

Підвищення ефективності згорання палива в повітрянагрівачах доменних печей

О. А. Петрик, кандидат технічних наук, доцент

І. А. Назаренко, кандидат технічних наук, доцент

С. О. Лапкіна, асистент

Національний університет «Запорізька політехніка»

E-mail: irinan842@gmail.com

Анотація. Розглянуто питання підвищення енергоефективності нагрівання доменного дуття шляхом збільшення температури під куполом кауперів та скорочення питомої витрати природного газу за рахунок нагрівання компонентів горіння та підвищення температури дуття. Метою дослідження є підвищення ефективності згорання палива, економія природного газу, визначення технічної можливості та теплової ефективності роботи теплообмінників при різній витраті природного газу на пальники та забезпечення повного згорання доменного газу з мінімальним коефіцієнтом надлишку повітря для досягнення заданих техніко-економічних показників роботи печі. З метою підвищення ефективності згорання палива, визначення технічної можливості та теплової ефективності роботи доменних печей при забезпеченні повного згорання доменного газу з максимальним коефіцієнтом теплотворності для досягнення заданих техніко-економічних показників повітрянагрівачів доменної печі пропонується встановити теплообмінники, для підігрівання повітря та доменного газу відходами гарячого димового газу. Досягнення цієї мети достатньо виправдане, бо за допомогою розрахованого економічного ефекту можна оптимізувати роботу повітрянагрівачів та вдосконалити ефективність згорання палива за допомогою встановлення теплообміннику для підігрівання доменних газів та повітря для згорання.

Запропоновано встановлення додаткового обладнання теплообмінників щодо підвищення температури гарячого дуття в період циклу подачі його на систему повітрянагрівачів. Приводиться дослідження і вдосконалення теплової роботи повітрянагрівачів доменних печей, що дозволяє знизити витрати природного газу. Підвищення енергоефективності доменного виробництва призводить до зниження собівартості виробництва чавуну та підвищення конкурентоспроможності готової металургійної продукції.

Ключові слова: доменна піч, економія природного газу, підігрівання компонентів горіння, режими роботи кауперів, вміст доменного газу, ефективність теплообмінників, доменні повітрянагрівачі, горіння палива, техніко-економічні показники

Актуальність. Нині умови обігрівання доменних повітрянагрівачів ускладнилися через зниження теплоти згоряння доменного газу, що призвело до необхідності підмішування до доменного газу висококалорійного дефіцитного та дорогого природного газу для підтримки проєктної температури під куполом каупера та необхідної температури гарячого дуття. При зростанні цін на природний газ та його дефіцит такий спосіб забезпечення проєктної температури під куполом кауперів не є економічно виправданим.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У промисловому розвитку починаючи з кінця 20 століття однією з концепцій забезпечення проєктної температури під куполом кауперів є використання теплоти димових газів, що відходить з повітрянагрівачів для підігрівання повітря горіння [1] і доменного газу з метою виключення використання природного газу з опалення повітрянагрівальних пристроїв. Підігрівання компонентів горіння здійснюється в теплообмінниках різних типів – рекуперативних та регенеративних. Серед рекуперативних: з проміжним теплоносієм, в основному, централізованої системи нагрівання газу та повітря; теплообмінники на термосифонах з ребрами та без них, і секційні пластинчасті теплообмінники.

Для досягнення максимальної ефективності роботи доменної печі необхідно організувати безаварійну експлуатацію всіх агрегатів, що входять до її виробничого комплексу. Збільшення температури під куполом кауперів вже було зроблено в Україні на ДП-2 (доменна піч №2), а потім вже на ДП-3,5 Єнакіївського металургійного заводу [2]. Введено в експлуатацію систему теплообмінників для нагрівання доменного газу та повітря за рахунок утилізації теплоти відхідних димових газів. Це дало можливість підвищити температуру під куполом кауперів та температуру дуття. Тривалий досвід експлуатації цієї системи показав можливість стабільного нагрівання дуття до 1200 °С [3].

Питома витрата коксу, що характеризує енергоефективність доменного виробництва, значною мірою залежить від кількості вдування в доменну піч замінників коксу, якості шихтових матеріалів та рівня температур гарячого дуття. Останній показник визначається ефективністю роботи повітрянагрівачів, терміном

їх служби та режимами спалювання палива. Нагрівання доменного дуття потребує особливого підходу для вирішення проблем від проектування повітрянагрівачів до їх експлуатації. При вдосконаленні режимів спалювання палива слід розглядати питання як застосування природного газу для підвищення калорійності та температури, так і підвищення стійкості кладки та зниження шкідливих викидів у довкілля.

