їх вологість; температури холодного і гарячого дуття; витрата дуття, що нагрівається; швидкість руху повітря в насадці; тривалість періодів нагрівання і дуття; кількість повітрянагрівачів в блоці, що обслуговують до-

менну піч; характеристики насадки (висота насадки, діаметр каналів; еквівалентна товщина стінки; відносна поверхня нагрівання; площа «живого» перерізу насадки; загальна площа нагрівання; матеріал ярусів насадки).

Таблиця 1 – Характеристика повітрянагрівачів і насадки

| | |
|--|-----------------------------------|
| Тип конструкції повітрянагрівачів | з винесеними камерами горіння |
| Тип насадки повітрянагрівачів | блочна, з діаметром каналів 30 мм |
| Гідравлічний діаметр каналів насадки, м | 0,03 |
| Відносний «живий» переріз насадки, м ² /м ² | 0,36 |
| Питома поверхня нагрівання насадки, м ² /м ³ | 48,0 |
| Об'єм вогнетривів в 1,0 м ³ насадки, м ³ /м ³ | 0,64 |
| Загальна висота насадки, м | 37,10 |
| Матеріал і висота ярусів насадки, м: | |
| - перший ярус – динас | 12,6 |
| - другий ярус – ШВ-42 | 9,3 |
| - третій ярус – ШВ-37 | 6,8 |
| - четвертий ярус – ШВ-37 | 8,4 |
| Діаметр насадки, м | 6,40 |
| Поверхня нагрівання насадки, м ² | 57248 |
| Об'єм насадки, м ³ | 1193 |
| Площа перерізу насадки для проходу теплоносіїв, м ² | 11,57 |
| Загальна площа перерізу насадки, м ² | 32,14 |

Моделювання теплової роботи повітрянагрівача здійснюють у наступній послідовності. Виконують розрахунок горіння палива з визначенням теоретичної і дійсної витрат повітря, питомого виходу димових газів, складу продуктів згоряння і калориметричної температури горіння палива.

Температуру під куполом повітрянагрівача визначають за формулою

$$t_{\text{еодіе}} = t_{\text{еод}} \cdot \eta_{\text{тв}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

де $t_{\text{кал}}$ – калориметрична температура горіння палива, $^\circ\text{C}$; $\eta_{\text{тв}}$ – пірометричний коефіцієнт, що враховує умови спалювання палива та теплові втрати повітрянагрівача до довкілля. За даними роботи [5] пірометричний коефіцієнт для повітрянагрівача складає 0,90-0,95.

Подальші розрахунки виконують для кожного ярусу насадки. Під час розрахунків визначають кількість теплоти, що засвоєна насадкою, коефіцієнт використання палива, втрати теплоти в камері горіння та загальну теплову потужність повітрянагрівача, витрати палива, повітря горіння і димових газів. Далі виконують розрахунки параметрів теплообміну (коефіцієнтів тепловіддачі випромінюванням і конвекцією від димових газів до насадки) й ентальпії димових газів, за значенням якої визначають температура димових газів на виході з насадки повітрянагрівача.

Обчислюють коефіцієнти теплопередачі насадки та поле температури за висотою ярусу в періоди нагрівання та дуття. За відомими температурами теплоносіїв на вході та виході з ярусу насадки розраховують середню різницю температур між димовими газами і дуттям кожного ярусу, визначають площі поверхні нагрівання кожного ярусу, сума яких є розрахунковою площею поверхні насадки повітрянагрівача. Далі розрахункову площу порівнюють із заданою у вихідних даних. Якщо відносна похибка розрахунку поверхні нагрівання повітрянагрівача перевищує 1 %, то коригують прийняті у вихідних даних параметри (швидкість руху дуття в насадці, температури нагрівання дуття і димових газів на виході з насадки, витрату палива). Ознакою завершення розрахунку є досягнення значення відносної похибки менше ніж 1 %.

Результати дослідження.

Теплова робота повітрянагрівачів при опаленні ПДС. Як базовий варіант для порівняння вибрано роботу блоку повітрянагрівачів, що опалюються ПДС з теплою згоряння 4478,33 кДж/м³, яка складається з 97,33 % ДГ і 2,67 % ПГ. Склад палива наведено в табл. 2.

Під час виконання розрахунків горіння палива прийнято: вологість доменного газу 40 г/м³; вологість атмосферного повітря 10 г/м³; природний газ – сухий; об'ємна частка кисню в

повітрі горіння 0,21; коефіцієнт витрати повітря при спалюванні палива 1,05; температура палива 30 °С; температура повітря горіння 10 °С, витрата дуття складає 50 м³/с (180 тис. м³/год.), тривалість періоду нагрівання насадки – 2,5 год., тривалість періоду нагрівання дуття – 1,25 год.

