

О. В. ЄФІМОВ, П. В. ЛІФШИЦЬ, В. Л. КАВЕРЦЕВ

ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ЩОДО УДОСКОНАЛЕННЯ ІСНУЮЧОГО ТЕПЛООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Розглянуті питання щодо відмовлення від використання природного газу у технологічному процесі підігріву повітря в повітрянагрівачах доменних печей (кауперах) металургійних підприємств. Запропоновано інноваційне рішення – технологічна схема з застосуванням теплового генератора для підігріву димових газів і удосконалення системи утилізації їх теплоти з метою підвищення температур повітря та газу на вході у повітрянагрівач до 150–200 °С. Результати показали, що її застосування забезпечить підвищення середньої температури підігріву дуття на 60–110 °С без використання природного газу, може збільшуватися тривалість експлуатації теплообмінників не менше ніж на 10 років, а також покращуються техніко-економічні показники доменного процесу. Запропоновані інноваційні рішення дозволять: відмовитися від використання природного газу на повітрянагрівачах; забезпечити економію коксу до 14 кг/т; підвищити середню температуру підігріву дуття на 110 °С; стабільно й довгостроково забезпечити необхідні температури нагрівання повітря. Використання даних технічних рішень дозволить збільшити виробництво чавуну та скоротити витрати природного газу на підвищення температури гарячого дуття. В перспективі аналогічні схеми можливо буде використовувати в системі підготовки палива для мультитопливних котельних агрегатів металургійних підприємств.

Ключові слова: використання природного газу, підігрів повітря, повітрянагрівачі доменних печей, металургійне підприємство, технологічна схема, тепловий генератор.

Вступ

Підвищення енергоефективності доменного виробництва призводить до зниження собівартості виробництва чавуну та підвищення конкурентоспроможності готової металургійної продукції, а також сприяє як безпосередньо, так і опосередковано зменшенню шкідливих викидів в атмосферу. Зазвичай, наприклад, ці питання можна вирішувати завдяки:

- удосконаленню системи підігріву димових газів, що йдуть на повітрянагрівачі доменних печей (кауперів);
- скорочення витрати природного газу на підвищення температури гарячого дуття [1].

Мета роботи

Метою даної статті є представлення засобів щодо зниження частини використання природного газу та підвищення ефективності процесу підігріву повітря в повітрянагрівачах доменних печей (кауперах) у вигляді принципової схеми з застосуванням теплового генератора для підігріву димових газів і удосконалення системи утилізації їх теплоти, яка дозволяє нагрівати повітря спалення та доменного газу до заданих температур.

Викладення основного матеріалу

Питанням щодо зменшення, а в подальшому й відмовлення від використання природного газу у технологічному процесі підігріву повітря в повітрянагрівачах доменних печей (кауперах) металургійних підприємств, приділяється велика увага [1 – 7].

Існуючі системи забезпечують підігрів повітря і газового палива, як правило до температур 50 °С та 90 °С за рахунок утилізації теплоти димових газів. Такі значення температур підігріву компонентів горіння свідчать про низьку ефективність роботи системи утилізації теплоти, в тому числі в наслідок незадовільного стану теплообмінників.

Для досягнення максимального значення температури спалювання під куполом повітрянагрівача 1350 °С, використовують суміш доменного газу з природним газом.

Процес нагрівання доменного дуття потребує особливого підходу щодо вирішення проблем від проектування повітрянагрівачів до їх експлуатації. При вдосконаленні режимів спалювання палива необхідно розглядати питання як вивільнення природного газу, так і підвищення стійкості кладки та зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище. Збільшення кампанії повітрянагрівачів призводить не тільки до зменшення інвестицій, але і до економії коксу, оскільки при передчасній зупинці на ремонт одного з 4-х повітрянагрівачів спостерігається зниження температури дуття на 50 °С – 80 °С, що призводить до збільшення питомої витрати коксу на 8 – 10 кг/т.

Відомо, що для забезпечення необхідних температур 1300–1350 °С під куполом повітрянагрівача треба збагачувати доменний газ природним відповідно на 4,0 та 5,37 %, а повітря горіння киснем – до 29,4 та 32,3 %.

