

УДК 669.162.231/.238

**М. В. Петряков**<sup>1</sup>, директор з інжинірингу**Л. П. Грес**<sup>2</sup>, д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-5343-3438**О. В. Гупало**<sup>2</sup>, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0003-3145-9220**В. І. Верещак**<sup>3</sup>, директор**О. О. Єрємін**<sup>2</sup>, д.т.н., проф., ORCID 0000-0001-8306-578X**А. С. Григор'єв**<sup>2</sup>, студент<sup>1</sup> ПАТ "Запоріжсталь"<sup>2</sup> Український державний університет науки і технологій<sup>3</sup> ТОВ - НВФ "КОШ"

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СУМІШІ ПОВІТРЯ, ДИМОВИХ ГАЗІВ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО КИСНЮ В ЯКОСТІ ОКИСНЮВАЧА ПРИ ОПАЛЕННІ ДОМЕННИХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ

**Анотація.** Підвищення температури нагріву доменного дуття є одним із відомих способів економії коксу при виробництві чавуну. Для нагрівання дуття використовуються повітрянагрівачі, які зазвичай опалюються доменним газом. Оскільки склад і теплота згоряння доменного газу недостатні для досягнення температури горіння доменного газу, яка забезпечує достатнє підігрівання насадок повітрянагрівачів для нагрівання дуття на рівні 1160-1230 °С, використовуються різні методи збільшення температури горіння доменного газу. В даній роботі досліджено ефективність застосування одного з таких методів – використання в якості окиснювача для спалення доменного газу в повітрянагрівачах суміші повітря, димових газів та технологічного кисню. Для підготовки суміші блок повітрянагрівачів оснащується додатковим обладнанням: теплогенератором для спалювання доменного газу с атмосферним повітрям, та змішувачем, в якому високотемпературні димові гази, що утворюються при спалювання палива в теплогенераторі, змішуються з атмосферним повітрям та технологічним киснем з утворенням повітря-димової суміші у складі якої міститься 21 % кисню. Використання підготованої таким чином суміші збільшує температуру горіння палива в повітрянагрівачах і забезпечує підвищення температури нагріву насадки, що в свою чергу сприяє підвищенню температури нагріву доменного дуття. Результати роботи містять порівняння ефективності даного методу з іншими відомими методами збільшення температури горіння палива в повітрянагрівачах: збагачення доменного газу природнім, підігрів компонентів горіння перед спалюванням палива в повітрянагрівачах; збагачення повітря горіння киснем. В роботі показано, що використання повітря-димової суміші при інших рівних умовах, має деякі переваги у порівнянні з іншими методами, а саме не призводить до суттєвого зниження виходу димових газів, які утворюються при спалюванні палива в повітрянагрівачах, що не погіршує теплообмін в насадці теплообмінників, а також підвищує повноту використання власних

енергоресурсів підприємства (доменного газу і технологічного кисню) при наявності їх залишків. До недоліків використання повітро-димової суміші слід віднести можливість утворення вибухо-небезпечної суміші під час змішування технологічного кисню з високотемпературними продуктами згоряння палива, які можуть містити угарний газ. Тому питання безпечної реалізації змішування димових газів, кисню і атмосферного повітря потребують подальшого дослідження і детальної розробки конструкції змішувача.

**Ключові слова:** повітрянагрівач, природний газ, доменний газ, технологічний кисень, вторинні енергоресурси, теплогенератор.

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

**Вступ.** На металургійних підприємствах для опалення доменних повітрянагрівачів в якості основного палива використовується доменний газ. В залежності від складу палива і вмісту в ньому водяної пари теплота згоряння доменного газу зазвичай складає 3,0-3,2 МДж/м<sup>3</sup>. Така калорійність доменного газу не забезпечує калориметричну температури горіння палива 1440-1370 °С, яка необхідна для досягнення температур під куполом повітрянагрівачі 1300-1350 °С і не дозволяє забезпечити температуру нагріву дуття на рівні 1160-1230 °С [1]. Зниження температури нагріву дуття призводить до збільшення витрат коксу на виробництво чавуну, що негативно впливає на економічні показники доменного процесу, збільшуючи собівартість продукції. Тому будь-які заходи, спрямовані на підвищення температури дуття шляхом удосконалення роботи повітрянагрівачів, у тому числі – підвищення температури горіння палива та температури під куполом повітрянагрівачів, є актуальними.

Калориметрична температура горіння палива залежить від складу палива, теплоти підігріву компонентів горіння (температури підігріву газу та повітря горіння) та вмісту кисню в повітрі горіння. Для підвищення калориметричної температури горіння палива зазвичай використовують наступні способи: збагачення доменного газу висококалорійним паливом (природним або коксовим газом); підігрів палива та повітря горіння перед спалюванням; збагачення повітря горіння киснем [2].

Проте, у зв'язку зі значною ціною природного газу у порівнянні з вторинними паливами, його використання для збільшення калорійності палива для доменних повітрянагрівачів в теперішній час є

нераціональним. Використання коксового газу теж має суттєвий недолік, пов'язаний з вмістом сірководню в його складі, оскільки при спаленні сірководню утворюються оксиди сірки. Збагачення доменного газу коксовим призводить до збільшення оксидів сірки в продуктах згоряння палива, що при певних умовах знижує тривалість експлуатації теплообмінників системи утилізації теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів та негативно впливає на стійкість футерівки димового тракту [3-5].

Згідно результатам досліджень, наведеним в роботах [2, 6, 7], найбільш перспективними заходами з підвищення температури горіння доменного газу є збільшення температури компонентів горіння перед спалюванням та збагачення повітря горіння технологічним киснем.

В той же час в роботі [8] запропоновано альтернативні технічні рішення щодо збільшення температури горіння доменного газу, які передбачають реконструкцію систем підготовки компонентів горіння перед спалюванням з встановленням додаткового обладнання, схему якого наведено на рис. 1.

