

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-16-25>

УДК 669.162.231

Л. П. Грес¹, д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-5343-3438

О. В. Гупало¹, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0003-3145-9220

В. І. Верещак², директор

О. О. Єршомін¹, д.т.н., проф., ORCID 0000-0001-8306-578X

Ю. М. Радченко¹, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0002-5055-6707

Д. В. Верещак²

¹ Український державний університет науки і технологій

² ТОВ - НВФ "КОШ"

ЗБІЛЬШЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПІДГРІВУ ДОМЕННОГО ДУТТЯ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ВІДХІДНИХ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ

Анотація. Для нагрівання доменного дуття використовуються повітрянагрівачі, які опалюються доменним газом. Збільшення температури горіння доменного газу шляхом підвищення температури підігріву компонентів горіння перед їх спалюванням в повітрянагрівачах дозволяє підвищити температуру нагріву доменного дуття. Проте відносно низька температура відхідних димових газів повітрянагрівачів обмежує можливості збільшення температур підігріву компонентів горіння. Дослідження, виконані в роботі, спрямовані на подолання зазначеного обмеження шляхом обладнання системи утилізації теплоти димових газів теплогенератором, що опалюється доменним газом. Димові гази, які утворюються в теплогенераторі, змішуються з відхідними димовими газами доменних повітрянагрівачів, що дозволяє підвищити їх температуру. Далі суміш димових газів подається в теплообмінники для підігріву доменного газу і повітря перед їх спаленням в повітрянагрівачах. Розроблені авторами технічні рішення дозволяють збільшити температуру підігріву компонентів горіння на 140 °С, досягти температури підігріву доменного дуття 1210-1220 °С і забезпечити економію коксу 3,1 - 4,2 %.

Ключові слова: доменні повітрянагрівачі, відхідні димові гази, утилізація теплоти, доменне дуття, економія коксу.

Посилання для цитування: Збільшення температури підігріву доменного дуття шляхом удосконалення системи утилізації теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів / Л. П. Грес, О. В. Гупало, В. І. Верещак, О. О. Єршомін, Ю. М. Радченко, Д. В. Верещак // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 16-25. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-16-25>

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Вступ. На металургійних підприємствах для опалення доменних повітрянагрівачів в якості основного палива використовується доменний газ. В залежності від складу палива і вмісту в ньому водяної пари теплота згоряння доменного газу зазвичай складає 3,0-3,2 МДж/м³. Така калорійність доменного газу не забезпечує калориметричну температуру горіння палива 1420-1370 °С, яка необхідна для досягнення температури під куполом повітрянагрівачів 1300-1350 °С і не дозволяє забезпечити температуру нагріву дуття на рівні 1170-1220 °С [1, 2]. Зниження температури нагріву дуття призводить до збільшення витрат коксу на виробництво чавуну, що негативно впливає на економічні показники доменного процесу, збільшуючи собівартість продукції. Тому будь-які заходи, спрямовані на підвищення температури дуття шляхом удосконалення роботи повітрянагрівачів, є актуальними.

Одним з відомих способів підвищення калориметричної температури горіння доменного газу є збільшення температури підігріву компонентів горіння за рахунок більш глибокої утилізації теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів. Але використання цього способу має деякі обмеження. В залежності від складу сировини та технології доменної плавки димові гази на виході з повітрянагрівачів містять 160 – 1475 мг/м³ оксидів сірки [2], а їх середня температура складає 230-260 °С. Для запобігання конденсації парів сірчаної кислоти в теплообмінниках та димовому тракту повітрянагрівачів необхідно підтримувати температуру димових газів на виході з теплообмінників на рівні 130 – 140 °С, що обмежує глибину утилізації теплоти димових газів і зменшує температуру підігріву повітря і палива в теплообмінниках. І хоча існують рішення щодо удосконалення конструкції теплообмінників, спрямовані на запобігання конденсації парів сірчаної кислоти в системі утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів [2, 3], їх впровадження пов'язано з низкою складнощів, а саме: заміною існуючих теплообмінників, модернізацією системи підведення та відведення теплоносіїв, збільшенням аеродинамічного опору теплообмінників, облаштуванням системи утилізації теплоти додатковою контрольно-вимірювальною апаратурою і таке інше.