Слід зазначити, що при збагаченні повітря горіння киснем зменшується питомий вихід продуктів горіння [1–4].

Для збереження тих же параметрів теплообміну в насадці повітрянагрівачів необхідно підтримувати ті ж загальні витрати димових газів, як при збагаченні доменного газу природним, так і при збагаченні повітря горіння киснем:

$$V_{\text{д}}^{\text{ж}} = V_{\text{д}}^{\text{O}_2} \quad (1)$$

або

$$B_1 \cdot v_{\text{д}}^{\text{ж}} = B_2 \cdot v_{\text{д}}^{\text{O}_2} \quad (2)$$

© Єфімов О.В., Ліфшиць П.В., Каверцев В.Л., 2024

де B_1 та B_2 – витрати доменного газу при збагаченні доменного газу природним та при збагаченні повітря горіння киснем, $\text{м}^3/\text{год}$; $v_{\text{Д}}^{\text{Д}_2}$ та $v_{\text{Д}}^{\text{O}_2}$ – відповідно питомий вихід продуктів горіння при атмосферного повітря та повітря збагаченого киснем, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Таким чином витрати доменного газу при збагаченні повітря киснем будуть:

$$B_2 = \frac{B_1 \cdot v_{\text{Д}}^{\text{Д}_2}}{v_{\text{Д}}^{\text{O}_2}}$$

Для забезпечення температури дуття $1150\text{ }^\circ\text{C}$ – $1250\text{ }^\circ\text{C}$ рівень теплоти згорання доменного газу, як вже зазначалось, є недостатнім, тому його зазвичай збагачують природним газом у кількості, що відповідає $15 - 20$ млн. м^3 на рік для доменної печі обсягом 1513 м^3 . У той же час теплота відпрацьованих газів не використовується, що призводить до перевитрати палива.

Відомо, що капітальні витрати на збільшення енергоефективності у $3 - 4$ рази менші за витрати на виробництво енергоносіїв. Тому заощадження енергоресурсів для України є пріоритетним напрямом, одним із важливих факторів забезпечення конкурентоспроможності продукції на світовому ринку.

Економія енергетичних і матеріальних ресурсів забезпечує як економічний ефект, а й покращує екологічну обстановку промислових зон. Зменшення витрати палива пропорційно знижує викиди шкідливих речовин, споживання кисню і виділення теплоти в навколишнє середовище. При цьому покращується екологічна ситуація у місцях видобутку палива, сировини, а також на вогнетривких заводах [3–7].

Температура дуття, що нагрівається, на виході з повітрянагрівача змінна: на початку періоду охолодження насадки вона максимальна і практично дорівнює температурі продуктів згорання на вході в насадку, а потім зменшується і в кінці нагрівання вона знижується на $150\text{ }^\circ\text{C} - 200\text{ }^\circ\text{C}$.

Для підтримки постійної температури дуття, що надходить до доменну піч, використовують автоматичну систему, в якій застосовують підмішування частини холодного дуття до гарячого. Витрата дуття, що проходить через насадку, змінний і він регулюється за допомогою змішувального клапана, який частина дуття від загальної витрати пропускає, міняючи насадку, і підмішує до гарячого дуття, знижуючи тим самим його температуру до заданого рівня. Датчиком служить термопара, встановлена у повітропроводі гарячого дуття. Такий спосіб регулювання температури гарячого дуття неефективний, оскільки його температура стабілізується на рівні мінімального значення, яке має місце наприкінці дуттьового періоду.

За наявності чотирьох повітрянагрівачів у блоці печі для стабілізації температури гарячого дуття можна використовувати попарно-паралельний режим роботи повітрянагрівачів. У цьому випадку на дутті знаходяться два апарати та їх тривалість дуття зміщена на півперіоду. Тому при змішуванні двох більш і менш нагрітих потоків дуття відбувається стабілізація температури загальної витрати дуття.

Забезпечення попарно-паралельного режиму роботи повітрянагрівачів викликає певні труднощі, інколи ж неможливо його здійснити. Це пов'язано з тим, що необхідно спалювати збільшену кількість газу (приблизно в $1,5$ рази), передбачити заходи, пов'язані зі збільшенням тиску газу та повітря горіння перед пальником (у $2,0 - 2,5$ рази), встановити клапани для автоматичного регулювання витрати холодного дуття у кожного повітрянагрівача.