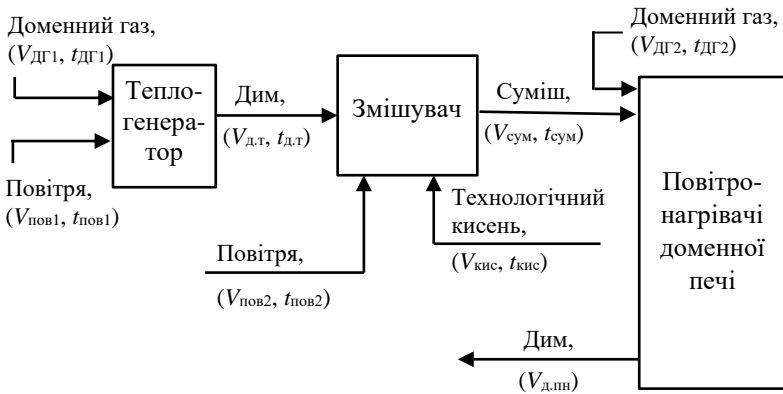


Рисунок 1 – Схема підготовки компонентів горіння перед спалюванням в доменних повітрянагрівачах. Умовні позначення:  $V$  – витрата теплоносія,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;  $t$  – температура теплоносія,  $^{\circ}\text{C}$ .

Схема передбачає спалювання додаткового доменного газу ( $V_{дг1}$ ) в теплогенераторі з атмосферним повітрям ( $V_{пов1}$ ) з подальшим змішуванням продуктів згоряння палива, що відходять з теплогенератора ( $V_{д.т}$ ), у змішувачі з атмосферним повітрям ( $V_{пов2}$ ) та технологічним киснем ( $V_{кис}$ ). Таким чином на виході зі змішувача утворюється повітря-димово суміш ( $V_{сум}$ ), у складі якої міститься 21 об'ємний відсоток кисню. Далі ця суміш подається в якості окиснювача

на спалювання доменного газу ( $V_{ДГ2}$ ) в повітрянагрівачі доменної печі. При цьому в залежності від обладнання повітрянагрівачів системою утилізації теплоти відхідних димових газів, у теплогенератор, змішувач та повітрянагрівачі доменної печі можуть подаватися відповідно або холодні, або підігріті в теплообмінниках атмосферне повітря та доменний газ.

Метою даного дослідження є визначення ефективності використання суміші повітря, димових газів та технологічного кисню в якості окиснювача при опаленні доменних повітрянагрівачів у порівнянні з відомими та більш простими способами підвищення температури горіння доменного газу в повітрянагрівачах: збагаченням доменного газу природним, збільшенням температури компонентів горіння перед спалюванням, збагаченням повітря горіння технологічним киснем.

**Методика дослідження.** Для визначення ефективності використання схеми підготовки теплоносіїв, наведеної на рис. 1, розроблено методику розрахунку калориметричної температури горіння доменного газу та температури під куполом повітрянагрівачів, згідно якої в якості вихідних даних задаються:

- склад сухого доменного газу ( $CO, H_2, CO_2, O_2, N_2, H_2S$ , в об'ємних відсотках), його вологість ( $W_{ДГ}$ , г/м<sup>3</sup>) та умови спалювання – коефіцієнт витрати повітря ( $n$ ), вміст кисню в атмосферному повітрі (21%);
- витрати та температури доменного газу, що подається в теплогенератор ( $V_{ДГ1}, t_{ДГ1}$ ) та повітрянагрівачі доменної печі ( $V_{ДГ2}, t_{ДГ2}$ );
- температури повітря, що подається на спалювання доменного газу в теплогенератор ( $t_{пов1}$ ) та до змішувача ( $t_{пов2}$ );
- температура технологічного кисню ( $t_{кис}$ );
- коефіцієнти теплових втрат в теплогенераторі ( $\eta_1$ ), змішувачі ( $\eta_2$ ) та пірометричний коефіцієнт для повітрянагрівачів ( $\eta_3$ ).

За методикою, наведеною в [1], виконуються розрахунки горіння доменного газу в теплогенераторі з визначенням теплоти згоряння палива ( $Q_H^p$ , Дж/м<sup>3</sup>), теоретичної ( $L_0$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) і дійсної витрат повітря ( $L_n$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>); питомого виходу продуктів згоряння ( $v_{д.т}$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) та їх складу ( $CO_{2\ д.т}$ ,  $N_{2\ д.т}$ ,  $H_2O_{д.т}$ ,  $O_{2\ д.т}$ ,  $SO_{2\ д.т}$ , об'ємні відсотки), залежності ентальпії димових газів ( $i_{д.т}$ , Дж/м<sup>3</sup>) від температури; калориметрична температура горіння доменного газу в теплогенераторі ( $t_{кал.т}$ , °C). Витрати повітря, для спалювання доменного газу, продуктів згоряння, що утворюються від його спалювання та їх температура визначаються за формулами:

$$V_{пов1} = V_{ДГ1} \cdot L_n, \text{ м}^3/\text{год}; \quad (1)$$

$$V_{д.т} = V_{ДГ1} \cdot v_{д.т}, \text{ м}^3/\text{ГОД}; \quad (2)$$

$$t_{д.т} = t_{кал.т} \cdot \eta_1, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3)$$

Для забезпечення якісного перемішування окиснювача з горючими компонентами палива при його спалюванні в повітрянагрівачах частка кисню в повітряно-димовій суміші на виході зі змішувача повинна відповідати частці кисню в атмосферному повітрі – 0,21. З рівняння матеріального балансу для змішувача по кисню отримаємо:

$$0,21 = \frac{V_{O_{2,д.т}} + V_{кис} + 0,21 \cdot V_{пов2}}{V_{д.т} + V_{кис} + V_{пов2}}, \text{ м}^3/\text{ГОД}, \quad (4)$$

де  $V_{O_{2,д.т}} = 0,01 \cdot O_{2,д.т} \cdot V_{д.т}$  – витрата кисню, що входить до складу димових газів, які покидають теплогенератор,  $\text{м}^3/\text{ГОД}$ ;  $O_{2,д.т}$  – вміст кисню в складі продуктів згоряння на виході з теплогенератора, об'ємні відсотки.

