

УДК 681.5:669.162.23

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-5>

БЕЗУДАРНИЙ ПЕРЕХІД ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ В РЕЖИМ ДУТТЯ

Кравченко Віктор Петрович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації і комп'ютерних технологій
Державного вищого навчального закладу
«Приазовський державний технічний університет»
ORCID ID: 0000-0001-8467-7796
Scopus ID: 57202349658

Койфман Олексій Олександрович,

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0003-2075-7417
Scopus ID: 55808117000

Сімкін Олександр Ісакович,

кандидат технічних наук, професор,
професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-9939-7866
Scopus ID: 7006970867

Мірошниченко Вікторія Ігорівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-5956-7867
Scopus ID: 57205494697

Призначення повітрянагрівачів в доменному виробництві полягає в забезпеченні сталого подання гарячого дуття в доменну піч. Під час роботи блока доменних повітрянагрівачів у послідовному режимі, що передбачає функціонування одного з повітрянагрівачів у режимі дуття, тоді як інші нагріваються, стабілізація температури гарячого дуття відбувається завдяки підмішуванню холодного дуття до потоку гарячого дуття на вході до блока. Як змішувальну засувку, що є регулювальним органом системи стабілізації температури гарячого дуття, зазвичай використовують дросельний поворотний клапан із нелінійною витратною характеристикою. У момент зміни режимів роботи повітрянагрівачів відбувається різке коливання температури в межах $\pm(20-50)$ °C, гарячого дуття, яке подається в доменну піч, що, зі свого боку, суттєво впливає на перебіг доменної плавки.

Запропоновано рішення для забезпечення стабілізації температури гарячого дуття, що передбачає заміну дросельного поворотного клапана, який установлений на байпасі трубопроводу холодного дуття для змішування, на регулювальну засувку типу, аналогічного до клапана холодного дуття.

Показано, що використання запропонованого підходу дає змогу зменшити коливання температури до менш ніж ± 20 °C, що підвищить стабільність роботи доменної печі.

Ключові слова: гаряче дуття, холодне дуття, блок доменних повітрянагрівачів, стабілізація, змішувальна засувка, регулювальний дросель, регулювальна шиберна засувка, система керування.

Kravchenko Viktor, Koyfman Oleksiy, Simkin Oleksandr, Miroshnychenko Viktoriia. Bumpless transfer of hot blast stoves in on blast mode

During the operation of the hot blast stove unit in sequential mode, stabilization of the hot blast temperature is achieved by mixing cold blast into the hot blast flow at the unit's inlet. A butterfly throttle valve, traditionally used as the control mechanism, exhibits a nonlinear flow characteristic. During the switching of stoves, sharp fluctuations in the hot blast temperature occur within the range of $\pm(20-50)$ °C, which significantly impacts the operation of the blast furnace.

The article proposes stabilizing the hot blast temperature by replacing the butterfly throttle valve installed on the bypass pipeline for cold blast mixing with a regulating slide gate valve of the same type as the cold blast valve.

It has been shown that applying the proposed approach reduces temperature fluctuations to less than $\pm 20^\circ\text{C}$, improving the stability of the blast furnace operation.

Key words: hot blast, cold blast, blast furnace stove unit, stabilization, mixing valve, throttle control, regulating slide gate valve, control system.

Вступ. Стабільність температури та тиску гарячого дуття є однією з базових умов забезпечення рівного ходу доменної печі [1; 2]. Підтримання необхідної температури дуття є складним завданням, для виконання якого використовують кардинально різні підходи. Найбільш розповсюдженим є спосіб підмішування холодного дуття до гарячого, нагрітого в доменному повітрянагрівачі (далі – ПН).

Під час роботи блока повітрянагрівачів у послідовному режимі досягнення температури купола ПН, який працює в режимі нагріву дуття, значення заданої температури дуття призводить до того, що система автоматичного регулювання температури гарячого дуття повністю закриває змішувальну засувку (далі – ЗЗ). Це є сигналом закінчення роботи ПН в цьому режимі [3–5]. Необхідно від'єднати цей ПН від трубопроводу гарячого дуття й приєднати нагрітий на поточний момент ПН.

Розглянемо послідовність перемикавання повітрянагрівачів (рис. 1) за наявності трьох ПН у блоці. Перед перемиканням агрегати перебувають у таких станах:

– насадка повітрянагрівача ПН1 охолоджена, потрібно переключити на режим нагріву насадки;

– насадка ПН2 нагріта, потрібно переключити на режим нагріву гарячого дуття;

– ПН3 перебуває в режимі нагріву насадки та не готовий для перемикавання на режим нагріву гарячого дуття;

– змішувальна засувка повністю зачинена.