Таблиця 2 – Склади (об'ємні відсотки) и теплота згоряння (кДж/м³) природного та доменного газів

| Газ | CO | CO ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | C ₄ H ₁₀ |
|-----|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| ПГ | 0,0 | 0,2628 | 94,1646 | 3,0598 | 1,0813 | 0,3683 |
| ДГ | 26,79 | 18,52 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Газ | C ₃ H ₁₂ | C ₆ H ₁₂ | H ₂ | N ₂ | O ₂ | Q _n ^p |
| ПГ | 0,0952 | 0,0633 | 0,0 | 0,9023 | 0,0024 | 37378,8 |
| ДГ | 0,0 | 0,0 | 3,41 | 51,28 | 0,0 | 3576,8 |

Як показали розрахунки, за прийнятих вихідних даних витрата ПДС на опалення одного повітрянагрівача складає 47279 м³/год., в тому числі 46018 м³/год. ДГ і 1261 м³/год. ПГ. Калориметрична температура горіння палива – 1452 °С, температура під куполом повітрянагрівача – 1350 °С. Температури нагрівання дуття: на початку періоду – 1330 °С; наприкінці періоду – 1223 °С. Температура димових газів на виході з повітрянагрівача: на початку періоду нагрівання насадки – 134 °С; наприкінці періоду – 398 °С; середня за період – 266 °С. Витрата димових газів крізь насадку – 87504 м³/год.

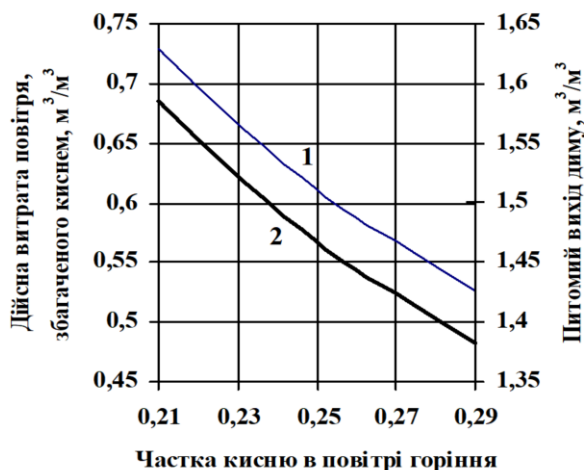


Рисунок 1 – Залежність дійсної витрати збагаченого повітря (1) і питомого виходу диму (2) від вмісту кисню в повітрі горіння

Збільшення вмісту кисню у повітрі горіння призводить до зменшення питомого виходу димових газів, а, отже, і зменшення їх загальної витрати крізь насадку. Під час переведення повітрянагрівача з опалення ПДС на ДГ і збага-

чання повітря горіння киснем для збереження вихідних параметрів теплообміну в насадці необхідно підтримувати таку ж саму витрату димових газів. Тобто необхідно забезпечити виконання умови:

Теплова робота повітрянагрівача при опаленні ДГ і збагаченні повітря горіння технологічним киснем. З метою дослідження ефективності застосування технологічного кисню для збагачення повітря горіння при опаленні повітрянагрівачів тільки ДГ, виконано розрахунки горіння палива, результати яких наведено на рис. 1 і 2.

На рис. 1 наведено результати розрахунків, що демонструють вплив концентрації кисню в повітрі горіння на дійсну витрату збагаченого повітря та питомий вихід димових газів. При збільшенні частки кисню в повітрі витрата збагаченого повітря, що є необхідною для спалювання 1,0 м³ палива, знижується, що призводить до зменшення питомого виходу продуктів згоряння за рахунок зменшення кількості азоту, що надходить з повітрям горіння. Оскільки температура під куполом повітрянагрівача та вихід димових газів мають обернено пропорційну залежність, то за збагаченням повітря киснем температура під куполом збільшується.

На рис. 2 показано змінювання температури під куполом залежно від частки кисню в повітрі горіння. З рисунка видно, що для досягнення температури під куполом 1350 °С при опаленні повітрянагрівача тільки ДГ, об'ємна частка кисню у повітрі горіння повинна складати 0,26.