З рівняння (4) визначається витрата технологічного кисню, який подається у змішувач:

$$V_{кис} = \frac{0,21 \cdot V_{д.т} - V_{O_{2,д.т}}}{0,79}, \text{ м}^3/\text{ГОД}. \quad (5)$$

Теоретична ( $V_{пов2}^{теор}$ ) і дійсна ( $V_{пов2}$ ) витрати повітря, що подається у змішувач визначаються з рівняння:

$$V_{пов2}^{теор} = \frac{V_{теор} - V_{O_{2,д.т}} - V_{кис}}{0,21}, \text{ м}^3/\text{ГОД}, \quad (6)$$

$$V_{пов2} = n \cdot V_{пов2}^{теор}, \text{ м}^3/\text{ГОД}, \quad (7)$$

де  $V_{теор} = 0,01 \cdot [0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 2 \cdot CH_4 + 1,5 \cdot H_2S - O_2] \cdot V_{ДГ1}$  – теоретична витрата кисню для спалювання доменного газу в теплогенераторі,  $\text{м}^3/\text{ГОД}$ .

Витрата повітряно-димової суміші на виході зі змішувача, яка подається на спалювання палива до повітрянагрівачів, складає:

$$V_{сум} = V_{д.т} + V_{кис} + V_{пов2}, \text{ м}^3/\text{ГОД}, \quad (8)$$

а її температура ( $t_{сум}$ ) визначається з рівняння теплового балансу змішувача:

$$Q_{сум} = Q_{д.т} + Q_{кис} + Q_{пов2}, \quad (9)$$

де  $Q_{\text{сум}} = V_{\text{сум}} \cdot i_{\text{сум}}$  – теплота повітро-димової суміші на виході зі змішувача, Вт;  $Q_{\text{д.т}} = V_{\text{д.т}} \cdot i_{\text{д.т}}^{\text{д.т}}$  – теплота, яка вноситься в змішувач з димовими газами, що надходять з теплогенератора, Вт;  $Q_{\text{кис}} = V_{\text{кис}} \cdot i_{\text{кис}}^{\text{кис}}$  – теплота, що вноситься в змішувач з технологічним киснем, Вт;  $Q_{\text{пов2}} = V_{\text{пов2}} \cdot i_{\text{пов2}}^{\text{пов2}}$  – теплота, що вноситься в змішувач з повітрям, Вт;  $i_{\text{сум}}^{\text{сум}}$ ,  $i_{\text{д.т}}^{\text{д.т}}$ ,  $i_{\text{кис}}^{\text{кис}}$ ,  $i_{\text{пов2}}^{\text{пов2}}$  – ентальпії, повітро-димової суміші, диму, технологічного кисню та повітря, розраховані при відповідних температурах  $t_{\text{сум}}$ ,  $t_{\text{д.т}}$ ,  $t_{\text{кис}}$ ,  $t_{\text{пов2}}$ , Дж/м<sup>3</sup>.

Склад повітро-димової суміші (в об'ємних відсотках) розраховується за формулами:

$$CO_{2 \text{ сум}} = \frac{CO_{2 \text{ д.т}} \cdot V_{\text{д.т}}}{V_{\text{сум}}}, \quad (10)$$

$$N_{2 \text{ сум}} = \frac{79 \cdot V_{\text{пов2}} + N_{2 \text{ д.т}} \cdot V_{\text{д.т}}}{V_{\text{сум}}}, \quad (11)$$

$$H_{2O \text{ сум}} = \frac{H_{2O \text{ д.т}} \cdot V_{\text{д.т}}}{V_{\text{сум}}}, \quad (12)$$

$$O_{2 \text{ сум}} = \frac{100 \cdot V_{\text{кис}} + O_{2 \text{ д.т}} \cdot V_{\text{д.т}} + 21 \cdot V_{\text{пов2}}}{V_{\text{сум}}}, \quad (13)$$

$$SO_{2 \text{ сум}} = \frac{SO_{2 \text{ д.т}} \cdot V_{\text{д.т}}}{V_{\text{сум}}}. \quad (14)$$

Далі виконується розрахунок спалювання палива в повітрянагрівачі з урахуванням складу повітро-димової суміші. Під час розрахунку визначаються:

– питомі об'єми окремих газів в продуктах згоряння палива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{CO_{2 \text{ пн}}} = 0,01 \cdot (CO + CO_2 + CH_4 + \sum m \cdot C_m H_n) + \frac{CO_{2 \text{ сум}} \cdot V_{\text{сум}}}{100 \cdot V_{\text{ДГ2}}}; \quad (15)$$

$$V_{H_{2O \text{ пн}}} = 0,01 \cdot \left( H_2 + H_2O + H_2S + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n \right) + \frac{H_{2O \text{ сум}} \cdot V_{\text{сум}}}{100 \cdot V_{\text{ДГ2}}}; \quad (16)$$

$$V_{N_{2 \text{ пн}}} = 0,01 \cdot N_2 + \frac{N_{2 \text{ сум}} \cdot V_{\text{сум}}}{100 \cdot V_{\text{ДГ2}}}; \quad (17)$$

$$V_{O_2 \text{ пн}} = 0,21 \cdot (n-1) \cdot \frac{V_{\text{пов2}}^{\text{теор}}}{V_{\text{ДГ2}}}; \quad (18)$$

$$V_{SO_2 \text{ пн}} = 0,01 \cdot H_2S + \frac{SO_2 \text{ сум} V_{\text{сум}}}{100 \cdot V_{\text{ДГ2}}}. \quad (19)$$