Перемикавання ПН2 з режиму нагріву насадки на режим дуття відбувається так. Спочатку тиск усередині нагрітого ПН2 вирівнюють із тиском дуття, для чого відкривають його клапан гарячого дуття (далі – КГД2), з'єднуючи ПН2 з трубопроводом гарячого дуття доменної печі (далі – ДП). Після цього починають відчиняти клапан холодного дуття (далі – КХД2) нагрітого ПН2. Холодне дуття, проходячи крізь насадку ПН2, нагрівається та надходить у трубопровід гарячого дуття ДП. Під час відкривання КХД2 також працює охолоджений ПН1, тобто він залишається приєднаним до трубопроводу гарячого дуття. Так, потік холодного дуття роздвоюється й проходить водночас крізь ПН1 та

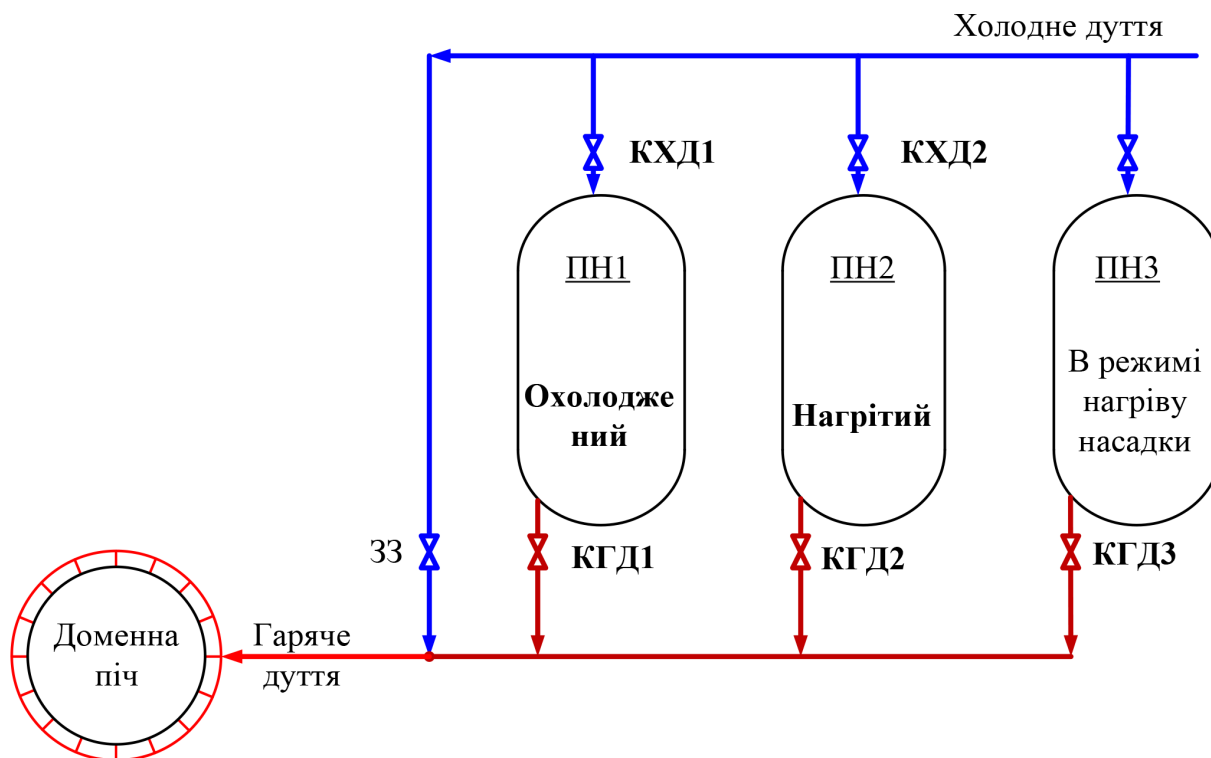


Рис. 1. Схема перемикавання повітрянагрівачів

ПН2. У момент повного відчинення КХД2, нагрітого ПН2, крізь обидва ПН1 та ПН2 проходить однакова кількість холодного дуття. Після відчинення КХД2, нагрітого ПН2, починає відчинятися ЗЗ та зачинятися КХД1, охолодженого ПН1, кількість дуття, яке проходить крізь нього, зменшується, а крізь нагрітий ПН2 та ЗЗ – збільшується. У перехідний період (відчинення КХД2 і зачинення КХД1) температура гарячого дуття ДП змінюється зі значними відхиленнями від заданого значення внаслідок відсутності автоматичного регулювання температури дуття та змішування потоків гарячого дуття охолодженого ПН1 і нагрітого ПН2. При перемиканні ПН температура дуття є нерегульованою і може зазнавати значних змін (рис. 2).

