

УДК 662.997:669.162.263

Л. П. Грес¹, д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-5343-3438**О. В. Гупало**^{1,*}, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0003-3145-9220**Є. О. Каракаш**¹, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0003-3833-2396**О. О. Єрьомін**¹, д.т.н., проф., ORCID 0000-0001-8306-578X**Є. В. Перетятко**¹, магістр, ORCID 0009-0009-2026-2239¹ *Український державний університет науки і технологій** Автор для листування: o.v.gupalo@ust.edu.ua

ОСОБЛИВОСТІ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ВІДХІДНИХ ДИМОВИХ ГАЗІВ ДОМЕННИХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ

Анотація. З метою досягнення температури дуття вище 1080 °С для опалення повітрянагрівачів зазвичай використовується доменний газ, збагачений природним. Це призводить до значних витрат природного газу. Альтернативою використання природного газу є підігрів компонентів горіння (доменного газу та атмосферного повітря) перед спаленням за рахунок утилізації теплоти відхідних димових газів доменних повітрянагрівачів. Впровадження такої системи утилізації димових газів на ПАТ «Запоріжсталь» у 2004 році дозволило економити близько 30 млн. м³/рік природного газу та досягти температури дуття 1180-1230 °С. Проте, незважаючи на низьку температуру димових газів на вході в теплообмінники 260-280°С, їх термін експлуатації виявився малим (2,3-3,5 років для повітряного та 8,2-8,5 років для газового теплообмінників). Основною причиною низької стійкості теплообмінників виявилася низькотемпературна сірчаноокислотна корозія сталі, з якої виконано трубчатку. Метою даної роботи є визначення впливу зміни початкових параметрів доменного газу і температури підігріву компонентів горіння на показники роботи доменних повітрянагрівачів та удосконалення існуючої системи утилізації теплоти відхідних димових газів ПАТ «Запоріжсталь». Досліджено вплив зміни початкової температури доменного газу на його вологість, теплоту згоряння та калориметричну температуру. Визначено, що підвищення температури газу з 30 до 60 °С призводить до значного зростання його вологості (з 32 до 176 г/м³ та з 34 до 189 г/м³ при повному тиску газу, відповідно, 111,132 та 102,973 кПа), що, у свою чергу, спричиняє зменшення теплоти згоряння доменного газу на 13 % та калориметричної температури на 9 %. Для досягнення температури під куполом повітрянагрівачів 1350°С при підігріві доменного газу до 180 °С необхідна температура повітря горіння взимку складає 120-190 °С, а влітку 150-310 °С. При спаленні доменного газу

Л. П. Грес, О. В. Гупало, Є. О. Каракаш, О. О. Єрьомін, Є. В. Перетятко, 2025

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

утворюються оксиди сірки, які реагуючі з водяною парою, утворюють пари сірчаної кислоти, що містяться в продуктах згоряння. Визначено, що для умов доменних повітрянагрівачів температура точки роси сірчаної кислоти знаходиться в межах 118-130°C. Виявлено, що низький термін експлуатації теплообмінників існуючої системи утилізації теплоти димових газів повітрянагрівачів обумовлено вмістом сірки в сталі труб та кислим середовищем конденсату. Визначено, що існуюча система утилізації теплоти має низку недоліків, серед яких найвагомішим є відсутність заходів з попередження виникнення корозії металевої трубчатки теплообмінників. Запропоновано удосконалену систему утилізації теплоти, що передбачає використання трьох секцій у кожному теплообміннику, вертикальне розміщення труб та потрібну систему забезпечення мінімальної температури димових газів вище температури точки роси парів сірчаної кислоти. Розроблено конструктивні рішення, які забезпечують можливість очищення трубчатки теплообмінників та заміну їх секцій, найбільш вразливих до корозії. Запропонована система дозволяє збільшити міжремонтний термін експлуатації теплообмінників у 2-3 рази, підвищити середню температуру гарячого дуття на 50-60°C та забезпечити зниження собівартості виробництва чавуну.

Ключові слова: утилізація теплоти, теплообмінники, доменні повітрянагрівачі, сірчанокислотна корозія металу.

Посилання для цитування: Особливості утилізації теплоти низькотемпературних відхідних димових газів доменних повітрянагрівачів / Л. П. Грес, О. В. Гупало, Є. О. Каракаш, О. О. Єрьомін, Є. В. Перетяцько // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. 2025. Вип. 39. С. 175-194. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-10>

Вступ. Енергоефективність та собівартість виробництва чавуну в основному визначаються питомими витратами коксу, які залежать від кількості використаних в доменній печі його заміників (наприклад, пиловугільного палива), якості шихтових матеріалів, технології доменної плавки та температури гарячого дуття. Остання визначається ефективністю роботи повітрянагрівачів, терміном їх експлуатації, та режимом спалення палива.

Нагрівання доменного дуття потребує особливого підходу при вирішенні проблем проектування та експлуатації блоку повітрянагрівачів. При цьому необхідно вирішувати питання щодо економії палива, збільшення терміну експлуатації повітрянагрівачів, та зменшення шкідливих викидів у довкілля.

Повітрянагрівачі опалюються доменним газом, теплота згоряння якого мала (3100-3400 кДж/м³) і забезпечує температуру гарячого дуття 1050-1080 °С. Для збільшення температури дуття до 1200-1250 °С зазвичай доменний газ збагачують природним. При цьому для одного блоку повітрянагрівачів необхідно витрачати 27-37 млн. м³/рік природного газу, що негативно впливає на собівартість виробництва

чавуну.

Закордоном, ще у 70 роки минулого століття, почали замінювати збагачення доменного газу природним підігрівом доменного газу і повітря горіння перед спалюванням шляхом утилізації теплоти відхідних газів повітрянагрівачів. Для цього використовують теплообмінники різних конструкцій: рекуперативні; регенеративні; з проміжним теплоносієм; ротаційні; з використанням теплових труб [1-4].

На ПАТ «Запоріжсталь» у 2004 році на одній із доменних печей вперше в Україні було введено в експлуатацію новий блок повітрянагрівачів з системою теплообмінників із гладких труб для нагрівання доменного газу та повітря горіння. Це дозволило забезпечити температуру гарячого дуття 1180-1230 °С і економію біля 30 млн. м³/рік природного газу [5]. Але, незважаючи на низьку температуру димових газів на вході в теплообмінники 260-280 °С, їх термін експлуатації виявився малим (2,3-3,5 років для повітряного теплообмінника та 8,2-8,5 років – для газового), що в довгостроковій перспективі призвело до зменшення середньої температури гарячого дуття.