– питомий вихід димових газів

$$\nu_{\text{д.пн}} = V_{CO_2 \text{ пн}} + V_{H_2O \text{ пн}} + V_{N_2 \text{ пн}} + V_{O_2 \text{ пн}} + V_{SO_2 \text{ пн}}, \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (20)$$

– склад димових газів

$$CO_2 \text{ пн} = \frac{V_{CO_2 \text{ пн}} \cdot 100}{\nu_{\text{д.пн}}}; \quad H_2O \text{ пн} = \frac{V_{H_2O \text{ пн}} \cdot 100}{\nu_{\text{д.пн}}}; \quad N_2 \text{ пн} = \frac{V_{N_2 \text{ пн}} \cdot 100}{\nu_{\text{д.пн}}};$$

$$O_2 \text{ пн} = \frac{V_{O_2 \text{ пн}} \cdot 100}{\nu_{\text{д.пн}}}; \quad SO_2 \text{ пн} = \frac{V_{SO_2 \text{ пн}} \cdot 100}{\nu_{\text{д.пн}}}. \quad (21)$$

Калориметрична температура горіння палива розраховується за визначеним складом продуктів згорання палива в повітрянагрівачі як:

$$t_{\text{кал.пн}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{сум}} + i_{\text{ДГ2}}^{\text{т}}}{\nu_{\text{д.пн}} \cdot C_{\text{д.пн}}^{\text{т}}}, \quad (22)$$

де  $i_{\text{ДГ2}}^{\text{т}}$  – ентальпія доменного газу при температурі  $t_{\text{ДГ2}}$ , Дж/м<sup>3</sup>;

$C_{\text{д.пн}}^{\text{т}}$  – теплоємність продуктів згорання палива в повітрянагрівачі при  $t_{\text{кал.пн}}$ , Дж/(м<sup>3</sup>·К).

Витрата димових газів та температура під куполом повітрянагрівачів визначаються як:

$$V_{\text{д.пн}} = \nu_{\text{д.пн}} \cdot V_{\text{ДГ2}}, \text{ м}^3/\text{год}; \quad (23)$$

$$t_{\text{куп}} = \eta_3 \cdot t_{\text{кал.пн}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (24)$$

За даними роботи [2] в повітрянагрівачах доменних печей досягається температура нагріву дуття на 130-140 °С нижча за температуру під куполом:

$$t_{\text{дуття}} = t_{\text{куп}} - (130 \div 140), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (25)$$

**Вихідні дані та результати дослідження.** Для визначення ефективності використання суміші повітря, димових газів та технологічного кисню в якості окиснювача при опаленні доменних повітрянагрівачів виконано розрахунки температури під куполом повітрянагрівачів та температури дуття для наступних варіантів:

1) базовий варіант – опалення повітрянагрівачів доменним газом (ДГ) при відсутності попереднього підігріву компонентів горіння;

2) опалення повітрянагрівачів змішаним газом, в якості якого використовується природно-доменна суміш (ПДС) з вмістом природного газу в суміші 2,18 та 3,54 %;

3) опалення повітрянагрівачів доменним газом за умови, що компоненти горіння (доменний газ та повітря) підігріваються перед спалюванням до 150 °С в теплообмінниках системи утилізації теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів;

4) опалення повітрянагрівачів доменним газом при збагаченні повітря горіння технологічним киснем до вмісту кисню в повітрі горіння 27% та 31,05 % за умов, що всі компоненти горіння не підігріваються перед спалюванням;

5) опалення повітрянагрівачів доменним газом з використанням в якості окиснювача повітряно-димової суміші за умови, що всі компоненти горіння, які поступають у теплогенератор та повітрянагрівачі, а також технологічний кисень і повітря, що подаються в змішувач, не підігріваються;

6) опалення повітрянагрівачів доменним газом з використанням в якості окиснювача повітряно-димової суміші за умови, що доменний газ і повітря, які спалюються в теплогенераторі, не підігріваються, технологічний кисень подається в змішувач без попереднього підігріву з температурою 10 °С, а повітря, що подається в змішувач, та доменний газ для опалення повітрянагрівачів підігріваються до 150 °С;

7) опалення повітрянагрівачів доменним газом з використанням в якості окиснювача повітряно-димової суміші за умови, що всі теплоносії підігріті до 150 °С за виключенням технологічного кисню, що подається у змішувач з температурою 10 °С.

Інші вихідні дані, прийняті під час розрахунків:

– склад сухого доменного газу, об'ємні відсотки:

$CO = 21,76$ ;  $H_2 = 5,45$ ;  $CO_2 = 17,84$ ;  $O_2 = 0$ ;  $N_2 = 54,95$ ;  $H_2S = 0$ ;

– вологість доменного газу  $W_{ДГ} = 49,93$  г/м<sup>3</sup>;

– коефіцієнт витрати повітря при спалюванні палива в повітрянагрівачах і в теплогенераторі  $n = 1,05$ ;

– склад природного газу, об'ємні відсотки:

$CH_4 = 95,388$ ,  $C_2H_6 = 2,405$ ,  $C_3H_8 = 0,783$ ,  $C_4H_{10} = 0,248$ ,  $C_5H_{12} = 0,054$ ,  $C_6H_{10} = 0,015$ ,  $CO_2 = 0,246$ ,  $N_2 = 0,861$ .



- природний газ сухий, вологість атмосферного повітря  $0 \text{ г/м}^3$ ;
- теплота згоряння природного газу  $36832,723 \text{ кДж/м}^3$ ;
- теплота згоряння вологого доменного газу  $3143,15 \text{ кДж/м}^3$ .
- витрата палива на блок повітрянагрівачів  $110000 \text{ м}^3/\text{год}$ .