Коливання температури дуття в цей період сягає $\pm(20-50)^\circ\text{C}$ [6; 7], що є значним впливом на стабільність роботи доменної печі [1; 2]. Такі перехідні періоди відбуваються, як правило, кожні 1,5 год (середній час роботи ПН в режимі дуття) і тривають 3–5 хв, зокрема, при ручному керуванні процесом перемикання ПН.

Мета дослідження – обґрунтувати заміну дросельного поворотного клапана, встановленого на байпасі трубопроводу холодного дуття для змішування, на регульовальну засувку такого

самого шибєрного типу, як і клапан холодного дуття, для забезпечення безударного переходу повітрянагрівачів доменної печі в режим дуття та зменшення коливань температури гарячого дуття, що подається в доменну піч.

Матеріали та методи дослідження. Одним з основних напрямів зменшення коливання температури гарячого дуття при перемиканнях повітрянагрівачів є переведення роботи блока з послідовного на паралельний або попарно-паралельний режим роботи [3; 4; 8]. Окрім стабілізації температури гарячого дуття, використання паралельного режиму роботи ПН дає змогу її підвищити, але це супроводжується значним збільшенням витрати палива та має труднощі реалізації за умови наявності в блоці «слабких» повітрянагрівачів.

У світовій практиці трапляється використання додаткового пристрою – міксера (змішувальної насадки), який встановлюють замість або додатково після змішувальної засувки [4; 9; 10]. Використання цього підходу потребує значних капітальних затрат та технологічних можливостей для реалізації.

Також відомо, що для стабілізації температури дуття на деяких ДП в період перемикання відчиняють додатковий клапан холодного дуття,

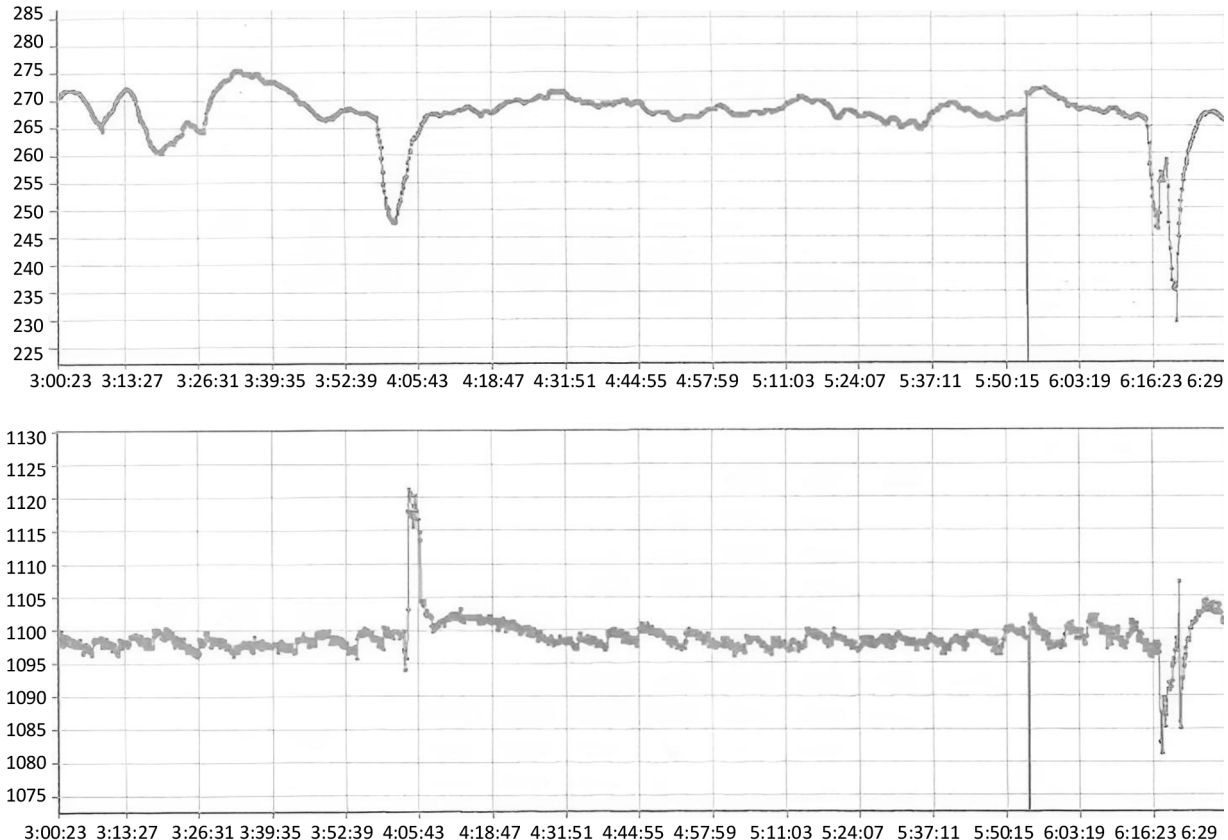


Рис. 2. Зміни температури та тиску гарячого дуття доменної печі впродовж 3,5 годин (виробничі дані)

але це, на жаль, не ліквідує коливання температури гарячого дуття.