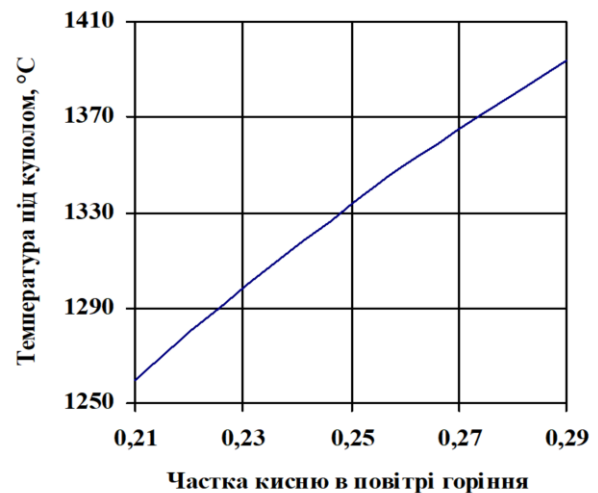


Рисунок 2 – Залежність температури під куполом від вмісту кисню в повітрі горіння

чення повітря горіння киснем для збереження вихідних параметрів теплообміну в насадці необхідно підтримувати таку ж саму витрату димових газів. Тобто необхідно забезпечити виконання умови:

$$V_{\bar{a}} = V_{\bar{a}}^{f_2}, \quad (2)$$

де $V_{\bar{a}} = B_1 \cdot v_{\bar{a}}$ – витрата димових газів, що проходять крізь насадку повітрянагрівача, при опаленні ПДС та використанні атмосферного повітря для спалювання палива, м³/год.; $V_{\bar{a}}^{f_2} = \hat{A}_2 \cdot v_{\bar{a}}^{f_2}$ – витрата димових газів, що проходять крізь насадку, при опаленні ДГ та використанні збагаченого киснем повітря, м³/год.; B_1 , B_2 – витрати ПДС і ДГ, м³/год., відповідно; $v_{\bar{a}}$ – питома витрата димових газів при спалюванні ПДС з атмосферним повітрям, м³/м³; $v_{\bar{a}}^{f_2}$ – питома витрата димових газів при спалюванні ДГ з повітрям, збагаченим технологічним киснем, м³/м³.

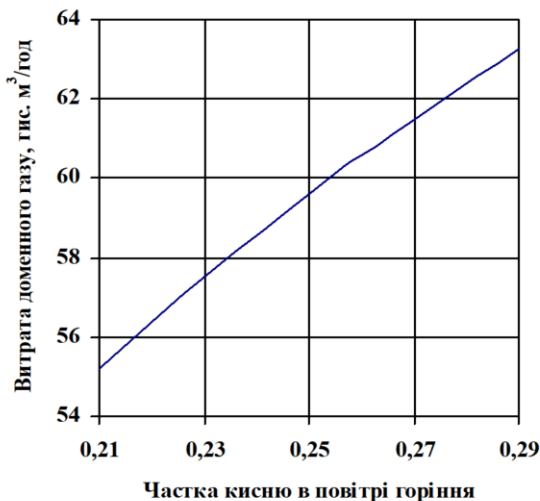


Рисунок 3 – Залежність витрати доменного газу на один повітрянагрівач від вмісту кисню в повітрі горіння

Теплова робота повітрянагрівачів при опаленні ДГ і підігріванні компонентів горіння. Другий спосіб підвищення калориметричної температури горіння палива засновано на збільшенні фізичної теплоти, що вносять в осередок горіння з підігрітими паливом та атмосферним повітрям, за рахунок утилізації теплоти димових газів, що відходять з повітрянагрівачів. Цей спосіб є поширеним на зарубіжних підприємствах, а в Україні лише на трьох новозбудованих доменних печах використовують систему теплообмінників для підігрівання компонентів горіння (доменна піч № 2 ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» і доменні печі № 3 та 5 ПАТ «Єнакіївський металургійний завод») [6,7].

Середня температура димових газів перед димовою трубою становить 260-280 °С і її короткочасне зниження у період перемикавання повіт-

Таким чином, з умови (2) визначають витрату ДГ:

$$B_2 = B_1 \cdot \frac{v_{\bar{a}}}{v_{\bar{a}}^{f_2}}. \quad (3)$$

Результати розрахунків витрат ДГ і технологічного кисню на один повітрянагрівач залежно від вмісту кисню у повітрі горіння наведено, відповідно, на рис. 3 і 4.

Як видно з рисунків, підвищення вмісту кисню у повітрі горіння до 26 % призводить до необхідності збільшення витрати доменного газу до 60589 м³/год. Одночасно витрата технологічного кисню на один повітрянагрівач складатиме 2230 м³/год.