Дослідження [6] показали, що основною причиною виходу із ладу теплообмінників є наявність низькотемпературної сірчанокислотної корозії металу трубчатки теплообмінників. При цьому міжремонтний період експлуатації газового теплообмінника значно більше повітряного, так як початкова температура доменного газу більше (40-50 °С) і вона практично не змінюється. Температура атмосферного повітря змінюється від -5 °С узимку до +40 °С улітку, що значно впливає на температуру диму на виході з теплообмінників.

Середня температура відхідних димових газів повітрянагрівачів з якою вони надходять до теплообмінників, а також температура відпрацьованих димових газів на виході з теплообмінників малі і відповідно складають 240-280 °С та 110-130 °С. Недоліками утилізації низькопотенційної теплоти відхідних димових газів є необхідність суттєвого збільшення поверхні нагрівання та габаритів теплообмінників, а також низька температура диму на виході з них, що при наявності в димових газах оксидів сірки визиває утворення низькотемпературної сірчанокислотної корозії металу.

Метою роботи є визначення впливу зміни початкових параметрів доменного газу і температури підігріву компонентів спалення на показники роботи доменних повітрянагрівачів та удосконалення їх системи утилізації теплоти відхідних димових газів.

Методика досліджень. Для виконання розрахунків спалення доменного газу, визначення калориметричної температури горіння палива, температур підігріву компонентів горіння, які забезпечують

досягнення заданої температури нагріву дуття без збагачення доменного газу природним при опаленні повітронагрівачів використовувалися методики розрахунків, наведені в роботах [7, 8]. В якості вихідних даних приймали реальні значення параметрів експлуатації доменної печі та її повітронагрівачів ПАТ «Запоріжсталь».

Результати дослідження. Досліджено вплив зміни початкових параметрів доменного газу на його вологість. Прийнято, що діапазон зміни: температур доменного газу 30-60 °С, тиску доменного газу – 4,903-9,807 кПа. При цьому максимальний і мінімальний атмосферний тиск прийнято, відповідно, 101,325 та 98,070 кПа. Таким чином, розглянуто два варіанти:

- 1) атмосферний тиск 101,325 кПа, а надлишковий тиск доменного газу 9,807 кПа;
- 2) атмосферний тиск 98,070 кПа, а надлишковий тиск доменного газу 4,903 кПа.

Результати розрахунку наведено на рис. 1, з якого видно, що для варіанта 1 збільшення початкової температури доменного газу з 30 до 60 °С призводить до підвищення його вологості з 32 до 176 г/м³, а для варіанта 2 – з 34 до 189 г/м³. При зменшенні повного тиску доменного газу з 111,132 до 102,973 кПа, його вологість збільшується з 32 до 34 г/м³ при початковій температурі доменного газу 30 °С та з 176 до 189 г/м³ при температурі 60 °С. При цьому, якщо не враховувати зміну повного тиску доменного газу, то відносна похибка розрахунків відповідно складе 6,3 та 7,4 %.

Наявність вологи в доменному газі знижує його теплоту згоряння за рахунок зменшення вмісту горючих компонентів палива. Виконано аналіз впливу початкової температури доменного газу на теплоту згоряння вологого доменного газу та калориметричну температуру. Приймали наступний об'ємний склад сухого доменного газу: CO₂ – 17,7 %; CO – 22,4 %; H₂ – 6,3 %, N₂ – 53,6 %.

Залежність теплоти згоряння вологого доменного газу від його вологості наведено на рис. 2. З рисунку видно, що зміна вологості газу з 33 до 183 г/м³ призводить до зменшення теплоти згоряння на 13,4 % (з 3406 до 2949 кДж/м³).

Виконано чисельні дослідження впливу вологості доменного газу на калориметричну температуру для теплоти згоряння 2878 та 4545 кДж/м³ без нагрівання і з нагріванням компонентів згоряння до 170 °С (рис. 3). Визначено, що для доменного газу з теплою згоряння 2878 кДж/м³ зміна вологості газу з 33 до 183 г/м³ призводить до зменшення калориметричної температури горіння з 1166 до 1064 °С (на 8,7 %) коли компоненти згоряння не підігріваються, та з 1286 до 1167 °С (на 9,3 %), коли компоненти згоряння нагріваються до 170 °С. При теплоті

згоряння доменного газу 4545 кДж/м^3 аналогічна зміна вологості доменного газу призводить до зміни калориметричної температури: з 1479 до 1364°C (на $7,8\%$), коли підігрів компонентів спалення відсутній, та з 1598 до 1468°C ($8,1\%$).

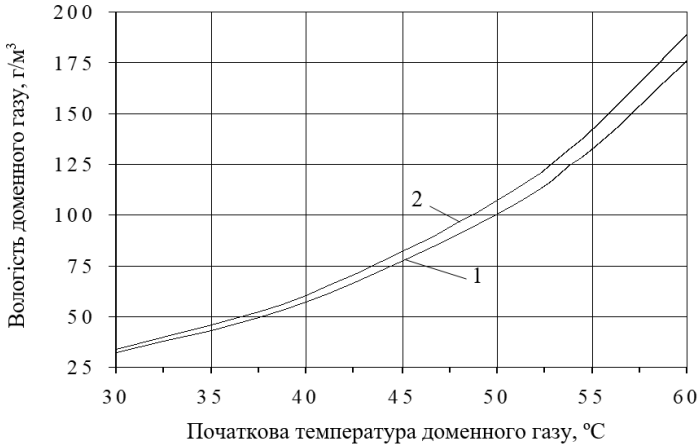


Рисунок 1 – Залежність вологості доменного газу від його початкової температури. Варіанти: 1 – атмосферний тиск $101,325 \text{ кПа}$, надлишковий тиск доменного газу $9,807 \text{ кПа}$; 2 – атмосферний тиск $98,070 \text{ Па}$, надлишковий тиск доменного газу $4,903 \text{ кПа}$.

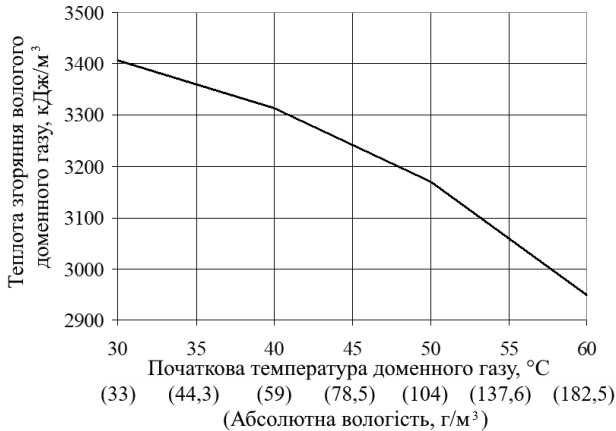


Рисунок 2 – Залежність теплоти згоряння вологого доменного газу від його початкової температури.