При відсутності підігріву доменного газу і повітря їх температури, відповідно, складають  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Температура технологічного кисню  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Коефіцієнти теплових втрат в теплогенераторі і змішувачі  $\eta_1 = 0,95$ ,  $\eta_2 = 0,95$ . Пірометричний коефіцієнт для повітрянагрівачів  $\eta_3 = 0,95$  [1].

Розрахунки визначення калориметричної температури горіння палива для варіантів 1-4 виконано за методикою, наведеною в [1, 2], а для визначення температури нагріву дуття використано формулу (25). Розрахунки для варіантів 5-7 виконано за методикою, наведеною в даній роботі. Результати розрахунків зведено в табл. 1-2.

Як видно з таблиці 1, в базовому варіанті, коли повітрянагрівачі опалюються холодним доменним газом калорійністю  $3143,15 \text{ кДж/м}^3$ , а на спалювання палива подається холодне атмосферне повітря, досягається калориметрична температура горіння палива  $1273 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура під куполом повітрянагрівачів складає  $1210 \text{ }^\circ\text{C}$ , що забезпечує підігрів доменного дуття до  $1070 - 1080 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Переведення повітрянагрівачів на опалення природно-доменною сумішшю (варіант 2) калорійністю  $3877,58 \text{ кДж/м}^3$  з вмістом природного газу  $2,18 \%$  дозволяє збільшити калориметричну температуру горіння палива до  $1371 \text{ }^\circ\text{C}$ , температуру під куполом повітрянагрівачів до  $1302 \text{ }^\circ\text{C}$  і досягти збільшення температури нагріву дуття в повітрянагрівачах  $1162 - 1172 \text{ }^\circ\text{C}$ . Як показали розрахунки, досягнення максимальної температури під куполом повітрянагрівачів  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$  і відповідної їй калориметричної температури горіння палива  $1421 \text{ }^\circ\text{C}$  можливе при збільшенні частки природного газу в суміші до  $3,54 \%$  та калорійності ПДС  $4335,76 \text{ кДж/м}^3$ . Слід зауважити, що збагачення доменного газу природним призводить до збільшення витрати атмосферного повітря, що подається на спалювання палива на блок повітрянагрівачів з  $70446 \text{ м}^3/\text{год}$  до  $93544$  та  $107943 \text{ м}^3/\text{год}$  при відповідному збільшенні вмісту природного газу в суміші до  $2,18$  та  $3,54 \%$ , а також до збільшення витрати димових газів, що утворюються від спалення палива з  $166375$  до  $189816$  та  $20446 \text{ м}^3/\text{год}$  відповідно. При реалізації варіанту 2 ці зміни повинні бути враховані шляхом забезпечення продуктивності тяго-дуттьових пристроїв, які обслуговують роботу повітрянагрівачів.

Економічне обґрунтування впровадження варіанту 2 повинно враховувати, що переведення печі на опалення ПДС без збільшення загальної витрати палива на блок повітрянагрівачів потребує додаткової

витрати 2398 – 3894 м<sup>3</sup>/год природного газу та забезпечує вивільнення 2398 – 3894 м<sup>3</sup>/год доменного газу, який може бути використано в інших технологічних агрегатах підприємства, що доцільно передбачити перед впровадженням заходу. Оскільки підвищення температури дуття на кожні 10 °С при його температурі більше 1000 °С забезпечує економію коксу 0,22–0,3 % [9] (або 0,9-1,2 кг/т чавуну), то при збільшенні вмісту природного газу в суміші до 2,18 та 3,54 % економія коксу відповідно складе 0,20 –0,27 % та 0,31-0,42 %.

Таблиця 1 – Вихідні дані та результатів розрахунків за варіантами 1-4

Номер варіанта	1		2		3		4	
	ДГ	ПДС	ПДС	ДГ	ДГ	ДГ	ДГ	ДГ
Паливо	ДГ	ПДС	ПДС	ДГ	ДГ	ДГ	ДГ	ДГ
Теплота згорання палива, кДж/м <sup>3</sup>	3143,15	3877,58	4335,76	3143,15	3143,15	3143,15	3143,15	3143,15
Вміст природного газу в ПДС, %	-	2,18	3,54	-	-	-	-	-
Вміст кисню в повітрі горіння, %	21	21	21	21	27	31,05	31,05	31,05
Температури, °С:								
- доменного газу	35	35	35	150	35	35	35	35
- повітря	10	10	10	150	10	10	10	10
- технологічного кисню	-	-	-	-	10	10	10	10
Витрати на блок ПН, м <sup>3</sup> /год:								
- технологічного кисню	-	-	-	-	4158	6061	6061	6061
- атмосферного повітря	70466	93544	107943	70466	50644	41591	41591	41591
- повітря, збагаченого киснем	70466	93544	107943	70466	54802	47652	47652	47652
Витрата диму від блоку ПН, м <sup>3</sup> /год	166375	189816	204446	166375	150711	143561	143561	143561
Калориметрична температура горіння палива, °С	1273	1371	1421	1371	1371	1421	1421	1421
Температура під куполом ПН, °С	1210	1302	1350	1302	1302	1350	1350	1350
Температура підігріву дуття, °С	1070-1080	1162-1172	1210-1220	1162-1172	1162-1172	1210-1220	1210-1220	1210-1220

Прийняті позначення: ДГ- доменний газ; ПДС- природно-домenna суміш; блок ПН- блок повітрянагрівачів