Мета дослідження - підвищення ефективності згорання палива, економія природного газу, визначення технічної можливості та теплової ефективності роботи теплообмінників при різній витраті природного газу на пальники та забезпечення повного згорання доменного газу з мінімальним коефіцієнтом надлишку повітря для досягнення заданих техніко-економічних показників роботи печі. З метою підвищення ефективності згорання палива, визначення технічної можливості та теплової ефективності роботи доменних печей при забезпеченні повного згорання доменного газу з максимальним коефіцієнтом теплотворності для досягнення заданих техніко-економічних показників повітрянагрівачів доменної печі пропонується встановити теплообмінники, для підігріву повітря та доменного газу відходами гарячого димового газу. Досягнення цієї мети достатньо виправдане, бо за допомогою розрахованого економічного ефекту можна оптимізувати роботу повітрянагрівачів та вдосконалити ефективність згорання палива за допомогою встановлення теплообміннику для підігріву доменних газів та повітря для згорання.

Матеріали та методи дослідження. Доменний цех та пов'язаний з ним сировинний комплекс - найбільші споживачі викопних палив. Нині витрата палива загалом за металургійним комплексом, віднесений до однієї тонни чавуну, що виплавляється, дуже висока і становить більше 1,6 тонн умовного палива.

Повітрянагрівачі (ПН) встановлюють поруч з доменною піччю, які обладнані пальником типу «труба в трубі» (рис. 1). У 1857 році англійський інженер Каупер запропонував повітрянагрівач регенеративного типу, в якому по попередньо розігрітій цегляній насадці пропускають холодне повітря, яке при цьому нагрівається. Повітрянагрівач є вертикальною та схожою на більший за розміром

циліндричний бак, що зроблений зі сталі, який має товщину у 15-20 мм. Усередині футерований теплоізоляційною та вогнестійкою цеглою.

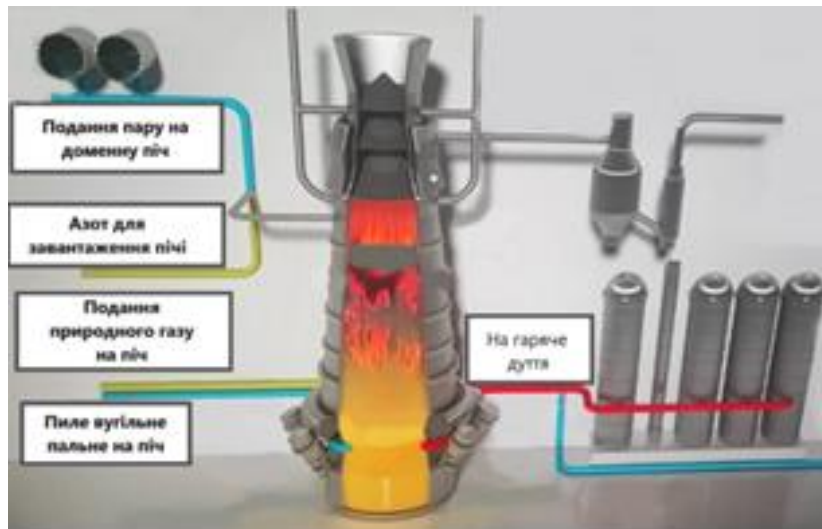


Рис. 1. Розміщення обладнання повітрянагівача з піччю

Повітрянагівач має дві основні частини. Першою частиною є шахта, тобто камери якими подається паливо на горіння та які мають круглий переріз. По-друге, це насадки - кладки з цегли, що мають параметри зазначені вище і утворюють вертикальні канали. Потужність повітрянагівачів характеризується поверхнею нагрівання та продуктивністю газових пальників, а конструкція – типом насадки. При проектуванні приймають на 1 м³ корисного об'єму доменної печі щонайменше 65 м² поверхні нагрівання [4].

Високотемпературна частина повітрянагівачів виконана з динасу. Насадка виконана з великих блоків з отворами в цих блоках. Принципова класична схема розміщення обладнання повітрянагівачів у складі блоку доменної печі (рис. 2) включає себе: чотири ПН: №1-4; трубопроводи: гарячого дуття, повітря горіння, опалювального газу, димових боровів.