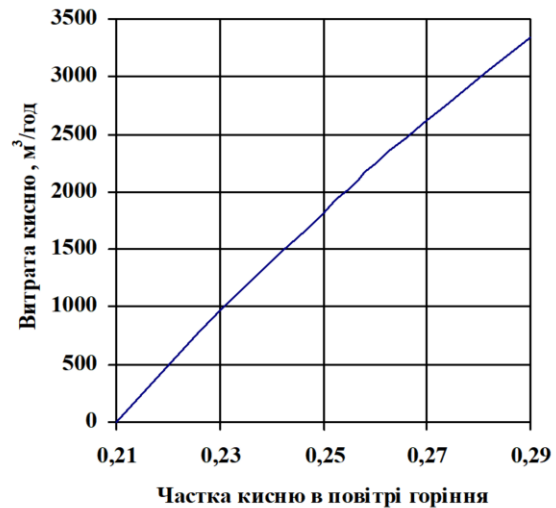


Рисунок 4 – Залежність витрати кисню на один повітрянагрівач від вмісту кисню в повітрі горіння при опаленні повітрянагрівача доменним газом

ронагрівачів практично не впливає на температуру нагрівання компонентів горіння (досвід ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь») [8].

Для визначення ефективності цього способу підвищення калориметричної температури, а, отже, і температури під куполом повітрянагрівача, виконано розрахунки цих температур залежно від температури підігрівання компонентів горіння. Під час розрахунків прийнято, що паливо і атмосферне повітря, які йдуть на опалення повітрянагрівачів, попередньо підігріті до однакової температури. Результати розрахунків наведено на рис. 5.

З рис. 5 видно, що для забезпечення температури під куполом повітрянагрівача 1350 °С і температури дуття 1223 °С, яка відповідає роботі повітрянагрівача на ПДС, необхідно реалізувати підігрівання доменного газу та повітря до 150 °С. Під час переведення повітрянагрівача з

опалення ПДС на опалення ДГ у цьому разі умова (2) набуде вигляду:

$$V_{\dot{a}} = V_{\dot{a}}^{\dot{A}\dot{A}}, \quad (4)$$

де $V_{\dot{a}}^{\dot{A}\dot{A}} = \hat{A}_3 \cdot v_{\dot{a}}^{\dot{A}\dot{A}}$ – витрата димових газів, що проходять крізь насадку, при опаленні повітрянагрівача ДГ та забезпеченні підігрівання компонентів горіння; B_3 – витрата ДГ, м³/год.; $v_{\dot{a}}^{\dot{A}\dot{A}}$ – питомий вихід димових газів при спалюванні ДГ, м³/м³.

Результати розрахунку показали, що при підігріванні компонентів горіння до 150 °С витрата ДГ на один повітрянагрівач складатиме 55217 м³/год.

Під час виконання розрахунків прийнято, що ціна ДГ – 540 грн/тис. м³, ПГ – 5614 грн/тис. м³, технологічного кисню – 2631,6 грн/тис. м³.

Витрати на паливо та технологічний кисень, грн/год., для опалення блоку повітрянагрівачів визначають як

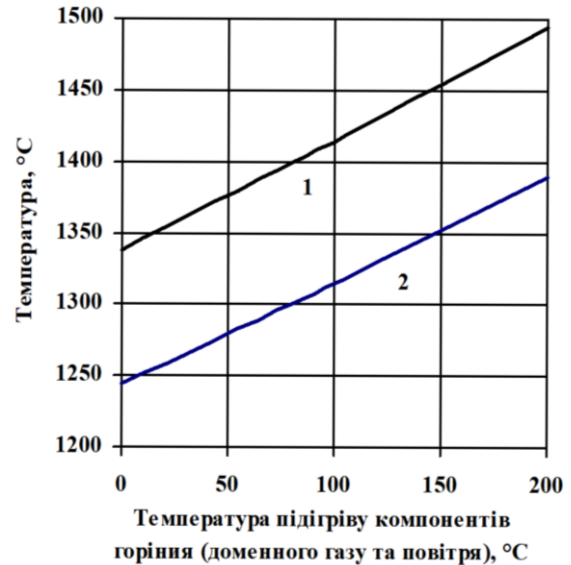
$$\dot{I} \hat{A} = (\hat{A}_{\dot{A}\dot{A}} \cdot \dot{O}_{\dot{A}\dot{A}} + \hat{A}_{\dot{I}\dot{A}} \cdot \dot{O}_{\dot{I}\dot{A}} + \hat{A}_{\dot{I}_2} \cdot \dot{O}_{\dot{I}_2}) \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