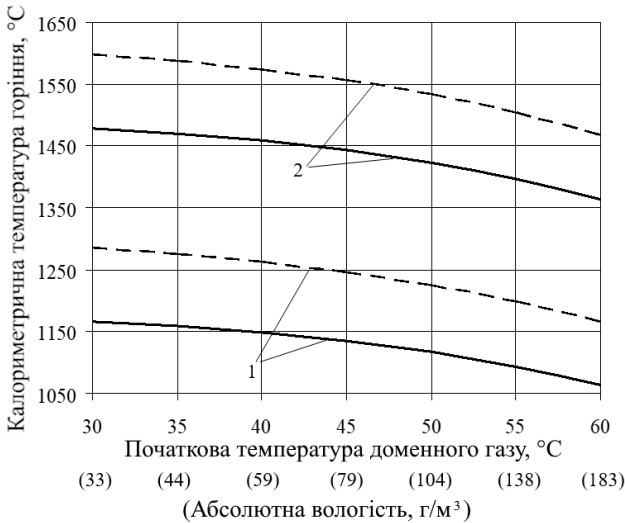


Рисунок 3— Залежність калориметричної температури горіння від вологості доменного газу. Цифрами біля кривих позначено теплоту згоряння сухого доменного газу: 1- 2878 кДж/м³; 2- 4545 кДж/м³. Суцільні лінії- підігрів компонентів горіння відсутній, пунктирні- підігрів газу і повітря до 170 °С.

Проаналізовано вплив температур нагрівання компонентів спалення на їх початкові параметри для зимового та літнього періодів. Визначено, що при нагріванні доменного газу до 180 °С для досягнення температури під куполом повітрянагрівачів 1350 °С і спаленні доменного газу з теплою згоряння 3541 кДж/м³ необхідна температура повітря спалення залежить від початкових параметрів компонентів спалення і складає: взимку 120-190 °С при температурі доменного газу 36-45 °С; улітку 150-310 °С при температурі газу 38-53 °С.

Розглянуто механізми утворення сірковмісних сполук у процесі доменної плавки та оксидів сірки при спалюванні доменного газу в повітрянагрівачах. Концентрація оксидів сірки, що утворюються при спаленні палива, в основному, залежить від вмісту в ньому сірковмісних сполук. Основними джерелами сірки, яка потрапляє в доменну піч з шихтовими матеріалами, є кокс і агломерат [9]. В агломераті сірка знаходиться в твердому стані у вигляді CaS, а в коксі – у вільному стані, в сполуках з вуглецевою масою, а в золі – у вигляді сульфідів та сульфатів [10].

В балансі сірки доменної плавки приймають питому масу сірки у

колошниковому газі 0,04 кг/т чавуну [5]. Вміст сірки в колошниковому пилю 0,501 % (мас.), вихід сірки з колошниковим пилю 0,21 кг/т чавуну. В цьому балансі приймаються коефіцієнт переходу сірки в колошниковий газ 9,9 % (мас.) [11]. Доля сірки, що виноситься із доменної печі з колошниковим газом, відношення маси сірки, яка перейшла в газ, до маси сірки, що вноситься в доменну піч з шихтовими матеріалами, складає 7,765 – 15,135 % (мас.).

При спаленні доменного газу утворюються оксиди сірки, концентрація яких практично не залежить від параметрів згоряння, а визначається вмістом сполук сірки. При високих температурах продукти згоряння, в основному, містять SO_2 , так як при збільшенні температури згоряння зменшується константа рівноваги. В реальних умовах для бідного факелу концентрація SO_3 складає 1,5-2,5 % від концентрації SO_2 [12].

Для розрахунку концентрації SO_2 зазвичай приймають, що коли вся сірка, яка міститься в паливі, перетвориться в SO_2 , то її вміст складає 20 г на 1 % сірки в паливі. Температура точки роси сірчаної кислоти залежить не лише від парціального тиску SO_3 , а і від парціального тиску водяної пари. Присутність в димових газах навіть незначної кількості пари H_2SO_4 різко підвищує температуру точки роси димових газів. Наприклад вміст пари сірчаної кислоти 0,01 % при парціальному тиску 10000-15000 Па призводить до збільшення температури точки роси з 45 до 185 °C [13].

Температура точки роси водяної пари в димових газах ($t_p^{\text{H}_2\text{O}}$) розраховували за рівнянням Антуана [14], в якому тиск насиченої водяної пари (P_s) приймають рівним її парціальному тиску у відхідних димових газах:

$$\begin{aligned} t_p^{\text{H}_2\text{O}} &= T_p - 273,15 = B / (A - \ln P_s) - C - 273,15 = \\ &= B / (A - \ln P_{\pi}) - C - 273,15, \end{aligned} \quad (1)$$

де P_{π} – парціальний тиск водяної пари в димових газах (Па), який визначається за формулою:

$$P_{\pi} = 0,01 \cdot P_{\text{абс}} \cdot \% \text{H}_2\text{O} , \quad (1.9)$$

де $P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{дим}}$ – абсолютний тиск димових газів, Па; $P_{\text{атм}}$ та $P_{\text{дим}}$ – атмосферний та надлишковий тиск димових газів, Па; $\% \text{H}_2\text{O}$ – вміст водяної пари в димових газах, % (об.).

Під час розрахунків вмісту водяної пари в димових газах визначено з використанням результатів розрахунку згоряння газу, а концентрацію оксиду сірки – експериментально. Значення парціального тиску SO_2

визначено враховуючи теоретично можливі умови переходу в SO_3 всієї сірки палива – 1-5 % [15-17].

Результати розрахунків наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Температури точки роси сірчаної кислоти в димових газах.

Параметри	Значення параметрів				
Тиск димових газів, кПа	99,692				
Концентрація SO_2 , мг/м ³ (ppm)	1475 (720)				
Об'ємний відсоток SO_2 , %	0,072				
Відсоток перетворення (переходу) сірки палива в SO_3 , %	1	2	3	4	5
Концентрація SO_3 , мг/м ³	14,9	30,1	45,6	61,5	77,6
Об'ємний відсоток SO_3 , %	0,00073	0,00146	0,00223	0,003	0,0038
Парціальний тиск SO_3 , Па	0,73	1,45	2,22	2,99	3,78
Температура точки роси сірчаної кислоти при парціальному тиску водяної пари в димових газах					
10,0 кПа	118,3	122,2	124,4	125,7	126,7
20,0 кПа	122,3	125,6	127,4	129,1	130,2

Показано, що температура точки роси димових газів складає 118 – 127 та 122 – 130 °С відповідно до парціального тиску водяної пари 10,0 та 20,0 кПа.