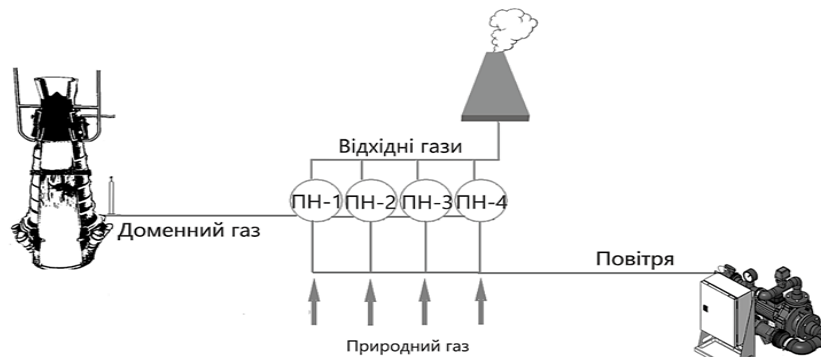


Рис. 2. Схема подання палива до ПН

Система подачі повітря горіння призначена для режиму нагрівання повітрянагрівачів. Подача повітря для горіння надходить від вентиляторів, із загальною продуктивністю повітря до 45-50 тис. м³ /год [5], з тиском перед загальним теплообмінником в 600 мм водного стовпа. Для перемикання вентиляторів передбачені клапани. Для відведення повітря до блоку через повітряний теплообмінник, на повітряному колекторі є листова засувка. На підведенні до кожного повітрянагрівача встановлюються: вимірювальна діафрагма, дросельний регулюючий клапан і відокремлювальний клапан.

Повітрянагрівачі, що працюють, можуть знаходитися в одному з таких режимів: нагрівання, дуття, відділення, і режимів тривалої зупинки (холостий хід) та розрідження (рис. 3).

Переведення повітрянагрівачів з одного режиму в інший здійснюється через режим «відділення». Максимальна температура купола повітрянагрівачів встановлюється завданням в залежності від стану повітрянагрівача і не повинна бути вищою за 1400 °С [6]. Зазвичай для стандартної доменної печі потрібно щоб два повітрянагрівача були у режимі нагрівання та два ПН в режимі дуття, або один в режимі відділення, а другий в режимі дуття.

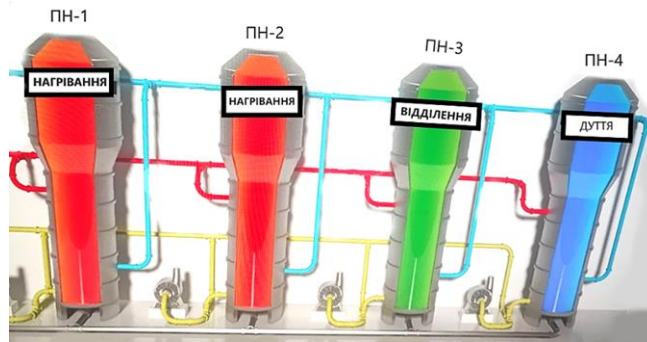


Рис. 3 Схема режимів повітрянагрівачів стандартного типу

З метою підвищення ефективності згорання палива, визначення технічної можливості та теплової ефективності роботи доменних печей при забезпеченні повного згорання доменного газу з максимальним коефіцієнтом теплотворності для досягнення заданих техніко-економічних показників повітрянагрівачів доменної печі пропонується розрахувати і встановити теплообмінники, для підігрівання повітря та доменного газу відходами гарячого димового газу. Схему теплообмінника для розрахунку наведена на рис 4.

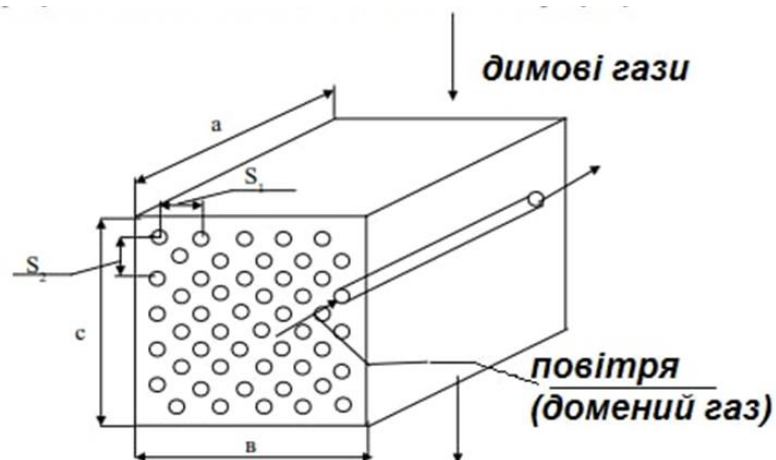


Рис. 4. Схема теплообмінника для підігрівання димовими газами

Розглянуто дослідження можливостей використання надлишкового тепла у системі утилізації теплоти. По-перше уточнено визначення ситуацій, за яких утворюється надмірна теплота [7].