Таблиця 2 – Вихідні дані та результати розрахунків за варіантами 5-6

Номер варіанту	5	6	7
Паливо	ДГ	ДГ	ДГ
Температура доменного газу перед спалюванням в теплогенераторі, °С	35	35	150
Температура повітря перед спалюванням в теплогенераторі, °С	10	10	150
Витрата доменного газу на теплогенератор, м <sup>3</sup> /год	16900	6600	6200
Витрата повітря на теплогенератор, м <sup>3</sup> /год	10826	4228	3972
Температура диму на виході з теплогенератора, °С	1210	1249	1302
Витрата диму на виході з теплогенератора, м <sup>3</sup> /год	25560	9982	9377
Температура повітря на вході в змішувач, °С	10	150	150
Температура технологічного кисню на вході в змішувач, °С	10	10	10
Витрата атмосферного повітря на змішувач, м <sup>3</sup> /год	36636	57254	58054
Витрата технологічного кисню на змішувач, м <sup>3</sup> /год	6658	2600	2442
Температура повітря-димової суміші, °С	530	340	338
Витрата повітря-димової суміші, м <sup>3</sup> /год	68854	69836	69874
Температура доменного газу перед спалюванням в повітрянагрівачах, °С	35	150	150
Витрата диму від блоку ПН, м <sup>3</sup> /год	164762	165742	165781
Калориметрична температура горіння палива в ПН, °С	1421	1421	1421
Температура під куполом ПН, °С	1350	1350	1350
Температура підігріву дуття, °С	1210- 1220	1210- 1220	1210- 1220

При обладнанні повітрянагрівачів системою утилізації теплоті відхідних димових газів з середньою за цикл нагріву насадки температурою диму на виході з повітрянагрівачів 230 °С, за даними роботи [5], можливо забезпечити підігрів компонентів горіння до 150 °С (див. варіант 3 табл. 1). Досягнути більш глибокої утилізації теплоти відхідних димових газів на жаль неможливо, оскільки температура диму, що викидається в атмосферу, не повинна бути нижчою за 130 – 140 °С для запобігання конденсації парів сірчаної кислоти в теплообмінниках, лежаках повітрянагрівачів та димарі. Тому реалізація

варіанту 3 може забезпечити збільшення калориметричної температури горіння палива лише до 1371 °С і температури під куполом повітрянагрівачів до 1302 С. Це приведе до збільшення температури нагріву дуття на 90 °С і дозволить забезпечити економію коксу на 0,20 – 0,27 %. До переваг цього заходу слід віднести те, що його впровадження не потребує додаткової витрати палива, а в роботах [2, 5] наведено низку технічних рішень, захищених патентами на винаходи і спрямованих на удосконалення конструкції теплообмінників для підвищення надійності їх роботи і збільшення терміну їх експлуатації.

Варіант 4, що розглядається, передбачає використання технологічного кисню для збільшення концентрації кисню в повітрі, що подається на спалювання доменного газу в повітрянагрівачі. Як показали розрахунки (табл. 1) для збільшення калориметричної температури горіння палива, температур під куполом повітрянагрівачів та підігріву доменного дуття на 90 та 140 °С збагачення повітря горіння повинно відбуватися до вмісту кисню 27 та 31,5 % відповідно. Реалізація цього заходу немає складнощів у впровадженні, забезпечує аналогічні показники економії коксу, як і реалізація варіанту 2, проте має і свої недоліки. По-перше, підприємство повинно мати у своєму розпорядженні необхідну кількість технологічного кисню (4158 м<sup>3</sup>/год при збагаченні повітря до вмісту кисню 27 % та 6061 м<sup>3</sup>/год при вмісті кисню в повітрі горіння 31,5 %), вартість якого треба враховувати під час економічного обґрунтування заходу. По-друге, збагачення повітря горіння киснем зменшує витрати димових газів, що утворюються при опаленні повітрянагрівачів (на 9,4 та 13,7 % відповідно), що погіршує теплообмінні процеси при розігріві насадки повітрянагрівачів та може впливати на розширення діапазону зміни температури нагріву дуття на початку і наприкінці циклу його нагрівання та потребувати корегування тривалості циклів роботи блоку повітрянагрівачів.

Варіанти 1-4 є відомими способами збільшення температури нагріву дуття, які передбачають використання для спалювання палива в повітрянагрівачах атмосферного або збагаченого киснем повітря. Альтернативою цим варіантам є варіанти 5-7, що розглядаються в даній роботі і передбачають використання в якості окиснювача для спалювання палива в повітрянагрівачах заздалегідь підготовленої суміші димових газів, повітря та технологічного кисню (див. схему на рис. 1). При цьому реалізація цих варіантів забезпечує однакову калориметричну температуру горіння доменного газу в повітрянагрівачах 1421 °С, температуру під куполом повітрянагрівачів 1350 °С, збільшення температури підігріву дуття до 1210-1220 °С (тобто на 140 °С у порівнянні з базовим варіантом 1), що в свою чергу забезпечує економію коксу на виробництво чавуну 0,31-0,42 %.

Відмінність між варіантами 5-7 полягає у тому, що варіант 5 реалізується в умовах, коли блок повітрянагрівачів не обладнано системою утилізації теплоти відхідних газів і всі теплоносії попередньо не підігріваються перед їх використанням; варіант 6 передбачає попередній підігрів до 150 °С доменного газу перед спалюванням в повітрянагрівачах та підігрів до 150 °С атмосферного повітря, що йде на його спалювання, а також подається у змішувач; варіант 7 реалізується за умови підігріву всіх енергоносіїв, що використовуються в теплогенераторі, змішувачі та повітрянагрівачах за виключенням технологічного кисню, температура якого складає 10 °С.

Результати розрахунків показників роботи системи підготовки повітря-димової суміші та блоку повітрянагрівачів зведені в табл. 2. З таблиці видно, що однаковий результат (збільшення температури підігріву дуття на 140 °С) забезпечується для варіантів 5-7 при різних витратах теплоносіїв, величина яких врешті-решт і впливатиме на економічну доцільність впровадження заходу.

