

Грес Л.П., Гупало О.В., Єрьомін О.О., Радченко Ю.М., Суліменко С.Є.

## Дослідження впливу інтенсифікації доменного процесу шляхом збільшення витрат дуття на параметри експлуатації системи підводу та нагрівання дуття

Gres L.P., Gupalo O.V., Yeromin O.O., Radchenko Yu.M., Sulimenko S.Ie.

## Study of the impact of blast furnace process intensification by increasing the blast flow rate on the operating parameters of the blast supply and heating system

**Метою** роботи є дослідження впливу збільшення витрат дуття на параметри експлуатації системи подачі та нагрівання дуття для умов доменної печі корисним об'ємом 1754 м<sup>3</sup>. **Методика.** Для виконання досліджень використано чисельно-розрахунковий метод, який передбачає виконання розрахунків спалення палива, тепло-масообміну та газодинаміки з визначенням експлуатаційних параметрів системи подачі та нагрівання дуття на ділянці «турбоповітродувка – блок повітрянагрівачів – тракт гарячого дуття – доменна піч». **Результати.** Визначено, що забезпечення температури під куполом повітрянагрівачів 1350 °С потребує збагачення доменного газу природним до вмісту природного газу в природно-доменній суміші 5,6 %. Нагрівання збільшеної на 18,5 % витрати дуття потребує підвищення теплової потужності повітрянагрівачів до максимально можливої і призводить до зниження температури нагріву дуття на 30 °С. При цьому теплові втрати трубопроводу гарячого дуття на ділянці «повітрянагрівачі-фурми доменної печі» майже не змінюються, в той час як витрати димових газів та втрати їх тиску в димовому тракті повітрянагрівачів суттєво зростають. Оскільки евакуація димових газів із повітрянагрівачів відбувається в основному за рахунок тиску компонентів спалення, рекомендовано використання централізованої подачі повітря з вентилятором більшої продуктивності. **Наукова новизна** роботи полягає у виявленому взаємозв'язку між витратами дуття та експлуатаційними параметрами системи його нагрівання та підводу до доменної печі. До **практичної значущості** роботи слід віднести розроблені рекомендації щодо забезпечення експлуатації системи підводу та нагрівання дуття при збільшенні його витрат.

**Ключові слова:** повітрянагрівач, доменне дуття, температура дуття, витрата дуття, втрати тиску.

The **objective** of the study is to investigate the effect of increasing the air blast flow rate on the operating parameters of the blast supply and heating system for the conditions of a blast furnace with a useful volume of 1754 m<sup>3</sup>. **Methods.** The authors used numerical methods for calculations of fuel combustion, heat and mass transfer, and gas dynamics to determine the operating parameters of the air blast supply and heating system at the "turbo-blower - hot-blast stoves - hot blast pipeline - blast furnace" sections. **Results.** It has been determined that ensuring a temperature of 1350 °C under the dome of hot-blast stoves requires the enrichment of blast furnace gas with natural gas to a content of 5.6 % natural gas in the mixture. Heating of the air blast flow rate, which is raised by 18.5 %, requires an increase of the heat output of the hot blast stoves up to the maximum and leads to a decrease of the hot blast air temperature by 30 °C. At the same time, the heat losses of the hot blast pipeline in the section "hot-blast stoves -blast furnace" almost do not change, while the flue gas flow rate and pressure losses in the flue gas path of the hot-blast stoves increase significantly. Since the evacuation of flue gases from the hot-blast stoves occurs mainly due to the pressure of the combustion components, it is recommended to use a centralized air supply with an air fan of higher capacity. The **scientific novelty** of the research lies in the revealed relationship between the air blast flow rate and the operational parameters of the heating system and its supply to the blast furnace. The **practical value** of the research includes the developed recommendations for ensuring the operation of the air blast supply and heating system under conditions of increasing consumption.

**Keywords:** hot-blast stoves, air blast, temperature of air blast, blast flow, pressure loss.

### 1. Вступ

На металургійних підприємствах часто постає питання про збільшення продуктивності доменних печей. Для вирішення цього питання зазвичай використовують наступні заходи.