При відносно високій теплоті згорання доменного газу $830\text{--}850 \text{ ккал/м}^3$ доменний газ можна нагріти до $160\text{--}190$ [8] $^{\circ}\text{C}$, температури на трубі 120°C ; температура диму при виході теплообмінників: повітряного $60\text{--}86^{\circ}\text{C}$, газового $85\text{--}90^{\circ}\text{C}$, щоб на виході теплообмінників у цих режимах надлишкового тепла не було.

Умова температурного режиму диму в димовій трубі на рівні 121 (до 134) °С і є захистом труби від корозії водяного та кислотного середовища [2].

Мета виконання балансу теплоти теплообмінників – визначення та покращення ефективності роботи обладнання для ПН. Для розрахунку балансу теплоти теплообмінників необхідно знати витрату диму у трьох паралельних гілках: у байпасній, гілки газонагрівача, гілки повітряного рекуператора.

Виконані розрахунки теплового балансу для теплообмінника ДП залежно від вологості доменного газу та необхідних температур підігрівання компонентів горіння з урахуванням підвищеної кількості дуття, що нагрівається та виконується з такими вихідними даними: вміст СО у вологому повітрі (газі) та - водню H_2 , вміст води в доменному газі, теплота згоряння доменного газу, витрата доменного газу, повітря, витрата диму, температура доменного газу на вході і виході, те ж на вході з вентиляторів для нагнітання повітря.

У таблиці 1 подано теплові втрати для утилізації теплоти повітрянагрівачів.

1. Теплові втрати для утилізації теплоти

Найменування	Середня температура середовища, °С	Теплові втрати, КВт
Повітряний теплообмінник	180	2456
Газовий теплообмінник	160	4498
Газопроводи	147	6450
Відведення від теплообмінників у димар	86	2 770,5
Димопроводи до теплообмінників байпас, димові патрубки, стінки	246	67,8
Загальні теплові втрати у системі		16944

Для оцінки впливу ефективності при використанні теплообмінників для утилізації теплоти газів від повітрянагрівачів виконаний розрахунок економії природного газу за рахунок підігріву в ПН.

Основна схема теплообмінників для утилізації теплоти відпрацьованих газів від повітрянагрівачів зображена на рис. 5.

Для підвищення ефективності роботи повітрянагрівачів та економії палива пропонується встановити теплообмінники утилізації тепла відпрацьованих газів від повітрянагрівачів.

Описи та принцип роботи теплообмінників для утилізації теплоти відпрацьованих газів від повітрянагрівачів мають таку функцію.

Відхідні димові газу від ПН з температурою близько 270 °С надходять трубопроводами на теплообмінники підігрівання доменного газу (ТПГ) і повітря (ТПП).

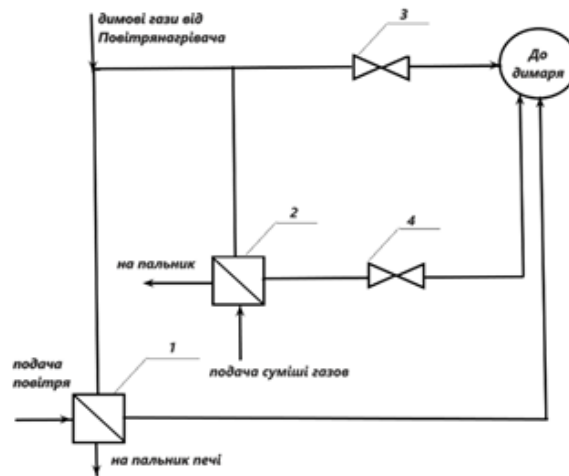


Рис. 5. Схема теплообмінників для утилізації теплоти:

1 - теплообмінник підігрівання повітря (ТПП); 2 - теплообмінник підігрівання газу (ТПГ); 3- регулюючий клапан по обвідному трубопроводі димових газів; 4 - регулюючий клапан на трубопроводі газів, що після ТПГ

Охолоджені газу від теплообмінників відводяться в димову трубу повітрянагрівачів. Холодний доменний газ від магістрального газопроводу трубопроводом надходить у теплообмінник ТПГ, де нагрівається до температури близько 160 °С і далі трубопроводом подається на горіння в ПН.