а питомі витрати на опалення блоку повітрянагрівачів:

$$\dot{I} \hat{A}' = \frac{\dot{I} \hat{A}}{V_{\dot{A}}}, \text{ грн/тис. м}^3 \text{ дутья}, \quad (7)$$

де $B_{ДГ}$, $B_{ПГ}$, $\hat{A}_{\dot{I}_2}$ – витрати ДГ, ПГ і технологічного кисню на блок повітрянагрівачів, відповідно, м³/год.; $C_{ДГ}$, $C_{ПГ}$, $\dot{O}_{\dot{I}_2}$ – ціна ДГ, ПГ і техно-

логічного кисню, відповідно, грн/тис. м³; $V_{ДГ}$ – витрата дутья, тис. м³/год.



Рисунки 5 – Залежність калориметричної температури (1) і температури під куполом повітрянагрівача (2) від температури підігрівання компонентів горіння

Таким чином, витрату ДГ визначають як

$$B_3 = B_1 \cdot \frac{v_{\dot{a}}}{v_{\dot{a}}^{\dot{A}\dot{A}}}. \quad (5)$$

Порівняльний аналіз розглянутих варіантів. Результати розрахунків економічної ефективності розглянутих варіантів роботи блоку повітрянагрівачів наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Показники роботи блоку повітрянагрівачів

| Параметри | Базовий варіант | Збагачення повітря горіння технологічним киснем | Підігрівання компонентів горіння |
|--|-----------------|---|----------------------------------|
| Паливо | ПДС | ДГ | ДГ |
| Теплота згоряння палива, кДж/м ³ | 4478,3 | 3576,8 | 3576,8 |
| Відсоток ПГ в паливі | 2,67 | 0 | 0 |
| Температура доменного газу, °С | 30 | 30 | 150 |
| Температура повітря, °С | 10 | 10 | 150 |
| Вміст кисню в повітрі горіння, % | 21 | 26 | 21 |
| Температура під куполом повітрянагрівача, °С | 1350 | 1350 | 1350 |
| Витрата дутья, тис.м ³ /год. | 180 | 180 | 180 |
| Витрата ДГ на блок повітрянагрівачів, м ³ /год. | 92036 | 121178 | 110434 |
| Витрата ПГ на блок повітрянагрівачів, м ³ /год. | 2522 | 0 | 0 |
| Витрата технологічного кисню на блок повітрянагрівачів, м ³ /год. | 0 | 4460 | 0 |
| Витрати на паливо та технологічний кисень, грн/год. | 77476,04 | 77173,06 | 59634,36 |
| Питомі витрати на опалення блоку повітрянагрівачів, грн/тис.м ³ дутья | 354,77 | 428,74 | 331,30 |

Аналіз одержаних результатів показав, що у базовому варіанті при опаленні повітрянагрівачів ПДС з теплою згоряння $4478,33 \text{ кДж/м}^3$, що забезпечує досягнення температури під куполом повітрянагрівача $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ і температури дуття $1223 \text{ }^\circ\text{C}$, витрата доменного газу на блок повітрянагрівачів складає $92036 \text{ м}^3/\text{год.}$, а витрата природного газу – $2522 \text{ м}^3/\text{год.}$ За витрати дуття $180 \text{ тис. м}^3/\text{год.}$ та прийнятих цін на енергоносії питомі витрати на опалення блоку повітрянагрівачів становлять $354,77 \text{ грн/тис. м}^3 \text{ дуття.}$

Збагачення повітря горіння технологічним киснем дозволяє відмовитися від використання природного газу для опалення повітрянагрівачів. Одночасно температура під куполом повітрянагрівача $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ забезпечується за вмістом кисню в повітрі горіння 26% , а витрати доменного газу та технологічного кисню на блок повітрянагрівачів складають $121178 \text{ м}^3/\text{год.}$ і $4460 \text{ м}^3/\text{год.}$, відповідно.

За витрати дуття $180 \text{ тис. м}^3/\text{год.}$ реалізація цього варіанта роботи порівняно з базовим варіантом призводить до зростання питомих витрат на опалення блоку повітрянагрівачів з $354,77$ до $428,74 \text{ грн/тис. м}^3 \text{ дуття}$ (що становить $73,97 \text{ грн/тис. м}^3 \text{ дуття}$ або 21%) за рахунок використання $39,157 \text{ млн. м}^3/\text{рік}$ технологічного кисню та збільшення витрати доменного газу на $302,167 \text{ млн. м}^3/\text{рік.}$

Збільшення витрати доменного газу може бути покрито за рахунок скорочення його споживання іншими агрегатами металургійного комбінату. Проте значні витрати технологічного кисню роблять впровадження цього заходу неможливим без введення в експлуатацію додаткових виробничих потужностей з виробництва кисню, або без виведення з експлуатації його постійних споживачів. Сказане вище дає підстави вважати, що за прийнятих цін на природний газ вторинні енергоресурси, а також існуючих цінах на електроенергію, застосування технологічного кисню для збагачення повітря горіння є економічно недоцільним.