1) Збільшення корисного об'єму доменної печі під час її реконструкції. Реалізація заходу потребує значних інвестицій для модернізації всього комплексу доменної печі.

2) Підвищення температури гарячого дуття шляхом модернізації повітрянагрівачів (ПН) та/або

за рахунок забезпечення максимально допустимих температур під куполом ПН, шляхом нагрівання компонентів спалення, збагачення доменного газу природним, або збагачення повітря спалення киснем [1, 2].

Під час модернізації ПН зазвичай збільшують загальну поверхню їх нагрівання шляхом використання насадки з підвищеною питомою поверхнею нагрівання. Наприклад, блочна насадка з каналами 40 мм замінюється на насадку с каналами 30 мм [3-



Грес Л.П. – д.т.н., проф. УДУНТ  
Гупало О.В. – к.т.н., доц. УДУНТ  
Єрьомін О.О. – д.т.н., проф. УДУНТ  
Радченко Ю.М. – к.т.н., доц. УДУНТ  
Суліменко С.Є. – к.т.н., доц. УДУНТ

Gres L. – d.t.s., prof, USUST  
Gupalo O. – c.t.s., docent USUST  
Yeromin O. – d.t.s., prof, USUST  
Radchenko Yu. – c.t.s., docent USUST  
Sulimenko S. – c.t.s., docent USUST

5], переобладнання ПН з використанням винесеної камери спалення або купольним опаленням [6-9].

Підвищення температури дуття призводить не лише до збільшення продуктивності доменної печі, а і до зниження питомих витрат коксу. Так за даними роботи [10], підвищення температури дуття на 100 °С в інтервалі температур 1100-1200 °С призводить до збільшення продуктивності доменної печі на 3 % при одночасному зниженні питомих витрат коксу на 3 %.

3) Підвищення інтенсивності доменної плавки за рахунок збільшення витрат дуття, що нагрівається в ПН доменної печі [11]. В цьому випадку необхідно враховувати можливу зміну параметрів експлуатації всієї системи подачі та нагрівання дуття: турбоповітродувка – блок повітронагрівачів – тракт гарячого дуття – доменна піч. При цьому зміна значень тиску, витрат і температури дуття на фурмах доменної печі може унеможливити використання цього заходу.

## 2. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є дослідження впливу збільшення витрат дуття для інтенсифікації доменного процесу на параметри експлуатації системи подачі та нагрівання дуття для умов доменної печі корисним об'ємом 1754 м<sup>3</sup>.

В роботі розглянуто 3 варіанти роботи повітронагрівачів, а саме:

Варіант 1 (базовий варіант) – витрата дуття 2950 м<sup>3</sup>/хв при температурі під куполом ПН 1350 °С, яка забезпечується збагаченням доменного газу природним.

Варіант 2 – витрата дуття 2950 м<sup>3</sup>/хв при температурі під куполом ПН 1168 °С, яка забезпечується опаленням повітронагрівачів доменним газом з теплотою згоряння 3085 кДж/м<sup>3</sup>.

Варіант 3 – витрата дуття 3500 м<sup>3</sup>/хв при температурі під куполом ПН 1350 °С, яка забезпечується опаленням ПН природно-доменною сумішшю.

Таблиця 1. Параметри роботи повітронагрівачів

Номер варіанта	Витрата дуття, м <sup>3</sup> /хв	Паливо і його теплота згоряння, кДж/м <sup>3</sup>	Температура палива, °С	Температура повітря, °С	Частка природного газу, %	t <sub>куп</sub> , °С
1	2950	ПДС, 4782	40	10	5,55	1350
2	2950	ДГ, 3085	40	10	0	1168
3	3500	ПДС, 4782	40	10	5,55	1350

Продовження таблиці 1

Номер варіанта	Теплова потужність, кВт	Витрата палива, м <sup>3</sup> /год	Витрата повітря, м <sup>3</sup> /год	Витрата диму, м <sup>3</sup> /год	Температура дуття, °С
1	36763	27673	31053	55508	1190
2	32279	37667	23723	56704	1037
3	44960	33847	36785	66449	1160