За допомогою регулюючого клапана 4 на трубопроводі газів, що відходять після теплообмінника, підтримується задана температура доменного газу, який подається на горіння в ПН.

Холодне повітря від центральної станції повітря горіння надходить трубопроводом в теплообмінник ТПП, де нагрівається до температури близько 180 °С і далі трубопроводом подається на горіння доменного газу в ПН.

Регулюючий клапан (3) на обвідному трубопроводі димових газів, що відходять, підключеному до димової труби повз теплообмінники, підтримує при цьому температуру відхідних газів в ній вище температури точки роси для запобігання випадання конденсату водяної пари з відхідних газів і захисту таки чином димової труби від руйнування.

Температури підігрівання повітря та доменного газу на горіння непостійні в часі. Це можливо пояснити тим, що температура димових газів від повітрянагрівачів змінюється і залежить від тривалості нагрівання ПН і так само впливає на температуру навколишнього повітря, витрату доменного газу та повітря.

Наступний крок є виконання конструктивного розрахунку для теплообмінників системи відхідні дими – доменний газ/повітря з даними, які розраховано і наведено в таблиці 2.

2. Основні конструктивні характеристики теплообмінників

Назва величини	Розмірність	Значення теплообмінників	
		ТПГ	ТПП
Діаметр труб	мм	42	42
Товщина стінки	мм	2,5	2,5
Поперечний крок труби	мм	75	75
Просувний крок труб	мм	30	30
Розташування труб	-	шахматне	шахматне
Число труб по ходу газів	шт	143	127
Загальна кількість труб	шт	5662	5004
Перетин для проходу ДГ або повітря	м ²	8,2	8,2
Перетин для проходу диму	м ²	3,042	2,688
Поверхня нагріву	м ²	4606,7	4069,6

Вхідними даними для розрахунку скорочення природного газу є: коефіцієнт надлишку повітря, середня нижча теплота згорання (калорійність) природного газу за 2022 рік, вихід димових газів від блоку повітрянагрівачів, середня температура

димових газів на вході в підігрівач, середня температура димових газів на виході з підігрівача, витрата повітря на блок повітрянагрівачів.

Щоб створити систему з теплообмінників для утилізації теплоти необхідно вдало помістити його у цех з ДП, де необхідно дотриматися умов розміщення та розмірів наданих у розрахунку. Приблизна вартість зборки двох теплообмінників та їх підключення приблизно на 2022 рік можуть становити близько $s=500\ 000$ доларів, оскільки розміри такого теплообмінника та матеріал, що має витримати температуру, яка надійде з ПН, досить значні. Можливо створення індивідуального за розміром пристрою, але його зменшення призведе до корозії від кислотних відходів, та меншої ефективності, що перетне мінімальне значення при експлуатації.

Результати досліджень та їх обговорення. Підвищення енергоефективності доменного виробництва призводить до зниження собівартості виробництва чавуну та підвищення конкурентоспроможності готової металургійної продукції. Така модернізація сприяє як безпосередньо, і побічно зменшення шкідливих викидів в атмосферу, використовуючи лише природний газ. Ці питання можна вирішувати, збільшуючи температуру під куполом повітрянагрівачів, знижуючи питому витрату природного газу за рахунок збільшення температури дуття вже підігрітим паливом, зменшуючи матеріаломісткість та капітальні витрати на нагрівання доменного дуття шляхом модернізації та встановлення теплообмінників гріючих гарячими відхідними газами.

Список використаних джерел

1. Грес Л. П., Каракаш Е. А., Карпенко С. А., Колдомасов С. В. 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. Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MLU_2014_5-6_12.
2. Грес Л. П., Карпенко С. А., Миленина А. Е. Теплообменники доменных печей; под общей ред. Л. П. Греса. Д.: Пороги, 2012. 491 с.
3. Грес Л. П., Карпенко С. А., Науменко А. А., Иващенко В. П., Еремин А. О., Каракаш Е. А., Гупало Е. В. Повышение энергоэффективности нагрева доменного дутья: монография. Д., 2021. 612 с.
4. Щербаков В. П. Основы доменного производства. М.: Металлургия, 1969. 326 с.