Слід також зазначити, що ціни доменного газу та технологічного кисню не є постійними, а регулярно переглядаються підприємствами і можуть суттєво відрізнятись на різних металургійних комбінатах. Ціна доменного газу визначається собівартістю його виробництва, очищення й транспортування, а однією з суттєвих статей витрат у собівартості технологічного кисню є витрата електроенергії на його виробництво, яка залежно від застосовуваної технології може змінюватись в $3,5$ разів (з 330 до $1150 \text{ кВт}\cdot\text{год./тис. м}^3 \text{ кисню}$) [9,10]. Тому оста-

точний висновок про економічну доцільність переведення повітрянагрівачів на опалення доменним газом з використання збагаченого технологічним киснем повітря горіння можна робити тільки з урахуванням особливостей конкретного підприємства та його цінової політики на вторинні енергоресурси та технологічний кисень.

Варіант роботи повітрянагрівачів, що передбачає підігрівання компонентів горіння до $150 \text{ }^\circ\text{C}$, порівняно з базовим варіантом, дозволяє відмовитися від використання природного газу із збільшенням витрати доменного газу на блок повітрянагрівачів з $92036 \text{ м}^3/\text{год.}$ до $110434 \text{ м}^3/\text{год.}$ Реалізація цього варіанту забезпечить зниження питомих витрат на нагрівання дуття з $354,77$ до $331,30 \text{ грн/тис. м}^3 \text{ дуття}$ (що становить $23,47 \text{ грн/тис. м}^3 \text{ дуття}$ або $6,6 \%$). За витрати дуття $180 \text{ тис. м}^3/\text{год.}$ річна економія витрат на паливо складає $154,984 \text{ млн. грн.}$

Впровадження заходу передбачає капітальні витрати, що включають: установку двох теплообмінників (для підігрівання палива та повітря горіння); прокладування теплоізолюваних трубопроводів для димових газів, підігрітих повітря і доменного газу; підвищення тиску доменного газу перед пальником; установку вентиляторної станції з централізованим подаванням повітря. Також слід враховувати, що збільшення витрат доменного газу для опалення повітрянагрівачів потребує перегляду енергетичного балансу підприємства і оцінки зміни собівартості інших видів металургійної продукції, пов'язаної з перерозподілом доменного газу між його споживачами. Повна оцінка економічного ефекту від впровадження заходу повинна враховувати збільшення витрат на електроенергію, амортизацію та обслуговування додаткового обладнання, яку в рамках даного дослідження не виконували. Проте, зважаючи на суттєву річну економію витрат на нагрівання доменного дуття, опалення повітрянагрівачів доменним газом з попереднім підігріванням компонентів горіння за умов вітчизняних заводів з повним металургійним циклом можна вважати перспективним і економічно доцільним.

Висновки. Виконано дослідження теплової роботи блоку повітрянагрівачів, які обслуговують доменну піч об'ємом 1386 м^3 . Розглянуто три варіанти роботи повітрянагрівачів, що дозволяють забезпечити однакову калориметричну температуру горіння палива ($\approx 1450 \text{ }^\circ\text{C}$) і температуру підігріву доменного дуття ($\approx 1223 \text{ }^\circ\text{C}$), а саме: опалення повітрянагрівачів природно-доменною сумішшю; опалення доменним газом,

який спалюють у повітрі, збагаченому технологічним киснем; опалення доменним газом, який спалюють в атмосферному повітрі, з попереднім підігріванням палива та повітря. Визначено основні показники роботи повітрянагрівачів: температуру підігрівання дуття, витрати палива та технологічного кисню, а також питомі витрати на опалення блоку повітрянагрівачів.

Аналіз одержаних результатів показав, що використання технологічного кисню для збагачення повітря горіння, забезпечує переведення повітрянагрівачів на опалення доменним газом та одержання заданої калориметричної температури горіння палива за вмістом кисню у повітрі горіння 26 %. Одночасно підвищення витрати доменного газу складає 32 % (порівняно з роботою повітрянагрівачів на природно-доменній суміші). З урахуванням додаткових витрат на паливо та технологічний кисень питомі витрати

на опалення блоку повітрянагрівачів збільшуються на 20,85 % (або 73,97 грн/тис. м³ дуття) не дивлячись на виключення зі складу палива природного газу.