Так, забезпечення попереднього підігріву доменного газу і повітря приводить до суттєвого зменшення додаткової витрати доменного газу, що спалюється в теплогенераторі, з 16900 м<sup>3</sup>/год для варіанту 5 до 6600 і 6200 м<sup>3</sup>/год для варіантів 6 та 7. Аналогічним чином зменшуються і витрати технологічного кисню, що подається у змішувач, з 6658 м<sup>3</sup>/год (варіант 5) до 2600 і 2442 м<sup>3</sup>/год (варіанти 6 і 7 відповідно). При цьому підігрів доменного газу та атмосферного повітря перед спалюванням в теплогенераторі не призводить до значного скорочення витрат доменного газу та кисню на підготовку повітря-димової суміші. Тому варіант 7 хоч і виявляється найкращим з варіантів 5-7, але необхідність підведення підігрітих компонентів горіння до теплогенератора призведе до ускладнення системи трубопроводів при реалізації схеми підготовки повітря-димової суміші і доцільність реалізації варіанту 7 необхідно оцінювати окремо у порівнянні з варіантом 6 при економічному обґрунтуванні впровадження заходу в умовах конкретної виробничої ділянки доменного цеху.

Зважаючи на вищесказане, з розглянутих варіантів 5-7, найкращим варіантом, який доцільно розглядати для впровадження можна вважати варіант 6, а найгіршим є варіант 5, який забезпечує збільшення температури підігріву дуття на 140 °С при найбільших витратах доменного газу і технологічного кисню.

Порівняння варіантів 5-7 (табл. 2) з відомими способами підвищення температури підігріву доменного дуття (варіанти 2-4, табл. 1) показує, що:

– єдиним варіантом, який не потребує для впровадження наявності на підприємстві вільних енергоресурсів або розробки заходів щодо

вивільнення цих енергоресурсів з інших технологічних процесів є варіант 2, який передбачає облаштування блоку повітрянагрівачів системою утилізації теплоти відхідних газів. Але використання теплообмінників для підігрівання доменного газу та атмосферного повітря перед спалюванням не дозволяє досягнути збільшення температури підігріву дуття більше ніж на 90 °С у порівнянні з роботою повітрянагрівачів на холодному доменному газі і повітрі горіння;

- збільшення температури доменного дуття до однакової температури 1210-1220 °С може бути забезпечене при впровадженні варіантів 2, 4 або 5-7. Але реалізація варіанту 2 передбачає додаткове використання 3894 м<sup>3</sup>/год природного газу, варіанту 4 – додаткове використання 6061 м<sup>3</sup>/год технологічного кисню, варіанту 5 – додатково використання 16900 м<sup>3</sup>/год доменного газу і 6658 м<sup>3</sup>/год технологічного кисню, а варіантів 6 і 7, відповідно, 6600 і 6200 м<sup>3</sup>/год доменного газу та 2600 і 2442 м<sup>3</sup>/год технологічного кисню;

- реалізація варіантів 6 і 7 у порівнянні в варіантом 4 не призводить до суттєвого зниження витрати димових газів, які утворюються при спалюванні палива в повітрянагрівачах, що не погіршує теплообмін в їх насадках, а також потребує менших витрат технологічного кисню і дозволяє використати надлишки доменного газу при їх наявності на металургійному комбінаті;

- під час змішування високотемпературних димових газів, які можуть містити СО, з технологічним киснем та атмосферним повітрям (варіанти 5-7) виникає можливість утворення вибухо-небезпечної суміші. Питання безпеки при підготовці повітря-димової суміші та вибір конструктивних параметрів змішувача повинні обов'язково досліджуватися на етапі, що передує проектуванню обладнання.

Висновок щодо економічного ефекту від впровадження розглянутих заходів можна зробити спираючись на вартість енергоносіїв на конкретному підприємстві. Але жоден з розглянутих варіантів не може бути реалізований без реконструкції системи підготовки компонентів горіння, що подаються на спалювання палива, та/або системи утилізації теплоти відхідних димових газів повітрянагрівачів доменних печей. Вартість реконструкції буде суттєво впливати на термін окупності капіталовкладень та прийняття рішення щодо впровадження заходу в конкретних виробничих умовах.

### **Висновки**

В роботі розглянуто низку заходів, спрямованих на підвищення температури підігріву дуття при опаленні повітрянагрівачів доменним газом: збагачення доменного газу природним; підігрів доменного газу і повітря перед спалюванням; збагачення повітря горіння технологічним

киснем; використання для опалення повітрянагрівачів в якості окиснювача повітряно-димової суміші.

Визначено, що в технологічних умовах, що розглядалися, збільшення температури дуття до температури 1210-1220 °С не може бути забезпечено без наявності на підприємстві вільних, надлишкових або вивільнених з інших технологічних процесів енергоносіїв, кількість яких визначається способом підвищення калориметричної температури горіння палива в повітрянагрівачах:

- переведення повітрянагрівачів на опалення природно-доменного сумішшю з калорійністю 4335,76 кДж/м<sup>3</sup> і вмістом природного газу в суміші 3,54 % потребує додаткового використання 3894 м<sup>3</sup>/год природного газу;

- збагачення повітря горіння технологічним киснем до вмісту кисню 31,5 % може бути забезпечено за рахунок використання 6061 м<sup>3</sup>/год кисню;

- підготовка повітряно-димової суміші з подальшому її використанням в якості окиснювача в повітрянагрівачах, що опалюються доменним газом, потребує додаткової витрати 6200-6600 м<sup>3</sup>/год доменного газу та 2442-2600 м<sup>3</sup>/год технологічного кисню.

Жоден з розглянутих способів підвищення температури доменного дуття не може бути впроваджено без реконструкції системи підготовки теплоносіїв перед спалюванням та/або системи утилізації теплоти відхідних газів доменних повітрянагрівачів. Результати розрахунків, наведені в роботі, можуть використовуватися для обґрунтування економічного ефекту від впровадження заходу з врахуванням існуючих цін на енергоносії. Для умов конкретного виробництва вибір найефективнішого способу підвищення температури доменного дуття повинен здійснюватися на підставі економічних розрахунків, враховуючих вартість реконструкції, проектних та налагоджувальних робіт та терміну окупності заходів.