Як видно з табл. 1, при нагріванні 2950 м<sup>3</sup>/хв дуття і опаленні ПН доменним газом, температура дуття не перевищує 1037 °С (варіант 2), а при збагаченні доменного газу природним з підвищенням теплоти згоряння ПДС до 4782 кДж/м<sup>3</sup> – 1190 °С (варіант 1). Необхідність збільшення витрати дуття

## 3. Методи дослідження

Для виконання досліджень використано чисельно-розрахунковий метод, який передбачає виконання наступні розрахунків:

1) спалення палива та визначення калориметричної температури продуктів згоряння при використанні доменного газу або природно-доменної суміші з урахуванням температури компонентів спалення;

2) теплових потужностей ПН, витрат палива, повітря спалення та димових газів, параметрів теплообміну, коефіцієнтів тепловіддачі та теплопередачі в насадці ПН, зміни температур димових газів і дуття в періоди нагрівання і дуття;

3) параметрів роботи пальника для забезпечення безпульсаційного горіння палива;

4) втрат тиску димових газів на ділянці ПН – димар, вибір тиску газу і вентиляторного повітря;

5) втрат тиску у тракті холодного дуття (від турбоповітродувки до ПН), а також у тракті гарячого дуття (від ПН до фурм доменної печі);

6) зміни температури гарячого дуття на ділянці ПН – фурми доменної печі.

Під час розрахунків параметрів спалення палива використовували відому методику [12]. Розрахунки теплових і тепломасообмінних параметрів ПН виконувалися за методикою [3]. Втрати тиску у трактах холодного та гарячого дуття, а також зміна температури гарячого дуття на шляху від ПН до доменної печі визначалися за рекомендаціями роботи [13].

## 4. Результати дослідження та їх обговорення

Розрахунки спалювання палива (табл. 1) показали, що при опаленні ПН доменним газом (ДГ) температура під куполом є низькою і складає 1168 °С (варіант 2). Температура під куполом 1350 °С досягається за рахунок опалення ПН природно-доменною сумішшю (ПДС) з вмістом природного газу 5,55 % (варіанти 1 і 3).

до 3500 м<sup>3</sup>/хв (варіант 3) потребує збільшення теплової потужності ПН до максимально можливої. При цьому температури нагріву дуття зменшується до 1160 °С.

Температура гарячого дуття, в основному, залежить від загальної площі поверхні теплообміну

насадки ПН. При аналізі параметрів експлуатації комплексу «блок ПН-доменна піч» використовують поняття питомої поверхні нагріву, коли загальна поверхня нагріву ПН відноситься до об'єму печі ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ ). За нормами УКРДІПРОМЕЗу [14] це значення при використанні насадки з каналами 30 мм складає  $105 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Для блоку ПН, які розглядаються в даній роботі, питома поверхня нагріву дорівнює  $93,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Для доменних печей того ж об'єму, що експлуатуються при різних значеннях інтенсивності доменної плавки, доцільно загальну поверхню нагріву ПН відносити до витрат дуття, що нагрівається [3]. В цьому випадку нормоване значення питомої поверхні нагрівання складе  $52,5 \text{ м}^2/(\text{хв} \cdot \text{м}^3)$ , а для варіантів 1 та 2 –  $55,6 \text{ м}^2/(\text{хв} \cdot \text{м}^3)$ . При збільшенні витрат дуття до  $3500 \text{ м}^3/\text{хв}$  питома поверхня нагріву зменшується до  $50,5 \text{ м}^2/(\text{хв} \cdot \text{м}^3)$ , що і є

основною причиною зниження температури гарячого дуття.

Також в роботі було виконано розрахунки параметрів експлуатації металевого пальника ПН продуктивністю  $48000 \text{ м}^3/\text{год}$  для визначення наявності пульсаційного горіння. Для цього розраховували швидкість газу, повітря і газоповітряної суміші в пальнику, а також питоме теплове навантаження, яке визначається як відношення загальної теплової потужності ПН до площі горизонтального перетину його камери згорання. За даними [3], відсутність пульсаційного горіння проявляється при умовах коли питоме теплове навантаження менше  $10 \text{ МВт}/\text{м}^2$ , а швидкість газу, повітря і газоповітряної суміші приблизно однакові. Результати розрахунків параметрів пальника наведені в табл. 2, з якої видно, що зазначені швидкості для варіантів 1-3 мало відрізняються, а питоме теплове навантаження не перевищує  $10 \text{ МВт}/\text{м}^2$ .