Авторами [11] пропонується змінити колектор гарячого дуття, який об'єднує всі повітрянагрівачі блока так, щоб забезпечити рівні умови змішування гарячого дуття та байпасного холодного дуття, що теж потребує значних капітальних затрат.

Авторами [12] пропонується структура системи автоматичного регулювання температури гарячого дуття, яка покликана забезпечити підвищення якості регулювання завдяки формуванню керівного впливу з урахуванням температури гарячого дуття на виході з кожного ПН та втрати дуття на кожному з повітрянагрівачів групи.

У роботі [13] пропонується алгоритм перемикавання повітрянагрівачів із використанням розрахунку теплової потужності гарячого дуття, яка забезпечується ПН в режимі дуття. Такій підхід дає змогу зменшити кількість перемикачів на добу, знизити коливання температури гарячого дуття та підвищити її значення.

Результати. Пропонується метод (спосіб) керування безударним перемиканням ПН, який забезпечує стабільність температури гарячого дуття під час перехідного періоду. Для цього необхідно:

- установити на байпасі трубопроводу холодного дуття на змішування замість наявного дросельного поворотного клапана регульовальну засувку з ідентичним КХД типом конструктивної характеристики (шиберним), наприклад, VAG ZETA Control DN 600 з виконавчим механізмом AUMA 14-2 [14].

- забезпечити синхронне відкриття ЗЗ і КХД нагрітого ПН, а також рівність часу повного відкриття змішувальної засувки $\tau_{ЗЗ}$ та суми часу відкриття КХД нагрітого ПН $\tau_{\text{від КХД наг}}$ і часу закриття КХД охолодженого ПН $\tau_{\text{зач КХД охол}}$:

$$\tau_{ЗЗ} = \tau_{\text{від КХД наг}} + \tau_{\text{зач КХД охол}} \quad (1)$$

Час відкриття змішувальної засувки VAG ZETA Control DN600 (час повного переміщення її виконавчим механізмом) $\tau_{ЗЗ} = 63$ с. Час відкриття або закриття КХД становить, як правило, (15–30) с. Згідно з виразом (1) приймаємо:

$$\tau_{\text{від КХД наг}} = \tau_{\text{зач КХД охол}} = 30 \text{ с.}$$

Необхідність використання регульовальної змішувальної засувки шиберного типу з конструктивною характеристикою, ідентичною КХД, пояснюється специфікою умов роботи ПН і змішувальної засувки в перехідний період. Два потоки гарячого дуття, які в цей період одночасно проходять крізь повітрянагрівачі, та потік холодного дуття на змішування крізь

регульовальну ЗЗ мають дві спільні точки – трубопровід холодного дуття з тиском P_1 та трубопровід гарячого дуття з тиском P_2 . За такого з'єднання двох ПН і ЗЗ тиск газів у точках входу й виходу дуття однаковий, а перепад тиску незмінний. Тобто в цей період перепад тиску $\Delta P = P_1 - P_2$ не залежить від того, відчинені чи зачинені КХД нагрітого ПН і ЗЗ. Це зумовлює те, що кількість дуття, яка проходить крізь КХД нагрітого ПН і змішувальну засувку, пропорційна площі відкритого поперечного перерізу кожного з них. Так, їх конструктивна характеристика стає робочою витратною, і характер її зміни буде ідентичним для КХД ПН і ЗЗ [15].

Для КХД шиберного типу ПН конструктивна характеристика – залежність площі поперечного перерізу $S_{\text{КХД}}$ клапана від переміщення його затвора a – має вигляд [16]:

$$S_{\text{КХД}}(a) = \pi R^2 - 2 \cdot R^2 \cdot \arccos\left(\frac{a}{2R}\right) + \frac{a}{2} \sqrt{4R^2 - a^2}, \quad (2)$$

де R – радіус отвору повністю відчиненого клапана холодного дуття (м);

a – вертикальне переміщення затвора клапана (м).