#### **Перелік посилань**

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

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

3. Мазур В. Л. *Металургія України: стан, конкурентноспроможність, перспективи. Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2010. № 2. С. 12-16.

4. Модлип Р. *Природный газ для промышленности – существующее положение и перспективы. Индустриал хитинг*. 1980, 47. № 2. С. 8-9, 41.

5. Грес Л. П., Карпенко С. А., Миленина А. Е. Теплообменники доменных печей: Монография. Под общей редакцией д.т.н., проф. Л. П. Греса. Днепропетровск : Пороги, 2012. 491 с.

6. Дослідження ефективності використання технологічного кисню при опаленні теплотехнічних металургійних агрегатів. / Л. П. Грес, О. В. Гупало, О. О. Єршомін, Є. О. Каракаш, Е. К. Д'якова. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2019. № 3-4. С. 14-24. <http://doi.org/10.34185/0543-5749.2019-3-4-14-24>.

7. Грес Л. П., Єршомін О. О., Гупало О. В. Вплив збагачення повітря горіння киснем на стійкість кладки доменных повітрянагрівачів. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. Вип. 36. 2022. С. 123-133. <http://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-123-133>.

8. Спосіб ступеневого нагріву газів пальника повітропідігрівника доменної печі : патент на корисну модель 152924 Україна: МПК (2023.01) C21B 9/00, C21B 9/14. № 202200001; заявл. 04.01.2022; опубл. 03.05.2023, Бюл. № 18. 3 с.

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

## References

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

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

3. Mazur, V. L. (2010). Metalurhiia Ukrainy: stan, konkurentnospromozhnist, perspektyvy. *Metalurhiia ta hirnychorudna promyslovisť*, (2), 12-16

4. Modlip, R. (1980). Prirodnyi gaz dlia promyshlennosti – sushchestvuiushchee polozenie i perspektyvy. *Industrial khiting*, 47(2), 8-9, 41

5. Gres, L. P., Karpenko, S. A., Milenina, A. E. (2012). *Teploobmenniki domennykh pechei*. Porogi

6. Gres, L. P., Gupalo, O. V., Yeromin, O. O., Karakash, Ye. O., & Diakova, E. K. (2019). Research on the efficiency of the use of process oxygen to enrich the combustion air in metallurgical heating equipment. *Metalurhiia ta hirnychorudna promyslovisť*, (3-4), 14-24. <http://doi.org/10.34185/0543-5749.2019-3-4-14-24>

7. Gres, L. P., Yeromin, O. O., & Gupalo, O. V. (2022). The influence of oxygen enrichment of combustion air on the resistance of the lining of hot-blast stoves. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 36, 123-133. <http://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-123-133>

8. Konshyn, A. (2022). Patent of Ukraine No. 152924. *Step heating of gases in a blast furnace air heater*. State Patent Office of Ukraine, Bulletin No. 18. 3 p

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



**M. V. Petriakov**<sup>1</sup>, Engineering Director

**L. P. Gres**<sup>2</sup>, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0002-5343-3438

**O. V. Gupalo**<sup>2</sup>, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0003-3145-9220

**V. I. Vereshchak**<sup>3</sup>, Director

**O. O. Yeromin**<sup>2</sup>, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0001-8306-578X

**A. S. Hryhoriev**<sup>2</sup>, Student

<sup>1</sup> PJSC Zaporozhstal

<sup>2</sup> Ukrainian State University of Science and Technologies

<sup>3</sup> Research and production company "KOSH" LLC

## **STUDY OF THE EFFICIENCY OF USING A MIX OF AIR, FLUE GASES AND PROCESS OXYGEN AS AN OXIDIZING AGENT FOR HEATING OF HOT-BLAST STOVES**

**Abstract.** Raising temperature of the blast-furnace air is one of the well-known ways to save coke in iron production. To heat the blast-furnace air, hot-blast stoves are used, which are usually heated by blast furnace gas. Since the composition and calorific value of blast furnace gas are insufficient to achieve a blast furnace gas combustion temperature that ensures sufficient heating of the nozzles of hot-blast stoves to heat the blast-furnace air at 1160-1230 °C, various methods are used to increase the blast furnace gas combustion temperature. This paper investigates the effectiveness of one of these methods – the use of a mixture of atmospheric air, flue gases, and process oxygen as an oxidant for combustion of blast furnace gas in a hot-blast stove. To prepare the mixture, the hot-blast stoves are equipped with additional equipment: a heat generator for combustion of blast furnace gas with atmospheric air, and a mixer, where high-temperature flue gases generated during fuel combustion in the heat generator are mixed with atmospheric air and process oxygen to form a gas mixture containing 21% of oxygen. The use of the gas mixture prepared in this way increases the combustion temperature of the fuel in the hot-blast stoves, provides an increase in the heating temperature of their nozzle and increases the temperature of the blast-furnace air. The results of the work include a comparison of the efficiency of this method with other known methods of increasing the combustion temperature of blast furnace gas in the hot-blast stoves: enrichment of blast furnace gas with natural gas, heating of air and blast-furnace gas before combustion, and enrichment of combustion air with process oxygen. The paper shows that the use of a mixture of atmospheric air, flue gases, and process oxygen has some advantages over other methods, namely, it does not lead to a significant reduction in the rate of flue gases generated during fuel combustion in the hot-blast stoves, does not decrease heat exchanger in the nozzles, and increases the full use of the enterprise's own energy resources (blast furnace gas and process oxygen) in the presence of their excess. The disadvantages of using the mixture include the possibility of forming an explosive mixture when mixing process oxygen with high-temperature fuel combustion products that may contain carbon monoxide. Therefore, the issues of safe implementation of mixing flue gases, process oxygen and atmospheric air require further research and detailed development of the mixer design.

**Key words:** hot-blast stove, natural gas, blast furnace gas, process oxygen, secondary energy resources, heat-generator.

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

*Стаття надійшла до редакції збірника 08.11.2023 р.*

*Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*