Таблиця 2. Результати розрахунків параметрів пальника

Номер варіанта	Швидкість палива, м/с	Швидкість повітря, м/с	Швидкість суміші, м/с	Питоме теплове навантаження, $\text{МВт}/\text{м}^2$
1	13,61	22,4	17,17	5,5
2	18,52	17,12	17,95	4,8
3	16,64	26,54	20,65	6,7

Виконано розрахунки втрат тиску по тракту холодного дуття (від турбоповітродувки до ПН), а також по тракту гарячого дуття (від ПН до фурми доменної печі) для випадку, коли повітрянагрівач,

який знаходиться в режимі нагрівання, розміщений на найбільшій відстані від доменної печі. Розрахунки виконано для умов опалення ПН при родно-доменною сумішшю (варіанти 1 і 3).

Таблиця 3. Результати розрахунку втрат тиску в повітропроводах холодного і гарячого дуття

Параметр	Номер варіанта	
	1	3
Температура повітря після стиснення на вході в повітропровід холодного дуття, $^{\circ}\text{C}$	174	176
Температура холодного дуття на вході в ПН, $^{\circ}\text{C}$	150	150
Втрати тиску у повітропроводі холодного дуття, Па	2956	6397
Втрати тиску у ПН, Па	3640	5511
Втрати тиску в повітропроводі гарячого дуття на ділянці 1 (від ПН до входу у прямий повітропровід гарячого дуття), Па	5052	7113
Втрати тиску в повітропроводі гарячого дуття на ділянці 2 (від входу у прямий повітропровід гарячого дуття до кільцевого повітропроводу), Па	1605	2219
Кільцевий повітропровід і фурми доменної печі, Па	2086	2933
Загальні втрати тиску в повітропроводах холодного і гарячого дуття, Па	17041	24173
Необхідний тиск повітря перед входом у повітропровід холодного дуття, Па	399523	406633

Газодинамічні розрахунки повітропроводів холодного та гарячого дуття виконували за рекомендаціями роботи [13]. Результати цих розрахунків наведені в таблиці 3, з якої видно, що при збільшенні витрат дуття значно зростають втрати його тиску. Для варіанту 1, коли нагріваються  $2950 \text{ м}^3/\text{хв}$  дуття, втрати тиску складають  $17041 \text{ Па}$ , а необхідний тиск після турбоповітродувки –  $399523 \text{ Па}$ . При збільшенні витрат дуття до  $3500 \text{ м}^3/\text{хв}$  (варіант 3) втрати тиску збільшуються в 1,4 рази до  $24173 \text{ Па}$ , а необхідний тиск холодного дуття – до  $406633 \text{ Па}$ .

Виконано розрахунки втрат температури гарячого дуття по довжині його тракту. Розрахункова температура гарячого дуття, що подається в доменну піч відрізняється від температури на виході із ПН, так як існують втрати теплоти, які залежать від довжини тракту гарячого дуття. Всю довжину тракту умовно ділили на дві ділянки.

Ділянка через яку не весь час циркулює дуття працює в нестаціонарному режимі. В період коли дуття не проходить через цю ділянку, кожух повітропроводу втрачає теплоту у довкілля, що призводить до зниження температури футерівки повітропроводу гарячого дуття. Коли через цю

ділянку подається гаряче дуття, то частина його теплоти витрачається на нагрівання футерівки повітропроводу, що викликає зниження температури дуття на цій ділянці.

Друга ділянка відрізняється тим, що через неї весь час здійснюється подача гарячого дуття. Вона працює в стаціонарному режимі. На цій ділянці зниження температури дуття буде значно меншим та

пов'язано тільки з процесом стаціонарних втрат теплоти в навколишнє середовище теплопровідністю.

Результати розрахунків наведені в табл. 4, з якої видно, що зменшення температури гарячого дуття на шляху від ПН до фурм доменної печі складає 20,8 °С для варіанту 1 та 17,7 °С – для варіанту 3.