За відомого часу повного переміщення затвора τ_{max} можна визначити переміщення a для кожного значення часу переміщення затвора τ :

$$a = \frac{\tau}{\tau_{\text{max}}} a_{\text{max}};$$

$$S_{\text{КХД}}(a) = S_{\text{КХД}}\left(\frac{\tau}{\tau_{\text{max}}} a_{\text{max}}\right) = S_{\text{КХД}}(\tau),$$

де a_{max} – переміщення затвора клапана, за якого клапан повністю відчинено (м).

У такому разі кількість дуття $Q_{\text{КХД}}(\tau)$, яка проходить крізь ПН в момент часу τ , пропорційна площі прохідного перерізу його КХД $S_{\text{КХД}}(\tau)$ в цей момент:

$$Q_{\text{КХД}}(\tau) = Q_{\text{КХД max}}(\tau) \frac{S_{\text{КХД}}(\tau)}{S_{\text{КХД max}}}, \quad (3)$$

де $S_{\text{КХД max}}$ – максимальна площа отвору КХД ПН (м²);

$Q_{\text{КХД max}}$ – максимальні витрати холодного дуття крізь КХД ПН (м³/с).

Аналогічно, для змішувальної засувки:

$$Q_{ЗЗ}(\tau) = Q_{ЗЗ max}(\tau) \frac{S_{ЗЗ}(\tau)}{S_{ЗЗ max}}. \quad (4)$$

Так, для кожного положення затвора КХД або ЗЗ в часі можна визначити відповідну величину витрати дуття, яке проходить крізь них. Це дає

змогу визначати температуру дуття в кожний момент часу періоду перемикавання ПН і продемонструвати безударне перемикавання ПН. Покажемо це на прикладі з вихідними параметрами для розрахунку (табл. 1)

Таблиця 1
Значення вихідних параметрів для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення
Абсолютний тиск холодного дуття, Па	$P_{хд}$	405 300
Температура холодного дуття, °С	$t_{хд} = t_2$	100
Максимальні витрати холодного дуття на піч у робочих умовах, м³/с	$Q_{вр\Sigma}$	20,5
Максимальні витрати холодного дуття на змішування в робочих умовах, м³/с	$Q_{ЗЗврmax}$	3,0
Температура гарячого дуття на піч, °С	$t_{гд} = t_3$	1100
Максимальна температура нагрітого дуття на виході нагрітого ПН, °С	t_{11}	1250
Мінімальна температура нагрітого дуття на виході охолодженого ПН, °С	t_{12}	1100

Значення об'ємної теплоємності дуття (склад: кисень – 25 %, азот – 75 %) для відповідних температур та тиску розраховують за поліномами [17; 18], які отримано апроксимацією даних з довідників для теплотехнічних розрахунків [19; 20].

Типовий КХД має $D_y = 1,1$ м та, відповідно, максимальний хід штоку $a = 1,1$ м, тоді конструктивна характеристика клапана (2) буде такою (рис. 3):

$$S_{КХД}(a) = 0,94985 - 0,605 \arccos\left(\frac{a}{1,1}\right) + \frac{a}{2} \sqrt{1,21 - a^2}. \quad (5)$$

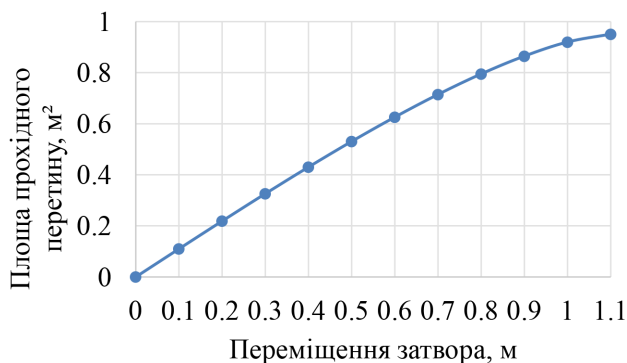


Рис. 3. Конструктивна характеристика клапана холодного дуття Ду1100

Аналогічну конструктивну характеристику (рис. 4, а) має змішувальна засувка: $D_y = 0,6$ м, хід штоку (переміщення затвора) $a_{max} = 0,6$ м ($R_y = 0,3$ м).

$$S_{ЗЗ, Ду600}(a) = 0,2826 - 0,18 \arccos\left(\frac{a}{0,6}\right) + \frac{a}{2} \sqrt{0,36 - a^2}. \quad (6)$$

Для порівняння на рис. 4, б наведено конструктивну характеристику дросельного поворотного клапана, яка має нелінійний характер.

Як видно з графіків, обидві характеристики (рис. 3, рис. 4, а) ідентичні й наближені до лінійної.