Температуру точки роси також визначено з графічної залежності, наведеної в [18]: температура точки роси для парціального тиску водяної пари 10,0 кПа складає 118-129 °С, а для парціального тиску водяної пари 20,0 кПа – 122-133 °С. Отримані значення мало відрізняються від розрахункових даних, наведених в табл. 1.

Дослідження причин швидкого виходу із ладу теплообмінників доменної печі ПАТ «Запоріжсталь» підтвердили, що причиною руйнування металевої трубчатки теплообмінника є низькотемпературна сірчаноокислотна корозія, що підтверджується наступними фактами:

1) вміст сірки в сталі 10кп (з якої виконано трубчатку теплообмінників) наприкінці служби складає 1,39 %;

2) відкладення на поверхні труб, що омиваються димовими газами, містить 13,48 % сірки;

3) конденсат димових газів має кисле середовище ($\text{pH} = 2,28$) і містить значну кількість розчиненого сульфату (2111,3 мг/дм³).

Використовуючи довгостроковий досвід експлуатації комплексу «повітрянагрівачі – теплообмінники», з'ясовано основні недоліки в конструкції і експлуатації існуючої системи утилізації теплоти відхідних димових газів на ПАТ «Запоріжсталь» (рис. 4).

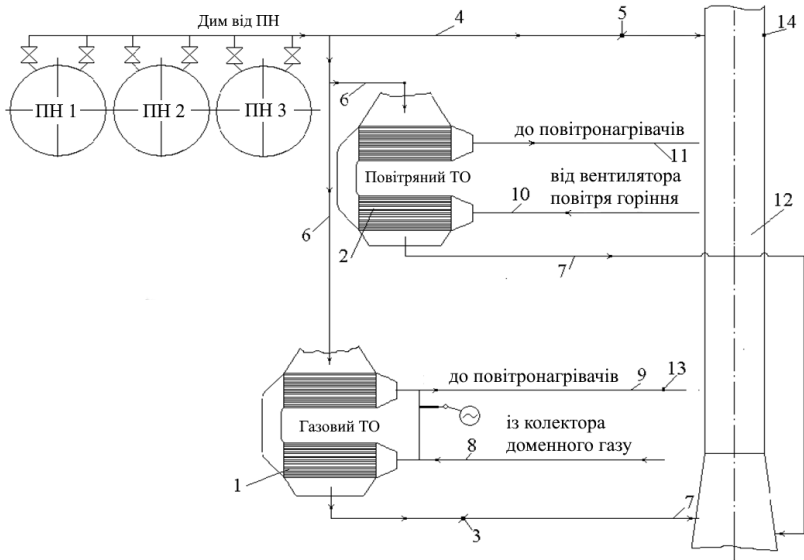


Рисунок 4 – Система утилізації тепла димових газів блоку повітрянагрівачів доменної печі: 1- теплообмінник підігріву доменного газу; 2- теплообмінник підігріву повітря горіння; 3- пристрій регулювання витрати димових газів через газовий теплообмінник; 4- байпасний трубопровід димових газів; 5- пристрій регулювання витрати димових газів через байпасний трубопровід; 6- трубопровід підведення гарячих димових газів на повітряний і газовий теплообмінники; 7- трубопроводи відведення відпрацьованих димових газів після повітряного і газового теплообмінників; 8- трубопровід підведення холодного доменного газу на газовий теплообмінник; 9- трубопровід відведення нагрітого доменного газу після газового теплообмінника; 10- трубопровід підведення холодного повітря горіння на повітряний теплообмінник; 11- трубопровід відведення нагрітого повітря горіння після повітряного теплообмінника; 12- димова труба; 13- датчик температури димових газів після теплообмінника підігріву доменного газу; 14- датчик температури димових газів у димовій трубі.

Система утилізації складається із двох теплообмінників: газового (1) та повітряного (2), які однакові за конструкцією, але мають різні габарити, так як в них нагріваються різні витрати доменного газу і повітря спалення. Ці теплообмінники одноходові по димовим газам, та двухходові – по повітрю. Кожній теплообмінник являє собою гладкотрубний рекуператор зі зовнішнім діаметром труб 40 мм із Ст 10кп та перехресно-протитечійною схемою руху. Також до системи утилізації теплоти входять: трубопроводи для подачі та відведення гарячих та відпрацьованих димових газів, холодного повітря і

доменного газу та нагрітого повітря і газу; байпасний трубопровід (4) з дросельним клапаном (5) для регулювання витрат димових газів в системі; димар (12); системи регулювання витрат димових газів через газовий теплообмінник (3), температур диму на виході із теплообмінника (13) та у димовій труби (14).

Доменний газ і повітря рухаються в середині труб теплообмінників, а димові гази – омивають ці труби ззовні. Теплопередача від димових газів до холодних теплоносіїв здійснюється: від димових газів до стінки труби – випромінюванням та конвекцією, через стінку труби – теплопровідністю; від внутрішньої поверхні стінки труби до доменного газу – випромінюванням та конвекцією, а від внутрішньої поверхні стінки труби до повітря – конвекцією.

Існуюча система утилізації теплоти має наступні конструктивні та технологічні недоліки, які тісно пов'язані між собою.

1) при проектуванні теплообмінників не передбачено ніяких заходів щодо блокування процесу низькотемпературної сірчаноокислотної корозії металевої частини теплообмінників через те, що вважалося, що кількість оксидів сірки в димових газах незначна і їх наявність не вплине на стійкість трубчатки. Дійсно, питома концентрація цих оксидів відносно мала і складає 160-230 мг/м³, але треба враховувати, що в системі повітрянагрівачі – теплообмінники циркулює 180-220 тис. м³/г димових газів, які протягом року вносять в цю систему 10-14 т оксидів сірки. Така кількість оксидів сірки негативно впливає не лише на стійкість теплообмінників, а і на екологічний стан промислової зони;

2) не вжито заходів щодо забезпечення мінімально допустимих значень температури відпрацьованих димових газів теплообмінників. Ця температура повинна підтримуватися на 10-15 °С більше, ніж температура точки роси сірчаної кислоти;

3) кожен теплообмінник складається з двох зон, і гарячі димові гази входять у верхню зону, омивають зовнішню поверхню труб двох зон, нагріваючи повітря (доменний газ). Димові гази, потрапляючи в теплообмінник, швидко втрачають свій температурний потенціал, так як різниця температур між димом на вході і виході з теплообмінника незначна (120-150°C). При цьому температура відпрацьованих димових газів може зменшуватися до значень менших 100 °С, що за даними експлуатації системи мало місце узимку.