Таблиця 4. Зниження температури гарячого дуття для 1 та 3 варіантів роботи повітронагрівачів

Параметр	Номер варіанту	
	1	3
Ділянка, що працює в нестаціонарному режимі:		
– температура гарячого дуття на початку ділянки, °С	1190	1160
– температура гарячого дуття в кінці ділянки, °С	1174	1146
– зниження температури дуття на 1 м довжини ділянки, °С/м	0,606	0,515
– зниження температури дуття на ділянці, °С	16	14
Ділянка, що працює в стаціонарному режимі:		
– температура гарячого дуття на початку ділянки, м	1174	1146
– температура гарячого дуття в кінці ділянки, °С	1169	1142
– зниження температури дуття на 1 м довжини ділянки, °С/м	0,12	0,103
– зниження температури дуття на ділянці, °С	5	4
Зниження температури дуття на 1 м повітропроводу гарячого дуття, °С/м	0,313	0,266
Загальне зниження температури дуття в повітропроводі гарячого дуття, °С	21	18
Температура гарячого дуття біля кільцевого повітропроводу доменної печі, °С	1169	1142

Для визначення необхідного тиску повітря і газу перед пальником, а також тяги димаря виконано газодинамічні розрахунки при русі димових газів через ПН і димовий тракт. Результати розрахунків наведено в таблиці 5. З таблиці видно, що

максимальні втрати тиску димових газів мають місце в насадці повітронагрівача і при збільшенні витрат дуття з 2950 до 3500 м<sup>3</sup>/хв вони збільшуються з 1607 до 2977 Па.

Таблиця 5. Результати газодинамічного розрахунку повітронагрівачів

Параметр	Номер варіанту	
	1	3
Втрати тиску в пальнику по газовому тракту, Па	326	465,3
Втрати тиску в пальнику по повітряному тракту, Па	400	594
Втрати тиску в камері горіння і підкупольному просторі, Па	– 296	– 248
Втрати тиску в насадці повітронагрівача, Па	1607	2977
Втрати тиску в димових патрубках повітронагрівача, Па	816	1173
Втрати тиску в димовому борові, Па	170	245,6
Тяга димової труби, Па	– 300	– 283
Тиск газу перед пальником, Па	3823	5830
Тиск повітря перед пальником, Па	3897	5958

Димар практично не впливає на створення умов для евакуації димових газів. При висоті димаря 60 м для варіанту 1 його ефективна тяга складає 300 Па, а загальні втрати тиску димових газів складають 2723 Па з урахуванням тяги димаря. Димові гази евакууються в основному за рахунок тиску газу і вентиляторного повітря. При цьому розрахункове значення тиску компонентів спалення повинно бути на 1500-1600 Па більше загальних втрат тиску димових газів з урахуванням часткового заправлення каналів насадки та унеможливлення явища пульсаційного горіння газу.

Існуючі пальники забезпечують максимальний тиск повітря 3000-3500 Па. Для підвищення тиску повітря до необхідних значень 5958 Па (варіант 3) рекомендується використовувати централізовану подачу повітря одним потужним вентилятором. Забезпечення тиску доменного газу до 6000 Па зазвичай не викликає труднощів.

### Висновки

1. Теплота згорання доменного газу недостатня для нагрівання дуття до високої температури. При теплоті згорання доменного газу 3085 кДж/м<sup>3</sup>

температура під куполом складає 1168 °С, а дуття – 1037 °С. Для забезпечення температури під куполом 1350 °С необхідно доменний газ збагачувати природним до вмісту природного газу в природно-доменній суміші 5,55 %.

2. При збільшенні витрати дуття з 2950 до 3500 м<sup>3</sup>/хв необхідно підвищувати теплову потужність повітрянагрівачів до максимально можливих значень. При цьому температура горячого дуття зменшується на 30 °С (з 1190 до 1160 °С).

3. Різниця між температурами під куполом і горячого дуття характеризує інтенсивність теплообміну в насадці повітрянагрівачів. При збільшенні витрат дуття з 2950 до 3500 м<sup>3</sup>/хв і при температурі під куполом 1350 °С ця різниця відповідно складає 160 і 190 °С.