У процесі перемикавання ПН гаряче дуття подається паралельно з двох ПН –

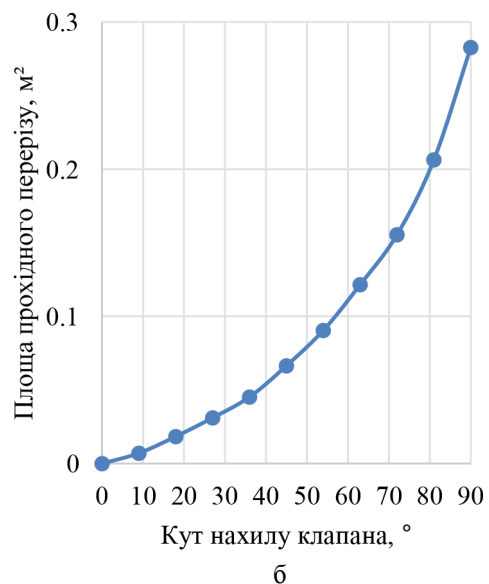
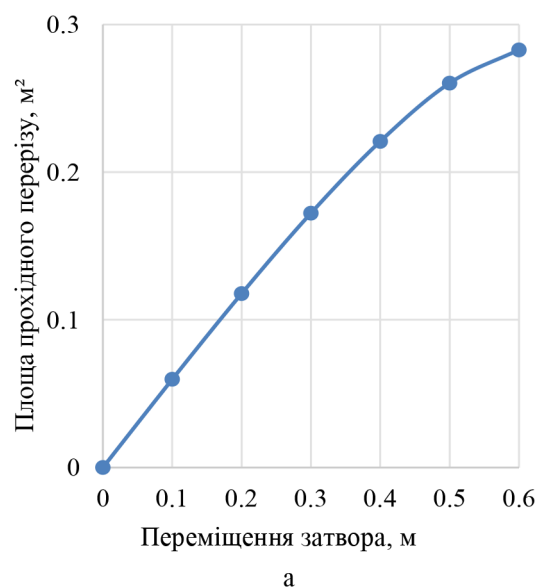


Рис. 4. Конструктивна характеристика змішувальної засувки Ду600:
а – шиберна регульовальна засувка;
б – дросельний поворотний клапан

охлажденного й нагрітого. Водночас на клапанах майже відсутній перепад тиску гарячого дуття, оскільки має місце паралельне з'єднання трубопроводів дуття при повністю відчиненому КХД охолодженого ПН. За таких умов роботи клапанів нагрітого та охолодженого ПН конструктивна характеристика клапана стає його робочою витратною та площа його прохідного перерізу визначає витрату дуття крізь нього. Тому кількість дуття $Q_{\text{ХД}}(a)$ крізь КХД під час його відчинення або зачинення є пропорційною поточній площі його прохідного перерізу $S_{\text{КХД}}(a)$:

$$Q_{\text{ХД}}(a) = Q_{\text{ХД max}} \frac{S_{\text{КХД}}(a)}{S_{\text{КХД max}}(a)}. \quad (7)$$

При перемиканні ПН температура гарячого дуття ДП формується шляхом змішування потоків нагрітого дуття з охолодженого та нагрітого ПН. Для подальших розрахунків можна знехтувати незначною зміною (зменшення 2,5 °С/хв.) температури гарячого дуття на виходах ПН під час їх перемикання [6; 7]. Перехідний процес перемика ПН з боку визначення температури дуття для ДП (як суміші двох потоків можна розділити на два періоди: перший – від початку до

закінчення відкриття КХД нагрітого ПН, другий – від початку й до закінчення закриття КХД охолодженого ПН.

Згідно з тепловим балансом для першого періоду перемика ПН теплота гарячого дуття, яке надходить у ДП, дорівнює:

$$t_3 c_{p t 3} [k(Q_{\text{вр } \Sigma} - Q_{33}(\tau)) + Q_{33 \text{ вр}}(\tau)] =$$

$$= k \left[\frac{0,5 \frac{S_{\text{КХД нг}}(\tau)}{S_{\text{КХД нг max}}} (Q_{\text{вр } \Sigma} - Q_{33}(\tau)) t_{11} C_{p t 11}^v + \left(1 - 0,5 \frac{S_{\text{КХД нг}}(\tau)}{S_{\text{КХД нг max}}} \right) \cdot (Q_{\text{вр } \Sigma} - Q_{33}(\tau)) t_{12} C_{p t 12}^v \right] +$$

$$+ Q_{33 \text{ вр}}(\tau) t_2 C_{p t 2}^v,$$

де $0,5 \frac{S_{\text{КХД нг}}(\tau)}{S_{\text{КХД нг max}}} (Q_{\text{вр } \Sigma} - Q_{33}(\tau)) t_{11} C_{p t 11}^v$ – теплота гарячого дуття на виході нагрітого ПН;

$\left(1 - 0,5 \frac{S_{\text{КХД нг}}(\tau)}{S_{\text{КХД нг max}}} \right) \cdot (Q_{\text{вр } \Sigma} - Q_{33}(\tau)) t_{12} C_{p t 12}^v$ – теплота гарячого дуття на виході охолодженого ПН.