В роботі [4] запропоновано альтернативне технічне рішення щодо збільшення температури горіння доменного газу, яке передбачає реконструкцію системи підготовки компонентів горіння перед спалюванням з встановленням додаткового обладнання – теплогенератора та змішувача. В теплогенераторі відбувається спалювання додаткового доменного газу в атмосферному повітрі. Продукти згоряння палива, що при цьому утворюються, далі

надходять у змішувач, де змішуються з атмосферним повітрям та технологічним киснем. Таким чином на виході зі змішувача забезпечується повітряно-димова суміш, у складі якої міститься 21 об'ємний відсоток кисню. Далі ця суміш подається в якості окиснювача на спалювання доменного газу в повітрянагрівачі доменної печі.

Ефективність такої схеми підготовки компонентів горіння перед спалюванням в повітрянагрівачах досліджено в [5]. Визначено, що підвищення калориметричної температури горіння доменного газу до 1420 °C і, відповідно, температури підігріву доменного дуття до 1210-1220 °C (при спалюванні в теплогенераторі холодних компонентів горіння) потребує додаткової витрати 16 900 м³/год доменного газу та 6 658 м³/год технологічного кисню. Такі витрати теплоносіїв є суттєвими і не завжди є в наявності на підприємстві.

Метою даної роботи є розробка способу утилізації теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів доменної печі, який характеризується вищою енергоефективністю та є вільним від згаданих вище недоліків, притаманних відомим способам підвищення температури доменного дуття.

Сутність запропонованих технічних рішень. Співробітниками ТОВ – НВФ "КОШ" у співпраці з дослідниками Українського державного університету науки і технологій розроблено новий спосіб утилізації теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів доменної печі [6], схему якого наведено на рис. 1.

Спосіб реалізується наступним чином. В форкамеру 4 повітрянагрівача 1 через штуцери подачі повітря 2 та доменного газу 3 подаються нагріті газ і повітря. Утворені димові гази із форкамери 4 направляються в насадку 5 повітрянагрівача. Відпрацьовані димові гази через димові штуцери 6 надходять в димовий лежак повітрянагрівачів, а з нього – в димовий змішувач 15, при цьому відсічні шибери 9, 10 та дросельний клапан 11 відкриті. В теплогенератор 12 через штуцери 13, 14 подається атмосферне повітря і додатковий доменний газ, де відбувається його спалення. Утворені димові гази з температурою 1200 – 1250 °C направляються в змішувач 15, де зустрічаються з димовими газами повітрянагрівачів з температурою 230 - 260 °C. Після змішування цих димових газів їх температура осереднюється до 300 – 400 °C в залежності від температур нагрівання повітря та доменного газу, які використовуються для опалення повітрянагрівачів. Регулювання цієї температури відбувається за рахунок зміни витрат повітря, використовуючи термопару 16, процесор 18, виконуючий механізм 19

та дросельний клапан 20. Димова суміш із заданою температурою через додатковий димопровід 17 направляється в повітряний 21 і газовий 22 теплообмінники і нагріває повітря і доменний газ. Відпрацьовані димові гази з температурою на 10-15 °С вище температури точки роси парів сірчаної кислоти попадають в димовий лежак 7. Надлишкова частка (5-20 %) димової суміші проходить, минаючи теплообмінники 21, 22, через обвідний димопровід 27 і попадає в димовий лежак 7, а потім в димар 8. На обвідному димопроводі 27 розташовано дросельний клапан 28 з допомогою якого регулюється витрата димової суміші через газовий теплообмінник 22. Витрати димових газів, що надходять до повітряного теплообмінника, регулюються дросельним клапаном 30.