4. При аналізі параметрів експлуатації комплексу «ПН - доменна піч» використовують поняття питомої поверхні нагрівання, коли величина загальної поверхні нагрівання блоку повітрянагрівачів відноситься до величини об'єму доменної печі. Для насадки з каналами 30 мм питома поверхня нагрівання складає 105 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Для доменних печей такого ж об'єму, які експлуатуються при різній інтенсивності доменного процесу доцільно загальною поверхню нагрівання повітрянагрівачів відносити до витрат дуття. При цьому норма питомої поверхні нагрівання складає 52,5 м<sup>2</sup>/(хв·м<sup>3</sup>). При збільшенні витрат дуття до 3500 м<sup>3</sup>/хвилину ця питома поверхня нагрівання зменшується відповідно до 50,5 м<sup>2</sup>/(хв·м<sup>3</sup>), що і є основною причиною зниження температури дуття.

5. Умовою недопущення пульсації полум'я при горінні газу в камері спалювання ПН є приблизна

рівність швидкостей газу, повітря і газоповітряної суміші у пальнику, з умов не перевищування величини питомого навантаження камери спалення 10 МВт/м<sup>2</sup>. Для варіантів 1 і 3 ці умови наявні.

6. Розрахункова температура горячого дуття, що подається в доменну піч, відрізняється від температури дуття на виході із повітрянагрівачів і залежить від довжини і виду футерівки тракту горячого дуття, витрати і температури дуття. При збільшенні витрати дуття з 2950 до 3500 м<sup>3</sup>/хв зниження температури горячого дуття незначно зменшується (з 21 до 18 °С).

7. Втрати тиску по трактам холодного і горячого дуття значно впливають на необхідний тиск після турбоповітродувки при заданому значенні тиску горячого дуття на фурмах доменної печі. Аналіз розрахунків показав, що для умов вибраної доменної печі існуюче обладнання, яке включає турбоповітродувку, тракти холодного і горячого дуття і повітрянагрівачі з умовою їх модернізації, може бути використано при підвищенні інтенсивності доменного процесу, коли збільшуються витрати дуття.

8. При підвищенні витрати дуття необхідно збільшувати витрати газу, що призводить до підвищення витрати димових газів і втрат їх тиску. Існуючий димар мало впливає на умови евакуації димових газів із повітрянагрівачів. Ця функція, в основному, здійснюється за рахунок тиску компонентів спалення. Рекомендовано використання централізованої подачі повітря з використанням одного вентилятора високої продуктивності.

#### Перелік посилань

1. Gantenberg M., Schaub E., Allmannsdörfer R., Münzer J. Comparison of different hot blast stove designs. Stahl und eisen. 2013. Vol. 133, No. 9. P. 33
2. Zhang F., Li X., Hu Z. Research on high efficiency energy conversion technology for modern hot blast stove. Energy Technology 2018: Carbon Dioxide Management And Other Technologies. 2018. P. 133-152. [http://doi.org/10.1007/978-3-319-72362-4\\_12](http://doi.org/10.1007/978-3-319-72362-4_12)
3. Грес Л. П., Карпенко С. А., Мазов С. В. Повышение энергоэффективности нагрева доменного дутья. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2012. № 7. С. 19-20
4. Патент на корисну модель № 38746, Україна, С 21 В 9/10. Насадка доменного повітрянагрівача. Опубл. 12.01.2009. Бюл. № 1.
5. Zhang Q., Tang Y. Numerical study of the influence of regenerator structure on the performance of hot blast stoves. Metal. 2024. Vol. 14. No. 8, 869. <http://doi.org/10.3390/met14080869>
6. Патент 61274, Україна, С 21 В 9/10. Повітрянагрівач доменної печі. Опубл. 17.07.2011. Бюл. № 13.
7. Патент 77201, Україні, С 21 В 9/02. Спосіб реконструкції повітрянагрівачів з вбудованою камерою горіння. Опубл. 15.11.2006. Бюл. № 11.
8. Qi F., Liu Z., Yao C., Li B. Numerical study and structural optimization of a top combustion hot blast stove. Advances in Mechanical Engineering. 2015. Vol. 7. No. 2. <http://doi.org/10.1155/2014/709675>
9. Zhang, Q., Chen, L., Ma, X., Zhao, C. Numerical study of combustion and air supply characteristics and structural optimization of top combustion hot blast stoves. ISIJ International. 2021. Vol. 61, No. 1. P. 62-70. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-119>
10. Товаровский І. Г. Нормативна оцінка впливи параметрів доменної плавки на витрати коксу та продуктивність. Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. 2014. Вип. 28. С. 117-131.
11. Повышение энергоэффективности нагрева доменного дутья: монография/ Л. П. Грес и др. Дніпро, 2021. 612 с
12. Грес Л. П., Карпенко С. А., Миленина А. Е. Теплообменники доменных печей : монография. Днепропетровск : Пороги, 2012. 491 с.
13. Металлургические печи. Теория и расчеты. В 2-х т. Т. 2 / Под общ. ред. В. И. Тимошпольского и В. И. Губинского. – Минск : Беларус. наука. 2007. 832 с.
14. Нормы технологического проектирования доменных цехов : ОНТТУ 1-1-94.- Днепропетровск, УкрГипромет, 1994. 45 с.