Тривалість періоду дуття при послідовному режимі роботи повітрянагрівачів становить

$$T_0 = (n-1) - T_n,$$

а при попарно-паралельному –

$$T_0 = T_n,$$

де n – кількість повітрянагрівачів в блоці печі;

T_n – тривалість періоду нагрівання.

Повітрянагрівачі опалюють доменним газом, а коли його теплота згорання не забезпечує задану температуру під куполом, то його збагачують природним газом ($2,5\% - 4,5\%$ об.) або ж підігрівають доменний газ і вентиляторне повітря [3–7].

Підвищення якості та енергоефективності доменного виробництва можна вирішувати завдяки:

- удосконаленню системи підігріву димових газів, що йдуть на повітрянагрівачи доменних печей (кауперів);

- підвищення температури гарячого дуття;

- скорочення витрати природного газу.

Пропонується технологічна схема (рис 1) з застосуванням пальника для підігріву димових газів і удосконалення системи утилізації їх теплоти з метою підвищення температур повітря та газу на вхід у повітропідігрівник (каупер) до температури у діапазоні $150 - 200\text{ }^\circ\text{C}$.

На принциповій схемі представлено (рис. 1) застосування теплогенератора 12 для підігріву димових газів і удосконалення системи утилізації їх теплоти, яка дозволяє нагрівати повітря спалення та доменного газу до заданих температур.

Тестувальні випробування такої схеми показали, що її використання забезпечить:

- 1) Підвищення середньої температури підігріву дуття на $60 - 110\text{ }^\circ\text{C}$ без використання природного газу;

2) Збільшення тривалості експлуатації теплообмінників не менше ніж на 10 років;

3) Покращення техніко-економічних показників доменного процесу.

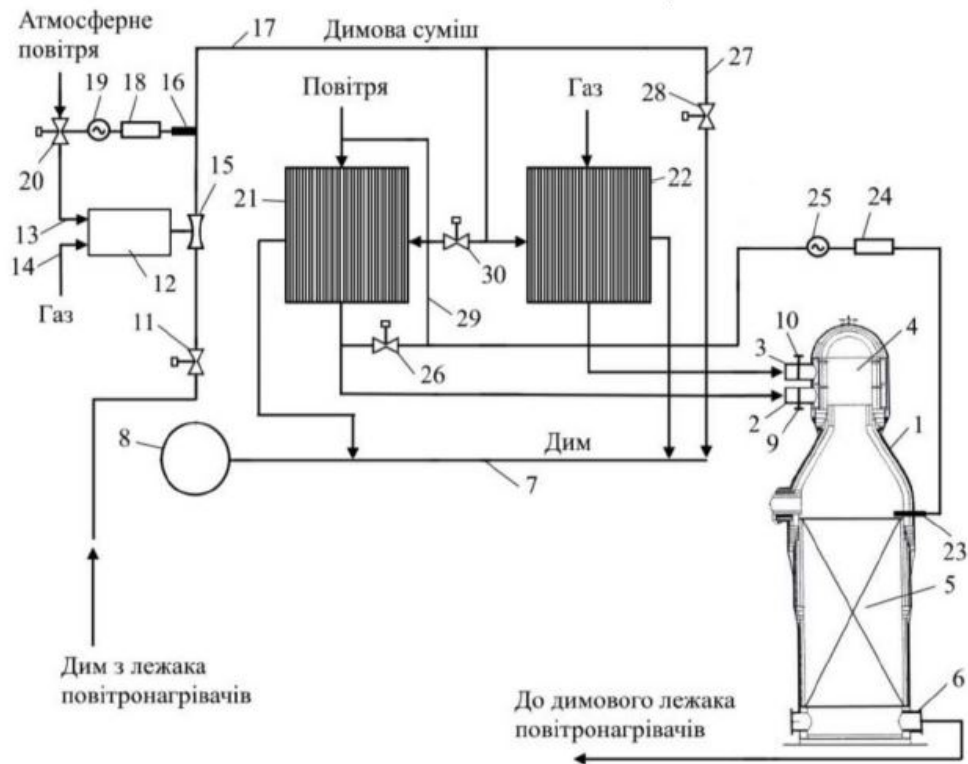


Рис. 1. Принципова схема підігріву димових газів та повітря:

- 1 – повітрянагрівач; 2 – штуцер подачі повітря; 3 – штуцер подачі доменного газу; 4 – форкамера;
- 5 – насадка; 6 – димові штуцери; 7 – димовий лежак; 8 – димар; 9, 10 – відсічні шибери;
- 11 – дросельний клапан; 12 – теплогенератор (підтопка); 13 – штуцер подачі повітря;
- 14 – штуцер подачі доменного газу; 15 – змішувач; 16 – киснемір; 17 – трубопровід димової суміші
- 18 – процесор; 19 – виконуючий механізм; 20 – дросельний клапан; 21 – повітряний теплообмінник;
- 22 – газовий теплообмінник; 23 – термопара; 24 – процесор; 25 – виконуючий механізм;
- 26 – дросельний клапан; 27 – обвідний димопровід; 28 – дросельний клапан;
- 29 – допоміжний повітропровід

Таблиця 1. Техніко-економічні показники роботи технологічної схеми – існуючий стан

Показники	Літо	Зима
Паливо	ПДС	ДГ
Температура підігріву палива, °С	90	90
Температура підігріву повітря, °С	50	50
Температура під куполом повітропідігрівників, °С	1290	1240
Середня температура дуття, °С	1150-1160	1100-1110
Витрати палива на блок повітропідігрівників, м³/год	ДГ-90 000 ПГ-850	ДГ-90 000

Таблиця 2. Техніко-економічні показники роботи технологічної схеми – проектні рішення

Показники	Витрата ДГ на теплогенератор, м³/год		
	2350	5000	8000
Паливо	ДГ	ДГ	ДГ
Температура підігріву палива, °С	150	180	215
Температура підігріву повітря, °С	150	180	215
Температура під куполом повітропідігрівників, °С	1300	1325	1350
Середня температура дуття, °С	1160-1170	1180-1190	1210-1220
Витрати палива на блок повітропідігрівників, м³/год	ДГ-90 000	ДГ-90 000	ДГ-90 000
Температура димових газів на виході з теплогенератора, °С	1209		
Температура димової суміші на вході в теплообмінники, °С	260	290	330
Витрата повітря на теплогенератор, м³/год	1500	3200	5150

Частина доменного газу разом з повітрям надходять у тепловий генератор 12. У ньому утворюються димові гази, які змішуються з димовими газами від лежачка в змішувачі 15. Далі агент, що гріє, йде до споживачів: підігрівачі повітря 21 і доменного газу.

Відпрацьовані димові гази видаляються трубопроводом (дим) через трубу 8 в довкілля. Нагріті в підігрівачах повітря та доменний газ (яка частина в %?) автономними каналами надходять у форкамеру 4 повітропідігрівача 1 і далі, для обігріву насадки 5. Результати тестових випробувань – техніко-економічні показники наведені в табл.1. Випробування проводились при наступних умовах:

Калорійність палива: Суміш природного газу (ПГ) та доменного газу (ПДС) – 826,4 ккал/м³; доменного газу (ДГ) – 750,7 ккал/м³;

Витрата повітря на блок повітрянагрівачів – 58 тис. м³/год;

Температури компонентів спалювання перед теплообмінниками: повітря – 10 °С; палива – 35 °С;

Температури диму: на виході з повітрянагрівачів – 230 °С; перед димарем – 130 °С.

Для реалізації запропонованої схеми, в рамках реконструкції, необхідно виконати наступні кроки:

1) Замінити існуючі повітряний і газовий теплообмінники на більш удосконалену конструкцію, яка дозволяє запобігання утворення низькотемпературної сірчаноокислової корозії металу;

2) Побудувати теплогенератор (підтопку) з системою спалення додаткового доменного газу та змішувач двох потоків димових газів: від повітрянагрівачів та від теплогенератора.