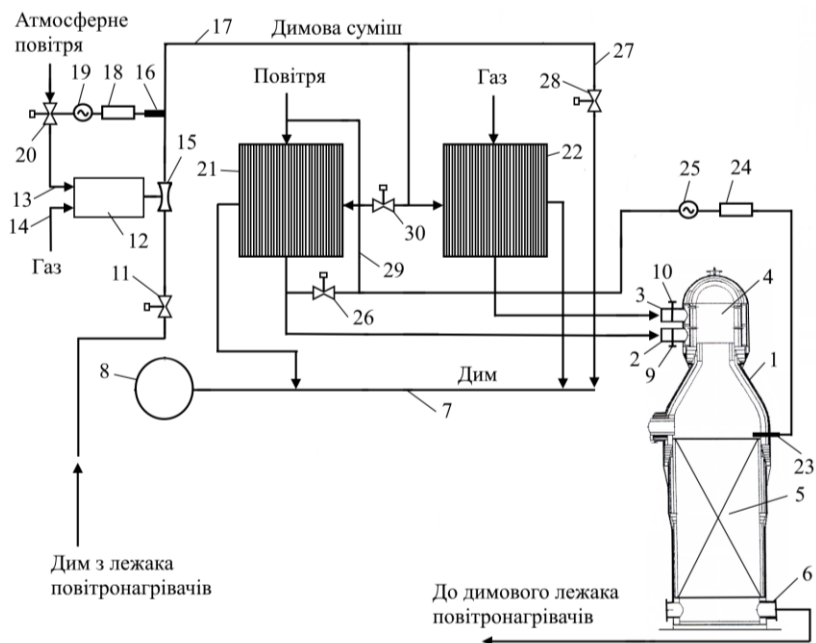


Рисунок 1 – Схема утилізації теплоти відхідних димових газів доменних повітрянагрівачів з теплогенератором: 1 - повітрянагрівач; 2 і 3 - штуцери подачі повітря і доменного газу; 4 - форкамера; 5 - насадка; 6 - димові штуцери; 7 - димовий лежак; 8 - димар; 9, 10 - відсічні шибери; 11, 26, 28 і 30 - дросельні клапани; 12 - теплогенератор; 13 і 14 - штуцери подачі повітря і доменного газу; 15 - змішувач; 16 - термопара; 17 - додатковий димопровід; 18 - процесор; 19 і 25 - виконуючі механізми; 20 - дросельний клапан; 21 і 22 - теплообмінники; 23 - термопара; 24 - процесор; 27 - обвідний димопровід; 29 - допоміжний повітряний димопровід.

Повітря і доменний газ, проходячи в середині труб теплообмінників 21 і 22, нагріваються за рахунок теплоти димової суміші і поступають в штуцери подачі повітря 2 і доменного газу 3. Температура димових газів на вході в насадку 5 повітрянагрівача 1 стабілізується та підтримується на рівні 1300 - 1400 °С зміною температури нагрітого повітря, яка регулюється за рахунок змішування частки холодного повітря, що проходить через повітропровід 29, та нагрітого повітря, що виходить з повітряного теплообмінника 21. При цьому термопара 23, яка розташована зверху насадки 5, електрично зв'язана з процесором 24, виконуючим механізмом 25 та дросельним клапаном 26, який регулює витрати нагрітого повітря.

Методика дослідження. Для визначення ефективності використання запропонованого способу утилізації теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів доменної печі розроблено спрощену методику розрахунку температури нагріву доменного дуття. В якості вихідних даних задаються:

- склад сухого доменного газу, його вологість та умови спалювання – коефіцієнт витрати повітря і вміст кисню в повітрі, що подається на спалювання палива;
- витрата доменного газу на опалення повітрянагрівачів;
- температура холодного доменного газу, що подається в теплогенератор, та температура підігрітого в теплообмінниках доменного газу, що подається в повітрянагрівачі;
- температура холодного повітря, що подається на спалювання доменного газу в теплогенератор, та температура підігрітого повітря, що подається на спалювання палива в повітрянагрівачі;
- температура димових газів на виході з повітрянагрівачів;
- коефіцієнти теплових втрат в теплогенераторі, теплообмінниках та пірометричний коефіцієнт для повітрянагрівачів.

За методикою, наведеною в [1], виконуються розрахунки горіння доменного газу в теплогенераторі з визначенням теплоти згорання палива, теоретичної і дійсної витрат повітря; питомого виходу продуктів згорання та їх складу, залежності ентальпії димових газів від температури; калориметричної температури горіння доменного газу.

Далі розрахунок виконується методом послідовних наближень.

Задається витрата доменного газу на теплогенератор і розраховуються витрати повітря, необхідна для його спалювання, кількість продуктів згорання та їх температура.

З рівняння теплового балансу змішувача розраховується ентальпія димових газів на виході зі змішувача, за величиною якої визначається температура диму на виході зі змішувача.