4) відсутня система підтримки і регулювання мінімально допустимої температури відпрацьованих димових газів теплообмінників;

5) теплообмінники не ремонтпридатні. При виході із ладу верхньої частини секції необхідно замінювати весь теплообмінник;

6) тепловий режим системи повітрянагрівачів та теплообмінників

пов'язані між собою, але ці закономірності не враховуються, і на доменній печі відсутня загальна для повітрянагрівачів і теплообмінників режимна карта. Її розроблено лише для блоку повітрянагрівачів.

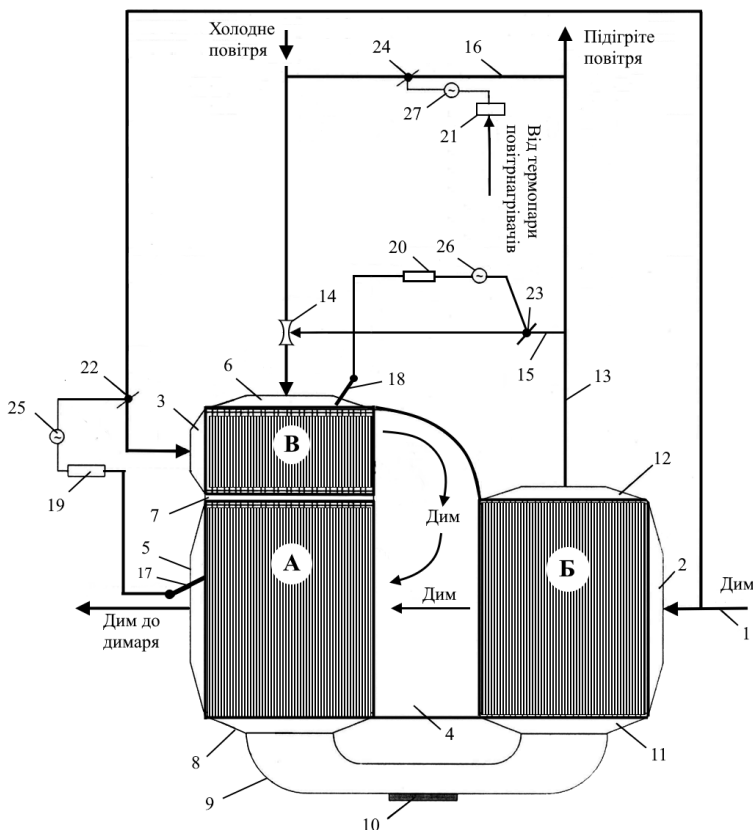
Співробітниками кафедри екології, теплотехніки та охорони праці Українського державного університету науки і технологій, сумісно з співробітниками фірми ТОВ-НВФ «КОШ» та Інституту чорної металургії НАН України розроблено удосконалену систему утилізації теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів з нагріванням доменного газу і повітря спалення [19]. Ця система (рис. 5) складається з наступних вузлів:

- двох теплообмінників однакової конструкції для нагрівання доменного газу та повітря спалення, кожен з яких обладнано двома основними секціями А та Б та додатковою секцією В. Так як ці теплообмінники однакові за конструкцією, то, в якості прикладу, далі розглянемо теплообмінник для нагрівання одного з двох компонентів спалення (доменного газу або повітря);
- системи трубопроводів для підведення та відведення гарячих та відпрацьованих димових газів, холодних та нагрітих доменного газу і повітря спалення;
- димової змішувальної камери, розташованої між секціями теплообмінників А та Б;
- спеціального люку для прибирання відкладень з поверхні труб;
- системи автоматичного регулювання мінімально допустимих температур теплообмінників, початкових температур компонентів спалення та температур під куполом повітрянагрівачів.

Конструкція та тепловий режим запропонованої системи теплообмінників (рис. 5) відрізняється від існуючої системи (рис. 4) наступним:

1) в кожному теплообміннику використовується не дві, а три секції (А, Б та В). Секції А та Б розміщено паралельно на деякій відстані одна від одної, утворюючи змішувальну камеру. Додаткова секція В розташована над секцією А.

2) В кожній секції використано не горизонтальне, а вертикальне розміщення труб, яке має наступні переваги: довжина труб газового та повітряного теплообмінників відповідно складає 4,2 та 3,5 м, тому при горизонтальному їх розміщенні для ліквідації перегину труб необхідно додатково використовувати трубні дошки. При вертикальному розміщенні труб зменшується можливість утримання на їх поверхні пилу та продуктів корозії металу та виникає можливість часткової чистки поверхні труб;



186

3) Підведення гарячих димових газів здійснюється не через одну, а через дві секції (Б та В), що збільшує не лише середні температури димових газів цих секцій, а й температуру відпрацьованих димових газів теплообмінників;

4) Використовується потрібна система забезпечення та регулювання мінімально допустимої температури відпрацьованих димових газів теплообмінників:

Перша- підвід гарячого диму до двох секцій (Б і В) та використання суміші цих газів з підвищеною температурою секції А, що дозволяє збільшити температуру димових газів в кожній секції та на виході з теплообмінників;

Друга- можливість збільшення температури відпрацьованих димових газів теплообмінників за рахунок підвищення витрат гарячих димових газів секції В;

Третя- при екстрених випадках, наприклад, в зимовий період, коли температура атмосферного повітря знижується нижче 0 °С, використовується автоматична система підвищення початкової температури повітря до 30-40 °С на вході в секцію В за рахунок незначного збільшення витрати нагрітого повітря.

Таким чином ця потрібна система гарантує забезпечення необхідних мінімальних допустимих температур відпрацьованих димових газів теплообмінників та їх довгострокову експлуатацію;

5) Задана температура під куполом повітрянагрівачів стабілізується не за рахунок зміни витрат компонентів спалення, а зміною їх температур, що дозволяє підтримувати більш сталий тепловий режим теплообмінників;

6) Для забезпечення ремонтпридатності системи теплообмінників додаткову секцію В виконують знімною, що забезпечує швидкий її демонтаж та монтаж в період капітального ремонту теплообмінників. При цьому існує можливість заміни однієї секції, а не всього теплообмінника;

7) В системі теплообмінників передбачена можливість часткової чистки поверхні труб, уловлення пилу та прибирання бруду через спеціальний люк.