3) Використати ділянку для розміщення

існуючих теплообмінників, централізовану повітряну станцію, а також комунікаційну систему і регулюючу та запірну арматуру: трубопроводи підведення та відведення димових газів та холодних і нагрітих повітря і доменного газу.

В перспективі аналогічні схеми можливо буде використовувати в системі підготовки палива для мультитопливних котельних агрегатів металургійних підприємств.

Висновки та перспективи подальшого розвитку даного напрямку Запропоновано систему попереднього підігріву доменного газу та повітря спалювання перед пальником доменної, яка включає:

- Інноваційні рішення по удосконаленню існуючого обладнання (теплообмінника та комунікаційної системи)

- Інноваційне рішення по використанню додаткового теплогенератора для підвищення температури димових газів.

Реалізація інноваційних рішень дозволить:

1. Відмовитися від використання природного газу на повітрянагрівачах;

2. Забезпечити економію коксу до 14 кг/т;

3. Підвищити середню температуру підігріву дуття на 110°С

4. Стабільно, довгостроково забезпечити необхідні температури нагрівання повітря спалення та доменного газу;

5. Збільшити термін експлуатації теплообмінників не менше ніж на 10 років.

Також варто виділити, що використання даних технічних рішень дозволить збільшити виробництво чавуну та скоротити витрати природного газу на підвищення температури гарячого дуття.

Список літератури

1. Єфімов О., Ліфшиць П., Каверцев В. Удосконалення технологічної схеми спалювання газу в теплових установках металургійних підприємств. Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, №3. 2024. – С. 21–25.
2. Удосконалення та оптимізація моделей, процесів, конструкцій та режимів роботи енергетичного обладнання АЕС, ТЕС та опалювальних котелень / ред. О. В. Єфімова. Х. : Підручник НТУ «ХП», 2013. – 409 с.
3. Єфімов, О., Каверцев, В., Жидецький, О. Сучасні рішення по реконструкції газовідвідних трактів конвертерів, що працюють на металургійних підприємствах в Україні. Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2021. – С. 25–28
4. Грес Л.П. Підвищення енергоефективності нагріву доменного дуття на експлуатованих доменних печах шляхом встановлення системи теплообмінників для нагрівання компонентів горіння та модернізації повітрянагрівачів Л. П. Грес, Е. А. Каракаш, С. А. Карпенко, С. В. Колдомасов // Метал та лиття України. – 2014. № 5–6 (252–253). С. 43–47. – ISSN 2077-1304 (print).
5. Каверцев, В.Л. Огляд проблем ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів в промисловому секторі України та можливі оптимальні шляхи їх вирішення / В. Л. Каверцев, В. О. Дягілев //

Вісник НТУ «ХП». – 2017. – № 10(1232). – С. 92–96. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2017.10.13>.

6. Грес Л. П. Теплообменники доменных печей [Текст] : моногр. / Л. П. Грес, С. А. Карпенко, А. Е. Миленина ; под общ. ред. д.т.н., проф. Л. П. Греса. Дніпропетровськ: Пороги, 2012. – 491 с. – ISBN 978-617-518-207-9.

7. Єфімов О. В. Аналіз двохступеневого спалювання палива в мультитопливних котлах / О. В. Єфімов, В. Л. Каверцев, В. О. Дягілев, Т. А. Гаркуша, Б. Б. Черниш // Вісник НТУ «ХП».. – 2021. – № 1(5). – С. 33–37. – <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.01.06>.

References (transliterated)

1. Efimov O., Lifshic' P., Kavercev V. Udoskonalennja tehnologichnoї shemi spaljuvannja gazu v teplovih ustanovkah metalurgijnih pidpriemstv. Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «KhPI». Serija: Energetichni ta teplotehnični procesi j ustatkuvannja, №3. 2024. – Pp. 21–25.
2. Udoskonalennja ta optimizacija modelej, procesiv, konstrukcij ta rezhimiv roboti energetičnogo obladnannja AES, TES ta opaljuval'nih kotelen' / Pid. red. O. V. Efimova. – Kharkiv : Pidruchnik NTU «KhPI», 2013. – 409 p.
3. Efimov, O., Kavercev, V., Zhidec'kij, O. (2021). Suchasni rishennja po rekonstrukcii gazovidvidnih traktiv