З теплового балансу теплообмінників визначаються температури підігріву в них повітря та доменного газу. Якщо ці розраховані температури не відповідають заданим у вихідних даних, то збільшують або зменшують прийняте значення витрати доменного газу на теплогенератор і переходять до наступного наближення. Ознакою закінчення розрахунків є досягнення припустимої похибки визначення температур підігріву доменного газу і повітря в теплообмінниках.

Калориметрична температура горіння палива та температура під куполом повітрянагрівача розраховується за відомими формулами, наведеними в [1].

Температура нагріву доменного дуття, відповідно до [2], розраховується як:

$$t_{\text{дуття}} = t_{\text{купол}} - (130...140), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (8)$$

де $t_{\text{купол}}$ – температура під куполом повітрянагрівача, $^\circ\text{C}$.

Результати та їх обговорення. Для визначення ефективності використання запропонованої системи утилізації теплоти відхідних димових газів доменних повітрянагрівачів виконано розрахунки температур нагріву доменного дуття в повітрянагрівачах при їх опаленні доменним газом для наступних варіантів:

1) блок повітрянагрівачів не обладнано системою утилізації теплоти відхідних димових газів і для опалення повітрянагрівачів використовуються холодні доменний газ і атмосферне повітря;

2) повітрянагрівачі обладнано системою утилізації теплоти димових газів, наведеною на рис. 1, при цьому витрати доменного газу та повітря на теплогенератор дорівнюють нулю і в теплообмінники подаються димові гази з такою ж температурою, з якою вони покидають повітрянагрівачі, а температура диму на виході з теплообмінників обмежується температурою конденсації пари сірчаної кислоти ($130 \text{ } ^\circ\text{C}$);

3) повітрянагрівачі обладнано системою утилізації теплоти димових газів, наведеною на рис. 1, при цьому доменний газ та повітря подаються на спалення в теплогенератор без попереднього підігріву, доменний газ і повітря, що використовуються для опалення повітрянагрівачів підігріваються в теплообмінниках до однакової температури. Температура диму на виході з теплообмінників обмежується температурою конденсації пари сірчаної кислоти ($130 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Інші вихідні дані, прийняті під час розрахунків:

– склад сухого доменного газу, об'ємні відсотки:

$\text{CO} = 21,76$; $\text{H}_2 = 5,45$; $\text{CO}_2 = 17,84$; $\text{O}_2 = 0$; $\text{N}_2 = 54,95$; $\text{H}_2\text{S} = 0$;

- вологість доменного газу 49,93 г/м³;
 - коефіцієнт витрати повітря при спалюванні палива в повітрянагрівачах і в теплогенераторі 1,05;
 - теплота згоряння вологого доменного газу 3143,15 кДж/м³.
 - витрата доменного газу на блок повітрянагрівачів 110 000 м³/год.
- При відсутності підігріву доменного газу і повітря їх температури, відповідно, складають 35 °С і 10 °С.

Коефіцієнти теплових втрат в теплогенераторі та теплообмінниках – 0.95. Пірометричний коефіцієнт для повітрянагрівачів – 0.95 [1].

Результати розрахунку для варіанту 1 дозволили визначити базові показники роботи системи блоку повітрянагрівачів доменної печі, яка не обладнана системою утилізації теплоти димових газів. Так, при витратах доменного газу 110 000 м³/год та 70 466 м³/год атмосферного повітря на його спалення, витрата диму на виході з блоку повітрянагрівачів складає 166 375 м³/год при середній температурі диму 230 °С. При відсутності підігріву компонентів горіння перед спалюванням в повітрянагрівачах досягається калориметрична температура горіння доменного газу 1273 °С і температура під куполом повітрянагрівачів 1210 °С, що дозволяє забезпечити температуру нагріву доменного дуття на рівні 1070-1080 °С.

Результати розрахунку для варіанту 2 показали, що обладнання блоку повітрянагрівачів запропонованою системою утилізації теплоти димових газів, яка працює при вимкненому теплогенераторі, дозволяє за рахунок теплообмінників досягти підігріву повітря та доменного газу до 120 °С, що забезпечить збільшення калориметричної температури горіння доменного газу до 1347 °С і температуру під куполом повітрянагрівачів 1280 °С, що дозволяє забезпечити збільшення температури нагріву доменного дуття на рівні 1140-1150 °С.