Використовуючи технологічні дані експлуатації комплексу доменна піч – повітрянагрівачі – теплообмінники існує можливість розробки режимної карти експлуатації системи повітрянагрівачі-теплообмінники, яка забезпечить необхідну стабільну температуру дуття та довгостроковий термін експлуатації теплообмінників.

Принцип експлуатації запропонованої системи утилізації теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів з нагріванням компонентів згоряння наступний. Відхідні димові гази з температурою 230-280 °С із

димового лежача 1 блока повітрянагрівачів надходять на вхід диму 2 основної секції Б та вхід диму 3 додаткової секції В, проходять через секції Б і В між труб, розташованих в цих секціях, та виходять у димову змішувальну камеру 4, де змішуються. Із змішувальної камери 4 димові гази надходять в основну секцію А, проходять між труб, розташованих в цій секції, та через вихід диму 5 із секції А направляються в димар. До додаткового змішувача 14 подається холодний компонент спалення та частка нагрітого компонента спалення, що надходить до змішувача по додатковому трубопроводу 15, який з'єднує основний трубопровід 13 нагрітого компонента спалення з додатковим змішувачем 14. Далі суміш холодного та нагрітого компонентів спалення, що утворюється в змішувачі 14, надходить до входу компонента спалення 6 у додаткову секцію В. Задане значення температури компонента спалення на вході 6 додаткової секції В контролюється за допомогою термопари 18, процесора 20, виконуючого механізму 26 та дросельного клапана 23. Компонент спалення, що надходить на вхід 6 додаткової секції В, де розподіляється по трубах секції В, рухається всередині труб в напрямку камери 7, яка з'єднує додаткову секцію В з основною секцією А. Камера 7 є герметично ізолюваною від потрапляння в неї димових газів. Компонент спалення з камери 7 надходить до труб основної секції А, і за допомогою трубопроводу 9, що з'єднує вихід компонента спалення 8 основної секції А та вхід компонента спалення 11 основної секції Б, надходить до труб основної секції Б. Далі компонент спалення рухається всередині труб основної секції Б і через вихід 12 основної секції Б надходить до основного трубопроводу нагрітого компонента спалення 13, з'єданого з пальниками повітрянагрівачів доменної печі (які на рис. 5 не наведено). Температура стінки труб в небезпечній зоні додаткової секції В контролюється термопарою 17, пов'язаною з процесором 19. Останній за допомогою виконуючого механізму 25 та дросельного клапана 22 підтримує температуру стінки труб додаткової секції В вище температури точки роси сірчаної кислоти (110-140 °С), змінюючи кількість диму на вході у додаткову секцію В. Температуру димових газів, що утворюються після спалення в повітрянагрівачах доменної печі, стабілізують за допомогою змішування холодних компонентів спалення з нагрітими компонентами спалення. При зміні температури димових газів, що утворюються при опаленні доменних повітрянагрівачів, в межах 20 °С за допомогою термопар повітрянагрівачів (на рис. 5 не показано), процесора 21 та виконуючого механізму 27 змінюється ступінь відкриття дросельного клапана 24, встановленого на трубопроводі 16, що з'єднує вхід холодного компонента спалення з основним трубопроводом нагрітого компонента спалення 13. Дросельний клапан 24 змінює кількість холодного

компонента спалення, який додається до нагрітого компонента спалення, що йде по основному трубопроводу нагрітого компонента спалення 13.

Розроблена та запатентована система утилізації теплоти відхідних димових газів дозволяє в 2-3 рази збільшити міжремонтний термін експлуатації теплообмінників, що забезпечить подовження часу роботи повітрянагрівачів з використанням нагрітих компонентів горіння (палива і повітря), що, в свою чергу, спричинить підвищення середніх за термін експлуатації повітрянагрівачів температури димових газів, які утворюються при спалюванні палива в пальниках повітрянагрівачів, та температури нагріву доменного дуття на 50-60 °С, збільшення якої забезпечить зменшення собівартості виробництва чавуну.

Висновки

1. Однією із особливостей використання теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів в системі нагрівання компонентів спалення є незначні початкові та кінцеві температури цих газів: відповідно 240-280 °С та 110-130 °С. При цьому витрати димових газів на один блок повітрянагрівачів складають 180-220 тис. м³/год і їх теплоту зазвичай не використовують, що призводить до викиду у довкілля 17-24 МВт теплової енергії.

2. Недоліком утилізації теплоти низькотемпературних відхідних димових газів є необхідність збільшення поверхні нагрівання та габаритів теплообмінників. Можливість зниження температури диму, що відходить, до 100 °С (а інколи і нижче) при наявності в їх складі оксидів сірки призводить до утворення низькотемпературної сірчаноокислотної корозії металу теплообмінників.

3. Досліджено вплив зміни початкових параметрів доменного газу (температура та тиск) на його вологість, теплоту згоряння та калориметричну температуру. Визначено, що збільшення початкової температури доменного газу з 30 до 60 °С при його загальному тиску 111,132 кПа призводить до зростання вологості доменного газу з 32 до 176 г/м³, а при тиску 102,973 кПа – з 34 до 189 г/м³. Під час виконання розрахунків нехтування зміною повного тиску газу призводить до утворення відносної похибки визначення вологості газу 6,3-7,4 %.

Зміна вологості заданого складу доменного газу з 33 до 183 г/м³ призводить до зменшення його теплоти згоряння на 13,4 % (з 3406 до 2949 кДж/м³ та калориметричної температури на 8,8 % (з 1166 до 1064 °С) коли компоненти згоряння не підігріваються, або на 9,3% (з 1286 до 1167 °С) – коли вони нагріваються до 170 °С.

Розрахунок необхідних температур нагрівання компонентів спалювання (доменного газу та атмосферного повітря) для літнього та

зимового періодів показав, що при нагрівання доменного газу до 180 °С для досягнення температури під куполом повітрянагрівачів 1350 °С і спаленні доменного газу з теплотою згоряння 3541 кДж/м³ необхідна температура повітря згоряння складає: узимку 120-190 °С при температурі доменного газу 36-45 °С, а влітку – 150-310 °С при температурі газу 38-53 °С.

4. Концентрація оксидів сірки, що утворюються при спалюванні доменного газу здебільшого залежить від вмісту в ньому сірковмісних сполук. Основним джерелом сірки, яка потрапляє в доменну піч з шихтовими матеріалами, є кокс і агломерат. Вміст сірки в колошниковому пилу складає 0,501 %(мас.), а питомий його вихід – 0,21 кг/т чавуну. Частка сірки, що виноситься з доменної печі колошниковим газом, складає 7,765-15,135 %(мас.).