При організації попереднього підігрівання компонентів горіння задану температуру підігрівання дуття досягають за нагріванням палива та повітря до 150 °С та збільшення витрати доменного газу на 20 % (порівняно з опаленням повітрянагрівачів природно-доменною сумішшю). Проте за рахунок виключення природного газу питомі витрати на опалення блоку повітрянагрівачів знижуються на 6,6 % (або 23,47 грн/тис. м³ дуття), що за витрати доменного дуття 180 тис. м³/год. забезпечує економію витрат на паливо 154,984 млн. грн/рік. Тому з умов вітчизняних металургійних комбінатів такий спосіб є найкращим та економічно доцільним.

Бібліографічний перелік

1. **Товаровский И. Г.**, Меркулов А. Е. Доменная плавка с вдуванием продуктов газификации углей. Киев: Наукова думка, 2016. 222 с.
2. **Грес Л. П.**, Карпенко С. А., Миленина А. Е. Теплообменники доменных печей монография / под общ. ред. Л. П. Греса. Днепропетровск : Пороги, 2012. 491 с.
3. **Грес Л. П.** Высокоэффективный нагрев доменного дутья : монография. Днепропетровск : Пороги, 2008. 492 с.
4. **Металлургические печи** : Теория и расчеты. В 2-х т. Т. 1. / под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. Минск : Белорусская наука, 2007. 596 с.
5. **Металлургические печи** : Теория и расчеты. В 2-х т. Т. 2. / под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. Минск : Белорусская наука, 2007. 832 с.
6. **Грес Л. П.**, Каракаш Е. А., Колдомасов С. В., Карпенко С. А. Повышение энергоэффективности нагрева доменного дутья на эксплуатируемых доменных печах путем установки системы теплообменников для нагрева компонентов горения и модернизации воздухонагревателей. *Металл и литье Украины*. 2014. № 5-6. С. 43-47.
7. **Заєць О. М.** Вплив частки коксового газу в паливі на необхідний рівень підігріву повітря горіння доменних повітрянагрівачів при використанні їх теплоти димових газів. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». 2014. № 42 (1214). С. 43-48.
8. **Карпенко С. А.** Підвищення ефективності нагріву доменного дуття шляхом удосконалення параметрів теплообміну та режимів експлуатації комплексу повітрянагрівачі-теплообмінники : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02. Дніпро, 2017. 20 с.
9. **Карп И. Н.**, Зайвий А. Н., Марцевой Е. П., Пьяных К. Е. Использование кислорода и обогащенного кислородом воздуха в нагревательных печах, колодцах, стендах разогрева сталеразливочных ковшей. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2012. № 3. С. 18-29.
10. **Гупало Е. В.**, Пономаренко Д. С., Романько В. В. Эффективность использования излишков технологического кислорода для экономии топлива на металлургическом заводе. *Сучасні технології в промисловому виробництві* : матеріали всеукр. міжвуз. наук.-техн. конф. м. Суми, 19-23 квітня 2010 р. Суми, 2010. Ч. III. С. 93-94.

Грес Леонид Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры экологии, теплотехники и охраны труда, Национальная металлургическая академия Украины (Украина, Днепр). E-mail: leonid.gres@gmail.com

Гупало Елена Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии, теплотехники и охраны труда, Национальная металлургическая академия Украины (Украина, Днепр). E-mail: gupaloelena@gmail.com

Ерёмин Александр Олегович, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой экологии, теплотехники и охраны труда, Национальная металлургическая академия Украины (Украина, Днепр). E-mail: aoeremin@gmail.com

Карпенко Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, председатель правления, Концерн «СоюзЭнерго» (Украина, Днепр). E-mail: concern@souzenergo.com

Самойленко Татьяна Викторовна, кандидат технических наук, инженер, частное предприятие «Днепр-Интерсталь» (Украина, Днепр). E-mail: tvsamoilenko@i.ua

Каракаш Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии, теплотехники и охраны труда, Национальная металлургическая академия Украины (Украина, Днепр). E-mail: yevgenkarakash@gmail.com

ЭКОНОМИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ НАГРЕВЕ ДОМЕННОГО ДУТЬЯ