5. Основы планирования доменного цеха. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aitcom.ru/stati/224-planirovaniya-domennogo-czexa>

6. Иващенко Е. Ю. Технологии утилизации тепловых отходов: учебно-методическое пособие по дисциплине «Вторичные энергетические ресурсы» для студентов специальности «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент». Минск: БНТУ, 2014. 108 с.

7. Грес Л. П., Карпенко С. А., Миленина А. Е. Теплообменники доменных печей: монография. Днепропетровск: Пороги, 2012. 491 с.

References

1. Gubinsky, V. I. Gres, L. P., Karakash, E. A., Karpenko, S. A., Koldomasov, S.V. (2014). Povysheniye energoeffektivnosti nagreva domennogo dut'ya na ekspluatiruyemykh domennykh pechakh putem ustanovki sistemy teploobmennikov dlya nagreva komponentov gorennya i modernizatsii vozdukhonagrevateley [Improving the energy efficiency of blast-furnace blast heating at operating blast furnaces by installing a system of heat exchangers for heating combustion components and modernizing air heaters]. Metal and casting of Ukraine, 5-6, 43-47.

2. Gres, L. P., Karpenko, S. A., Milenina, A. E. (2012). Teploobmenniki domennykh pechey [Heat exchangers of blast furnaces]. Dnepropetrovsk: Porogy, 491.

3. Gres, L. P., Karpenko, S. A., Naumenko, A. A., Ivashchenko, V. P., Eremin, A. O., Karakash, E. A., Gupalo, E. V. (2021). Povysheniye energoeffektivnosti nagreva domennogo dut'ya: monografiya [Increasing the energy efficiency of blast furnace heating]. Dnepropetrovsk, 612.

4. Shcherbakov, V. P. (1969). Osnovy domennogo proizvodstva [Fundamentals of blast-furnace production]. Moscow: Metallurgy, 326.

5. Osnovy planirovaniya domennogo tsekha [Fundamentals of planning a blast furnace shop]. Access mode: <https://www.aitcom.ru/stati/224-planirovaniya-domennogo-czexa>.

6. Ivashchenko, E. Yu. (2014). Tekhnologii utilizatsii teplovykh otkhodov: uchebno-metodicheskoye posobiye po distsipline «Vtorichnyye energeticheskiye resursy» [Heat Waste Recycling Technologies: Teaching and Methodological Manual on the discipline "Secondary Energy Resources" for students of the specialty "Energy Efficient Technologies and Energy Management"]. Minsk: BNTU, 108.

7. Gres, L. P., Karpenko, S. A., Milenina, A. E. (2012). Teploobmenniki domennykh pechey [Heat exchangers of blast furnaces. Monograph]. Dnepropetrovsk: Porogy, 491.

INCREASING THE EFFICIENCY OF FUEL COMBUSTION IN AIR HEATERS OF BLAST FURNACES

O. Petryk, I. Nazarenko, S. Lapkin

Abstract. *The issues of increasing the energy efficiency of blast-furnace blast heating by increasing the temperature under the cowper and reducing the specific consumption of natural gas by heating the combustion components and increasing the blast temperature are considered. The aim of the study is to increase the efficiency of fuel combustion, save natural gas, determine the technical feasibility and thermal efficiency of heat exchangers at different flow rates of natural gas for burners and complete*

combustion of blast-furnace gas with a minimum excess air coefficient to achieve the specified technical and economic indicators of the furnace. In order to increase the efficiency of fuel combustion, determine the technical feasibility and efficiency of blast furnaces while ensuring complete combustion of blast furnace gas with a maximum calorific value to achieve the specified technical and economic indicators of blast furnace air heaters, it is proposed to install heat exchangers for heating air and blast furnace gas with hot flue gas waste.

Achieving this goal is quite justified, since with the help of the calculated economic effect, it is possible to optimize the operation of air heaters and improve the efficiency of fuel combustion by installing a heat exchanger for heating blast furnace gases and combustion air.

It is proposed to install additional equipment of heat exchangers to increase the temperature of the hot blast during the cycle of supplying it to the air heater system. The study and improvement of the thermal operation of blast furnace air heaters is presented, which makes it possible to reduce the consumption of natural gas. Increasing the energy efficiency of blast furnace production leads to a reduction in the cost of pig iron production and an increase in the competitiveness of finished metallurgical products.

Key words: *blast furnace, saving natural gas, heating of combustion components, operating modes of cowpers, content of blast furnace gas, efficiency of heat exchangers, blast furnace air heaters, fuel combustion, technical and economic indicators*