5. При спаленні доменного газу утворюються оксиди сірки, концентрація яких практично не залежить від параметрів згоряння, а визначається вмістом сполук сірки. Димові гази, в основному, містять SO₂, концентрація SO₃ складає 1,5-2,5 % від концентрації SO₂.

6. Для умов доменних повітрянагрівачів розраховано температуру точки роси сірчаної кислоти в залежності від парціального тиску водяної пари. Визначено, що ця температура складає 118-127 °С (для тиску водяної пари 10 кПа) та 122-130 °С (для тиску 20 кПа).

7. Визначено причини низького терміну експлуатації теплообмінників ПАТ «Запоріжсталь», основною з яких є наявність низькотемпературної сірчано-кислотної корозії металевої трубчатки, що підтверджується наступними факторами: вміст сірки в трубах теплообмінника із Ст 10кп наприкінці їх служби складає 1,39 %; відкладення на поверхні труб (продукти корозії) містять 13,48 % сірки; конденсат димових газів має кисле середовище (pH = 2,28).

8. Існуюча система утилізації теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів ПАТ «Запоріжсталь» має наступні недоліки: відсутні будь-які заходи щодо блокування процесу низькотемпературної сірчано-кислотної корозії та забезпечення мінімально допустимої температури відпрацьованих димових газів теплообмінників; відсутня ремонтпридатність системи теплообмінників.

Запропоновано удосконалену систему утилізації теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів вільну від зазначених недоліків, яка дозволяє збільшити в 2-3 рази міжремонтний період експлуатації теплообмінників, що забезпечить подовження часу роботи повітрянагрівачів з використанням нагрітих компонентів спалення, спричинить підвищення середніх за термін експлуатації повітрянагрівачів температури гарячого дуття на 50-60 °С та зниження собівартості виробництва чавуну.

Перелік посилань

1. Мазур В.Л. Металургія України: стан, конкурентоспроможність, перспективи. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. № 2. С. 12-16.
2. Ямада А. Использование тепла отходящих газов воздухонагревателей доменной печи в Хорохате. *Тэцу то хаганэ*. 1970. Т. 65. № 4. С. 35.
3. Кадзикова С., Ониси Д. Утилизация тепла отходящих газов доменных воздухонагревателей с использованием тепловых труб. *Се энергиш*. 1982. Т. 10. № 4. С. 69-73.
4. Ямасита Я., Ямакаго К. Теплообменники с тепловыми трубами. *Мицубиси дэнки гихо*. 1982. Т. 2. № 11. С. 27-29.
5. Система утилизации теплоты отходящих дымовых газов воздухонагревателей доменных печей в проектах ГП Укрспроммет / С. А. Карпенко, С. Л. Стасевский, А. Н. Степаненко и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 1. С. 103-104.
6. Повышение срока службы системы утилизации теплоты отходящих дымовых газов блока доменных воздухонагревателей / Л. П. Грес, А. Е. Миленина, С. А. Карпенко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2011. № 2. С. 14-16.
7. Патент 98741, Україна, С28В 9/00. Пристрій для утилізації тепла відхідних димових газів блоку доменних повітрянагрівачів / Л. П. Грес, С. А. Карпенко, О. О. Науменко, О. О. Єрьомін та інші. Заяв. 16.05.2011, опубл. 11.06.2012, Бюл. № 11.
8. Устранение низкотемпературной кислотной коррозии в системе утилизации теплоты блока доменных воздухонагревателей / Л. П. Грес, С. А. Карпенко, А. А. Науменко, А. О. Еремін // *Материалы XVI Международной конференции «Теплотехника и теплоэнергетика в металлургии»*, Днепропетровск, Украина, 04-06.10.2011. Днепропетровск : НМетАУ, с. 59-60.
9. Шатоха В. И. *Охрана окружающей среды в доменном производстве: конспект лекций*. Днепропетровск : Пороги, 1996. 86 с.
10. Готлиб А. Д. Доменный процесс. М. : Металлургия, 1966. 505 с.
11. Остроухов М. Я., Шпарбер Л. Я. Справочник мастера-доменщика. М. : Металлургия, 1977. 304 с.
12. Кондирал А. С., Котов В. И., Кацман В. Х., Бондаренко П. К. Удаление серы с колошниковыми газами при современной технологии доменной плавки. *Бюл. ин-та Черметинформация*. 1979. № 20. С. 38-40.
13. Бенедиктов А. В., Петерс Н. Н., Сердаков Г. С. Измерение температуры точки росы дымовых газов. *Промышленная энергетика*. 1991. № 9. С. 19-20
14. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие. Л. : Химия, 1982. 592 с.
15. Резников М. И., Липов Ю. М. *Паровые котлы тепловых электростанций*. М. : Энергоиздат, 1981. 240 с.
16. Клячко Б. И. Коррозия и загрязнение поверхностей нагрева паровых котлов при сжигании сернистых мазутов. Низкотемпературная коррозия.

Энергетика за рубежом, БТИ ОРГРЭС, 1962. № 7. С. 5-7.

17. Щукин А. А. *Экономия топлива в черной металлургии*. М. : Металлургия, 1973. 272 с.

18. Магадеев В. III. *Коррозия газового тракта котельных установок*. М. : Энергоатомиздат, 1986. 272 с.

19. Патент на корисну модель № 158030 Україна. *Пристрій для утилізації теплоти відхідних димових газів доменних повітрянагрівачів* / Верещак В. І., Верещак Д. В., Грес Л. П., Гупало О. В., Каракаш Є. О., Чайка О. Л. // Заявл. 21.12.2023; Опубл. 25.12.2024, Бюл. № 52.

References

1. Mazur, V. L. (2010). Metalurhiia Ukrainy: stan, konkurentospromozhnist, perspektyvy. *Metalurhiia i hirnychorudna promyslovist*, (2), 12-16.

2. Iamada, A. (1970). Ispolzovanie tepla otkhodiashchikh gazov vozdukhonagrevatelei domЕННОй pechi v Khorokhate. *Tetcu to khagane*, 65(4), 35.