С использованием математического моделирования выполнены исследования работы блока воздушнонагревателей доменной печи при их отоплении природно-доменной смесью. Определены основные параметры работы воздушнонагревателей. Показано, что экономия природного газа может быть достигнута при переводе воздушнонагревателей на отопление доменным газом. Для обеспечения заданной температуры дутья рассмотрены два варианта работы воздушнонагревателей на доменном газе, предусматривающие обогащение воздуха горения технологическим кислородом или подогрев компонентов горения (топлива и атмосферного воздуха) перед сжиганием. Установлено, что первый вариант может быть реализован при содержании кислорода в воздухе горения до 26 % и увеличении расхода доменного газа на 32 %, что приводит к росту удельных затрат на нагрев доменного дутья на 21 %. Реализация второго варианта обеспечивается при нагреве компонентов горения до 150 °С и увеличении расхода доменного газа на 20 %, однако обеспечивает сокращение удельных затрат на нагрев доменного дутья на 6,6 % и поэтому является экономически целесообразной.

Ключевые слова: воздушнонагреватель, температура дутья, природный газ, доменный газ, природно-доменная смесь, экономия природного газа, обогащение воздуха горения кислородом, подогрев компонентов горения

Gres Leonid, Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Ecology, Heat-Transfer and Labour Protection, National Metallurgical Academy of Ukraine (Ukraine, Dnipro). E-mail: lonid.gres@gmail.com

Gupalo Olena, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Ecology, Heat-Transfer and Labour Protection, National Metallurgical Academy of Ukraine (Ukraine, Dnipro). E-mail: gupaloelena@gmail.com

Yeromin Oleksandr, Doctor of Technical Science, Manager of the Department of Ecology, Heat-Transfer and Labour Protection, National Metallurgical Academy of Ukraine (Ukraine, Dnipro). E-mail: aoeremin@gmail.com

Karpenko Serhii, Candidate of Technical Sciences, Chairman of the Board, «SouzEnergo» Concern (Ukraine, Dnipro). E-mail: concern@souzenergo.com

Samoilenko Tetiana, Candidate of Technical Sciences, Engineer, Private enterprise «Dnepr-Intersteel», National Metallurgical Academy of Ukraine (Ukraine, Dnipro). E-mail: tvsamoilenko@i.ua

Karakash Yevhen, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Ecology, Heat-Transfer and Labour Protection, National Metallurgical Academy of Ukraine (Ukraine, Dnipro). E-mail: yevgenkarakash@gmail.com

NATURAL GAS ECONOMY IN THE PROCESS OF AIR HEATING IN THE HOT-BLAST STOVES

On the Ukrainian metallurgical enterprises blast furnaces work with the temperature of heating of blowing 1050-1180 °C, simultaneously a temperature under the dome of air-heater is 1250-1350 °C. Air-heaters heat, by both domain gas and naturally-domain mixture with the warmth of combustion 3,9-4,5 Mj/m³ and maintenance of natural gas in mixture 1,5-3 %. research of thermal work of block of air-heaters, attendant a high furnace by volume of 1386 m³ is executed. Applying the mathematical modelling, the study of the hot-blast stoves, which are heated by a mixture of natural and blast-furnace gases, was carried out, and the basic parameters of the hot-blast stoves operation were determined. Mathematical model allows on the known structural parameters of air-heater and its attachment, composition of fuel and terms of its incineration, on the given expense of blowing, to determine the temperature of heating of blowing, gas expense, air of burning expense and smoke gases expense, temperature of smoke gases and attachment on it height in the period of heating, and also change of temperature of blowing on the height of attachment in the period of blowing. It is shown that the saving of natural gas can be achieved by changing the fuel mixture to the blast furnace gas. For ensuring the required temperature of the air blast when the hot-blast stoves are heated by the blast furnace gas, two variants of their operation were considered: 1) the enrichment of combustion air with technological oxygen; 2) preheating the combustion components (fuel and atmospheric air) before burning. It was found that the first variant can be implemented by enriching the combustion air with the process oxygen up to 26 % and increasing the consumption of the blast furnace gas by 32 %, but these lead to increasing of the specific costs of the air heating by 21 %. The implementation of the second variant can be ensured by heating of the combustion components to 150 °C and increasing the consumption of the blast furnace gas by 20 %. However, these lead to reducing of the specific costs of the air heating by 6.6 % and make the second variant is cost-effective.

Key words: hot-blast stove, temperature of air blast, natural gas, blast furnace gas, mixture of natural and blast furnace gases, natural gas saving, enrichment of combustion air with the process oxygen, preheating of combustion components.

Стаття надійшла до редакції 23.10.2019 р.
Рецензент, проф. М. В. Губинський