Показники роботи системи утилізації теплоти відхідних димових газів доменних повітрянагрівачів для варіанту 3 наведені в таблиці 1. Як видно з таблиці, запропонований спосіб утилізації теплоти дозволяє підвищити температуру підігріву доменного газу і повітря в теплообмінниках до 214 °С і досягти температури нагріву доменного дуття – 1210-1220 °С. Тобто, у порівнянні з базовим варіантом (варіант 1) роботи блоку повітрянагрівачів на холодних доменному газі і повітрі, впровадження варіанту 3 дозволяє підвищити температуру нагріву дуття на 140 °С.

За даними дослідження [7] збільшення температури дуття на кожні 10 °С при його температурі більше 1000 °С забезпечує економію коксу 0,22–0,3 % (або 0,9-1,2 кг/т чавуну). Спираючись на ці дані, можна оцінити потенціал економії коксу від впровадження запропонованого

способу утилізації теплоти димових газів на рівні 3,1 - 4,2 % (або 12,6-16,8 кг/т чавуну). Слід також зазначити, що у порівнянні з іншими відомими способами збільшення температури дуття, наприклад [5], реалізація запропонованого способу утилізації теплоти димових газів потребує значно менших енергетичних витрат, а саме – додаткового використання тільки 8881 м³/год доменного газу.

Таблиця 1 – Результати розрахунків

Показник	Значення показника
Температури теплоносіїв перед теплогенератором, °С:	
- доменний газ	35
- повітря	10
Витрата доменного газу на теплогенератор, м ³ /год	8881
Температури теплоносіїв на вході в змішувач, °С:	
- диму з теплогенератора	1210
- диму від блоку повітрянагрівачів	230
Витрати на вході в змішувач, м ³ /год:	
- диму (з теплогенератора)	13432
- диму від блоку повітрянагрівачів	166372
Температура теплоносія на виході із змішувача, °С	312
Витрата теплоносія на виході із змішувача, м ³ /год	179804
Температури компонентів горіння перед спалюванням в повітрянагрівачах, °С:	
- доменного газу	214
- повітря	214
Витрата диму від блоку повітрянагрівачів, м ³ /год	166372
Калориметрична температура горіння палива в повітрянагрівачах, °С	1421
Температура під куполом повітрянагрівачів, °С	1350
Температура підігріву дуття, °С	1210-1220

Висновки

Доведено, що спосіб утилізації теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів доменної печі, шляхом регулювання роботи комплексу «блок повітрянагрівачів- теплообмінники з теплогенератором», дозволяє досягнути повної і однакової глибини утилізації теплоти відхідних димових газів в газовому та повітряному теплообмінниках, стабілізувати температуру димових газів на вході в насадку повітрянагрівачів на рівні 1300 – 1350 °С, що забезпечує покращення якості спалювання палива в повітрянагрівачах, збільшення температури нагрівання повітря і доменного газу в теплообмінниках, підвищення температури нагріву доменного дуття на 140 °С, зниження питомої витрати коксу на 3,1 - 4,2 % на

виробництво чавуну за рахунок збільшення на 8 % використання доменного газу.

Перелік посилань

1. *Металлургические печи*: Теория и расчеты / Губинский В. И., Тимошпольский В. И., Ольшанский В. М. и др. Минск : Белорусская наука. В 2-х т. Т. 1. 2007. 596 с.

2. *Повышение энергоэффективности нагрева доменного дутья*. Монография. / Л. П. Грес, С. А. Карпенко, А. А. Науменко, В. П. Ивашенко, А. О. Еремин, Е. А. Каракаш, Е. В. Гупало. Под общей редакцией д.т.н., проф. Л. П. Греса. - Днепр, 2021. 612 с.

3. Пристрій для утилізації теплоти відхідних димових газів доменних повітрянагрівачів: патент на корисну модель 97978 Україна: МПК (2015.01) C21B 9/00; заявл. 10.11.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7. 4 с.

4. Спосіб ступеневого нагріву газів пальника повітряпідігрівника доменної печі : патент на корисну модель 152924 Україна: МПК (2006) C21B 9/00, C21B 9/14, C21B 5/06, C01B 3/36, H01M 8/22; заявл. 04.05.2023; опубл. 03.05.2023, Бюл. № 18. 3 с.