Звідси температура гарячого дуття t_3 для першого періоду дорівнює:

$$t_3 = \frac{k \left[0,5 \frac{S_{\text{КХД нг}}(\tau)}{S_{\text{КХД нг max}}} (Q_{\text{вр } \Sigma} - Q_{33}(\tau)) t_{11} C_{p t 11}^v + \left(1 - 0,5 \frac{S_{\text{КХД нг}}(\tau)}{S_{\text{КХД нг max}}} \right) \cdot (Q_{\text{вр } \Sigma} - Q_{33}(\tau)) t_{12} C_{p t 12}^v \right] + Q_{33 \text{ вр}}(\tau) t_2 C_{p t 2}^v}{C_{p t 3}^v [k(Q_{\text{вр } \Sigma} - Q_{33}(\tau)) + Q_{33 \text{ вр}}(\tau)]}. \quad (8)$$

Температура дуття для другого періоду, з урахуванням зменшення потоку дуття крізь охолоджений ПН та збільшення крізь нагрітий, дорівнює:

$$t_3 = \frac{k \left[\left(1 - 0,5 \frac{S_{\text{КХД ох}}(\tau)}{S_{\text{КХД ох max}}} \right) \cdot (Q_{\text{вр } \Sigma} - Q_{33}(\tau)) t_{11} C_{p t 11}^v + 0,5 \frac{S_{\text{КХД ох}}(\tau)}{S_{\text{КХД ох max}}} \cdot (Q_{\text{вр } \Sigma} - Q_{33}(\tau)) t_{12} C_{p t 12}^v \right] + Q_{33 \text{ вр}}(\tau) t_2 C_{p t 2}^v}{C_{p t 3}^v [k(Q_{\text{вр } \Sigma} - Q_{33}(\tau)) + Q_{33 \text{ вр}}(\tau)]}; \quad (9)$$

де $k = 0,9$ – частка холодного дуття від загальної кількості дуття на виході ПН;

$Q_{\text{вр } \Sigma}$ – максимальна кількість холодного дуття в робочих умовах на вході до блока ПН (м³/с);

$Q_{33 \text{ вр}}(\tau)$ – кількість холодного дуття на змішування в робочих умовах на виході змішувальної засувки (м³/с).

Використовуючи дані наведеного прикладу, за виразами (8) і (9) визначимо температуру дуття t_3 для першого та другого періодів перемика ПН. Оскільки час відкриття 33 становить 60 с, то за виразом (1) час зачинення і час відчинення КХД дорівнюють по 30 с відповідно. Розрахунок температури дуття здійснюється при розбитті усього часового інтервалу процесу перемика ПН з кроком 10 с., у результаті для першого та другого періодів отримані по три значення температури дуття відповідно.

Значення окремих складників рівнянь (8) та (9) наведено в табл. 2 та на рис. 5 (лінія 1).

Графічне зображення змін температури дуття для запропонованої змішувальної засувки шиберного типу при безударному перемика ПН (лінія 1) та для розглянутого вище прикладу з використанням традиційної засувки поворотного типу (лінії 2, 3, 4) представлено на рис. 5.

Для порівняння проведено розрахунок температури дуття, яке подається в ДП, за виразами (8) і (9) для аналогічних двох періодів перемика ПН з параметрами конструктивної характеристики традиційної поворотної засувки (дросельного поворотного клапана):

– тривалість роботи клапана 30 с на початку переходу (рис. 5, лінія 2);

– тривалість роботи клапана 30 с наприкінці переходу (рис. 5, лінія 3);

Таблиця 2

Значення площі відкриття шиберної змішувальної засувки (ЗЗ) Ду600 і відкриття-закриття КХД ПН, а також відповідних витрат і температури дуття у виразах (8) і (9) при перемиканні ПН