3. Kadzikova, S., & Onisi, D. (1982). Utilizatsiia tepla otkhodiashchikh gazov domennykh vozdukhonagrevatelei s ispolzovaniem teplovykh trub. *Se energii*, 10(4), 69-73

4. Iamasita, Ia., & Iamakago, K. (1982). Teploobmenniki s teplovymi trubami. *Mitcubisi denki gikho*, 2(11), 27-29

5. Karpenko, S. A., Stasevskii, S. L., Stepanenko, A. N., et al. (2012). Sistema uutilizatsii teploty otkhodiashchikh dymovykh gazov vozdukhonagrevatelei domennykh pechei v proektakh GP Ukrqiprommez. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaiia promyshlennost*, (1), 103-104

6. Gres, L. P., Milenina, A. E., & Karpenko, S. A. (2011). Povyshenie sroka sluzhby sistemy uutilizatsii teploty otkhodiashchikh dymovykh gazov bloka domennykh vozdukhonagrevatelei. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaiia promyshlennost*, (2), 14-16

7. Patent 98741, Україна. (2012). *Pristrii dlia uutilizatsii tepla vidkhidnykh dimovykh gaziv bloku domennykh povitronagrivachiv*. Biul. (11)

8. Gres, L. P., Karpenko, S. A., Naumenko, A. A., & Eremin, A. O. (2011). Ustranenie nizkotemperaturnoi kislotnoi korrozii v sisteme uutilizatsii teploty bloka domennykh vozdukhonagrevatelei. *Materialy XVI Mezhdunarodnoi konferentsii «Teplotekhnika i teploenergetika v metallurgii»*, Dnepropetrovsk, Ukraina, 04-06.10.2011. p. 59-60

9. Shatokha, V. I. (1996). *Okhrana okruzhaiushchei sredy v domennom proizvodstve*. Porogi

10. Gotlib, A. D. (1966). *Domennyi protsess*. Metallurgiiia

11. Ostroukhov, M. Ia., & Shparber, L. Ia. (1977) *Spravochnik mastera-domenshchika*. Metallurgiiia

12. Kondiral, A. S., Kotov, V. I., Katsman, V. Kh., & Bondarenko, P. K. (1979). Uдалenie sery s kolosnikovymi gazami pri sovremennoi tekhnologii domЕННОй plavki. *Biul. in-ta Chermetinformatsiia*, (20), 38-40

13. Benediktov, A. V., Peters, N. N., & Serdakov, G. S. (1991). Izmerenie temperatury tochki rosy dymovykh gazov. *Promyshlennaiia energetika*, (9), 19-20

14. Rid, R., Prausnitc, Dzh., & Shervud, T. (1982). *Svoistva gazov i zhidkostei*. Khimiia

15. Reznikov, M. I., & Lipov, Iu. M. (1981). *Parovye kotly teplovykh elektrostancii*. Energoizdat
16. Kliachko, B. I. (1962). Korroziia i zagriaznenie poverkhnosti nagreva parovykh kotlov pri szhigani sernistykh mazutov. *Nizkotemperaturnaia korroziia. Energetika za rubezhom*, BTI ORGRES, (7), 5-7
17. Shchukin, A. A. (1973). *Ekonomiia topliva v chernoi metallurgii*. Metallurgii
18. Magadeev, V. Sh. (1986). *Korroziia gazovogo trakta kotelnykh ustanovok*. Energoatomizdat
19. Patent na korysnu model 158030 Ukraina. (2024). *Prystarii dlia uylizatsii teploty vidkhidnykh dymovykh haziv domennykh povitronahrivachiv*, Biul. (52)

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

O. V. Gupalo^{1,*}, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0003-3145-9220

Ye. O. Karakash¹, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0003-3833-2396

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

Ye. V. Peretiatio¹, Master's degree, ORCID 0009-0009-2026-2239

¹ *Ukrainian State University of Science and Technologies*

* *Corresponding author: o.v.gupalo@ust.edu.ua*

FEATURES OF HEAT RECOVERY OF LOW-TEMPERATURE FLUE GAS FROM BLAST FURNACE STOVES

Abstract. The aim of achieving the air-blast temperature exceeding 1080 °C for heating hot-blast stoves typically involves the use of blast furnace gas (BFG) enriched with natural gas. This practice leads to significant natural gas consumption. An effective alternative to using natural gas is to preheat the combustion components (BFG and atmospheric air) by utilising the heat of the waste flue gases of the hot-blast stoves. The implementation of such a flue gas heat recovery system at PJSC "Zaporizhstal" in 2004 enabled savings of approximately 30 million m³/year of natural gas and allowed the air-blast temperature to reach 1180-1230°. However, despite the low temperature of the flue gases at the heat exchanger inlet (260-280°C), their service life proved to be short (2.3-3.5 years for the air heat exchanger and 8.2-8.5 years for the gas heat exchanger). The primary cause of the low durability of the heat exchangers was determined to be low-temperature sulphuric acid corrosion of the steel tubes. The aim of this research is to determine the impact of changes in the initial parameters of the BFG and the preheating temperature of the combustion components on the performance indicators of the hot-blast stoves, and to improve the existing waste heat recovery system of PJSC "Zaporizhstal". The study investigated the effect of changes in the initial BFG temperature on its humidity, calorific value, and calorimetric temperature. It was determined that raising the gas temperature from 30 °C to 60°C leads to a significant increase in its humidity (from 32 to 176 g/m³ and from 34 to 189 g/m³ at total gas pressures of 111.132 and 102.973 kPa, respectively). This, in turn, causes a reduction in the BFG's calorific value by 13% and the

calorimetric temperature by 9 %. To achieve a temperature under the hot-blast stove dome of 1350°C with the BFG preheated to 180°C, the required combustion air temperature is 120-190°C in winter and 150-310°C in summer. Upon combustion of the BFG, sulphur oxides are formed, which react with water vapour to create sulphuric acid vapours contained within the combustion products. It was established that, under the conditions of hot-blast stoves, the sulphuric acid dew point temperature ranges between 118-130°C. It was found that the short service life of the heat exchangers in the existing waste heat recovery system is due to the sulphur content in the steel of the tubes and the acidic nature of the condensate. Furthermore, the existing heat recovery system was identified as having a number of drawbacks, the most critical of which is the lack of measures to prevent corrosion of the metal tubes. An improved heat recovery system is proposed, which involves the use of three sections in each heat exchanger, vertical tube placement, and a triple regulation system to ensure the minimum allowable flue gas temperature remains above the sulphuric acid vapour dew point. Structural solutions have been developed to enable the cleaning of the heat exchanger tubes and the replacement of the sections most susceptible to corrosion. The proposed system is projected to increase the heat exchangers' inter-repair service life by 2-3 times, raise the average air-blast temperature by 50-60°C, and ultimately ensure a reduction in the cost of iron production.

Key words: heat recovery, heat exchangers, blast furnace stoves, sulfuric acid corrosion of metal.

For citation: Gres, L. P., Gupalo, O. V., Karakash, Ye. O., Yeromin, O. O., & Peretiatko, Ye. V. (2025). Features of heat recovery of low-temperature flue gas from blast furnace stoves. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 39, 175-194. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-10>.

Рукопис надійшов до редакції / Received 11.07.2025

Рекомендовано до друку / Accepted 21.10.2025