5. Дослідження ефективності використання суміші повітря, димових газів та технологічного кисню в якості окиснювача при опаленні доменних повітрянагрівачів / М. В. Петряков, Л. П. Грес, О. В. Гупало, В. І. Верещак, О. О. Єрьомін, А. С. Григор'єв // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 121-138. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-121-138>

6. Спосіб утилізації теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів доменної печі : патент на корисну модель 156559 Україна: МПК (2024.01) C21B9/00, C21B9/16; заявл. 21.12.2023, Опубл. 10.07.2024. Бюл. № 28. 5 с.

7. Большаков В. И. Состояние и перспективы развития черной металлургии Украины на основе энергосберегающих технологий. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 2. С. 2–5.

References

1. Gubinskii, V. I., Timoshpolskii, V. I., Olshanskii, V. M. et al (2007). *Metallurgicheskie pechi: Teoriia i raschety* (Vol. 1). Belorusskaia nauka

2. Gres, L. P., Karpenko, S. A., Naumenko, O. O., Ivashchenko, V. P., Yeromin, O. O., Karakash, Ye. O., & Gupalo, O. V. (2021). *Povyshenie energoeffektivnosti nagreva domennogo dутья*

3. Patent of Ukraine No. 97978. (2015). *A device for heat recovery of waste flue gases of compower stoves*. State Patent Office of Ukraine, Bulletin No. 7. 4 p.

4. Patent of Ukraine No. 152924. (2023). *Step heating of gases in a blast furnace air heater*. State Patent Office of Ukraine, Bulletin No. 18. 3 p.

5. Petriakov, M. V., Gres, L. P., Gupalo, O.V., Vereshchak, V. I., Yeromin, O. O., & Hryhoriev, A. S. (2023). Study of the efficiency of using a mix of air, flue gases and process oxygen as an oxidizing agent for heating of hot-blast stoves. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 121-138. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-121-138>

6. Patent of Ukraine No. 156559. (2024). *A method for utilizing the heat of*

exhaust flue gases from blast furnace air heaters. State Patent Office of Ukraine, Bulletin No. 28. 5 p.

7. Bolshakov, V. I. (2006). Sostoianie i perspektivy razvitiia chernoii metallurgii Ukrainy na osnove energosberegaiushchikh tekhnologii. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost*, (2), 2–5

L. P. Gres¹, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0002-5343-3438

O. V. Gupalo¹, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0003-3145-9220

V. I. Vereshchak², Director

O. O. Yeromin¹ D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0001-8306-578X

Yu. M. Radchenko¹, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0002-5055-6707

D. V. Vereshchak²

¹ *Ukrainian State University of Science and Technologies*

² *Research and production company "KOSH" LLC*

INCREASING THE HEATING TEMPERATURE OF BLAST-FURNACE AIR BY IMPROVING THE SYSTEM OF HEAT RECOVERY OF FLUE GASES OF HOT-BLAST STOVES

Abstract. Hot-blast stoves heated by blast furnace gas are used to heat blast furnace air. Increasing the combustion temperature of blast furnace gas by raising the temperature of combustion components before hot-blast stoves allows an increase in the heating temperature of blast-furnace air. However, the relatively low temperature of the exhaust flue gases of hot-blast stoves limits the possibility of increasing the heating temperature of combustion components. The research aims to overcome this limitation by equipping the heat recovery system of flue gases with a heat generator heated by blast furnace gas. The flue gases of the heat generator mix up with the flue gases of hot-blast stoves and their temperature increases. The flue gas mixture is then fed to heat exchangers to heat blast furnace gas and air before they burn in the hot-blast stoves. The technical solutions developed by the authors make it possible to increase the heating temperature of combustion components by 140 °C, reach a temperature of blast-furnace air up to 1210-1220 °C and provide coke savings up to 3.1- 4.2 %.

Key words: hot-blast stoves, flue gases, heat recovery, blast-furnace air, coke saving.

For citation: Gres, L. P., Gupalo, O. V., Vereshchak, V. I., Yeromin, O. O., Radchenko, Yu. M., & Vereshchak, D. V. (2024). Increasing the heating temperature of blast-furnace air by improving the system of heat recovery of flue gases of hot-blast stoves. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 16-25. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-16-25>.

Стаття надійшла до редакції збірника 15.09.2024 р.

Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)