- конвертерів, шхо працюють на металургійних підприємствах в Україні. Вісник Національного технічного університету «КХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси і устаткування. 2021. – Пp. 25–28
4. Gres L. P. Pidvishhennja energoefektivnosti nagrivu domennogo duttja na ekspluatovanih domennih pechah shljahom vstanovlennja sistemi teploobminnikiv dlja nagrivannja komponentiv gorinnja ta modernizacii povitronagrivachiv L. P. Gres, E. A. Karakash, S. A. Karpenko, S. V. Koldomasov // Metal ta litnja Ukraїni. – 2014. – № 5–6 (252–253). – Pp. 43–47.
 5. Kavercev, V. L. Ogljad problem efektivnogo vikoristannja palivno-energetichnih resursiv v promisl'ovomu sektorі Ukraїni ta mozhlivi optimal'ni shljahi ih virishennja / V. L. Kavercev, V. O. Djagilev // Visnik NTU «KhPI». – 2017. – №10(1232). Pp. 92–96. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2017.10.13>.
 6. Gres L. P. Teploobmenniki domennyh pechej [Tekst] : monogr. / L. P. Gres, S. A. Karpenko, A. E. Milenina ; pod obshh. red. d-ra tehn. nauk, prof. L. P. Gresa. – Dnipropetrovs'k : Porogi, 2012. – 491 p.
 7. Efimov O.V. Analiz dvohstupenevogo spaljuvannja paliva v mul'tipalivnih kotlah / O. V. Efimov, V. L. Kavercev, V. O. Djagi-lev, T. A. Garkusha, B. B. Chernish // Visnik NTU «KhPI». 2021. №1(5), p. 33–37. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.01.06>.

Надійшла (received) 19.07.2024

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єфімов Олександр В'ячеславович (Yefimov Olexandr) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: AVEfimov22@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3300-7447>.

Ліфшиць Петро Володимирович (Lifshyts Petro) – аспірант кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: lifshyts.p@gmail.com,

ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-9042-2513>.

Кавертцев Валерій Леонідович (Kavertsev Valerii) – кандидат технічних наук, доцент кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: kavertseff@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9472-1658>.

O. V. YEFIMOV, P. V. LIFSHYTS P V. L KAVERTSEV

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR IMPROVING THE EXISTING HEAT EXCHANGE EQUIPMENT OF METALLURGICAL ENTERPRISES

Considered issues regarding the refusal to use natural gas in the technological process of air heating in air heaters of blast furnaces (coopers) of metallurgical enterprises. An innovative solution is proposed – a technological scheme using a heat generator for heating flue gases and improving the system of their heat utilization in order to increase the temperature of air and gas entering the air heater by 150–200°C. The results of the test trials of the technological scheme, which were carried out under the following conditions, are presented: calorific value of the mixture of natural and blast furnace gas – 826.4 kcal/m³ (3,459.3104 KJ); calorific value of blast furnace gas – 750.7 kcal/m³ (3,142.43 KJ); air consumption per unit of air heaters – 58 thousand m³/h; temperature of combustion components in front of heat exchangers: air – 10 °C; fuel – 35 °C; smoke temperature: at the exit from the air heaters – 230 °C; in front of the chimney – 130 °C. The results showed that its application will ensure an increase in the average temperature of blast heating by 60–110°C without the use of natural gas, the duration of operation of heat exchangers can be increased by at least 10 years, and the technical and economic indicators of the blast furnace process will also improve. The proposed innovative solutions will allow: to abandon the use of natural gas for air heaters; ensure coke savings up to 14 kg/t; increase the average heating temperature of blowing by 110°C; stable, long-term provision of the necessary air heating temperatures. The use of these technical solutions will allow to increase the production of cast iron and reduce the consumption of natural gas to increase the temperature of hot blasting. In the future, similar schemes may be used in the fuel preparation system for multi-fuel boiler units of metallurgical enterprises.

Keywords: use of natural gas, air heating, air heaters of blast furnaces, metallurgical enterprise, technological scheme, heat generator.