## References

1. Gantenberg, M., Schaub, E., Allmannsdörfer, R., & Münzer, J. (2013). Comparison of different hot blast stove designs. *Stahl und Eisen*, 133 (9), 33
2. Zhang, F., Li, X., & Hu, Z. (2018). Research on high efficiency energy conversion technology for modern hot blast stove. *Energy Technology 2018: Carbon Dioxide Management And Other Technologies*, 133-152. [http://doi.org/10.1007/978-3-319-72362-4\\_12](http://doi.org/10.1007/978-3-319-72362-4_12)
3. Gres, L. P., Karpenko, S. A., & Mazov, S. V. (2012). Povyshenie energoeffektivnosti nagreva domennogo dutia. *Metallurgicheskaia i Gornorudnaia Promyshlennost* (7), 19-20
4. Patent No. 38746, Ukraine, C 21 B 9/10. (2009). *Nasadka domennoho povitronahrivacha*. Bul. No. 1
5. Zhang, Q., & Tang, Y. (2024). Numerical study of the influence of regenerator structure on the performance of hot blast stoves. *Metal*, 14 (8), 869 <http://doi.org/10.3390/met14080869>
6. Patent No. 61274, Ukraine, C 21 B 9/10. (2011). *Povitronahrivach domennoi pechi*. Bul. No.13
7. Patent No. 77201, Ukraine, C 21 B 9/02. (2006). *Sposib rekonstruktsii povitronahrivachiv z vbudovanoi kamerioi horinnia*. Bul. No. 11
8. Qi, F., Liu, Z., Yao, C., & Li, B. (2015). Numerical study and structural optimization of a top combustion hot blast stove. *Advances in Mechanical Engineering*, 7 (2). <http://doi.org/10.1155/2014/709675>
9. Zhang, Q., Chen, L., Ma, X., & Zhao, C. (2021). Numerical study of combustion and air supply characteristics and structural optimization of top combustion hot blast stoves. *ISIJ International*, 61 (1), 62-70. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-119>
10. Tovarovskyi, I. H. (2014). Normatyvna otsinka vplyvy parametriv domennoi plavky na vytraty kosu ta produktyvnist. *Fundamentalni ta Prykladni Problemy Chornoj Metalurhii*, 28, 117-131
11. Gres, L. P. (2021). *Povyshenie energoeffektivnosti nagreva domennogo dutia*. Dnipro
12. Gres, L. P., Karpenko, S. A., & Milenina, A. E. (2012). *Teploobmenniki domennykh pechei*. Dnepropetrovsk: Porogi
13. Timoshpolskii, V. I. & Gubinskii, V. I. (Eds.) (2007). *Metallurgicheskie pechi. Teoriia i raschety*. Vol. 2. Minsk: Belarus. nauka
14. *Normy tekhnologicheskogo proektirovaniia domennykh tcekhov. ONTTU 1-1-94*. (1994). Dnepropetrovsk, UkrGiprommez

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.10.2024  
Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.10.2024