Перший період							
Час (с)	$S_{ЗЗ}(\tau)$ (м ²)	$0,5 \frac{S_{КХД_{не}}(\tau)}{S_{КХД_{не \max}}}$	$\left(1 - 0,5 \frac{S_{КХД_{не}}(\tau)}{S_{КХД_{не \max}}}\right)$	$Q_{ЗЗ}(\tau)$	$(Q_{вр\Sigma}) - Q_{ЗЗ}(\tau)$	$S_{КХД_{не}}(\tau)$ (м ²)	t_3 °С
10	0,0596	0,2089	0,7911	0,5483	19,9517	0,397	1103,5
20	0,1176	0,3919	0,6081	1,0820	19,418	0,7446	1101
30	0,1720	0,5	0,5	1,5824	18,9176	0,95	1089
Другий період							
Час (с)	$S_{ЗЗ}(\tau)$ (м ²)	$\left(1 - 0,5 \frac{S_{КХД_{ох}}(\tau)}{S_{КХД_{ох \max}}}\right)$	$0,5 \frac{S_{КХД_{ох}}(\tau)}{S_{КХД_{ох \max}}}$	$Q_{ЗЗ}(\tau)$	$(Q_{вр\Sigma}) - Q_{ЗЗ}(\tau)$	$S_{КХД_{ох}}(\tau)$ (м ²)	
40	0,2328	0,6081	0,3919	2,0296	18,4704	0,7446	1080
50	0,2557	0,7911	0,2089	2,3930	18,107	0,397	1084
60	0,2827	1,0	0	2,6	17,900	0	1100

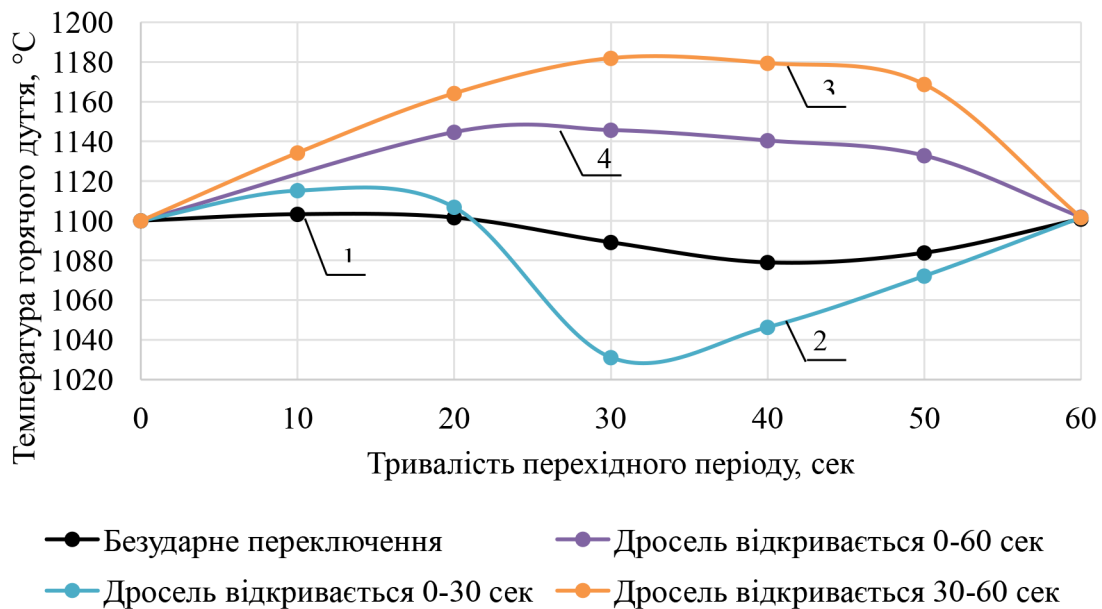


Рис. 5. Зміна температури гарячого дуття при різних варіантах перемикання ПН

– тривалість роботи клапана 60 с (рис. 5, лінія 4).

Як видно з наведених результатів (рис. 5), при використанні шиберної засувки та забезпеченні синхронності відкриття КХД нагрітого ПН та відкриття ЗЗ значно зменшуються коливання температури гарячого дуття (лінія 1, рис. 5).

Додатково до заміни типу змішувальної засувки [21] використання запропонованої авторами схеми системи автоматичного регулювання температури гарячого дуття [12] дасть змогу зменшити динамічне відхилення температури гарячого дуття та час регулювання, що забезпечить підвищення точності та швидкодії процесу регулювання температури гарячого дуття, яке надходить у ДП (рис. 6).

Підвищення якості регулювання відбувається з огляду на те, що при формуванні керівного впливу враховується температура гарячого дуття на виході з кожного повітрянагрівача та витрата дуття на кожному з повітрянагрівачів групи [22].

Висновки. Використання для змішування замість дросельного поворотного клапана засувки шиберного типу з такою самою конструктивною характеристикою, як у клапана холодного дуття повітрянагрівача, дає змогу стабілізувати температуру дуття з мінімальним відхиленням від заданої впродовж усього процесу перемикання ПН. Розглянуто приклад зменшення коливань температури дуття до 20 °С. Запропонований метод потребує незначних капітальних вкладень для заміни

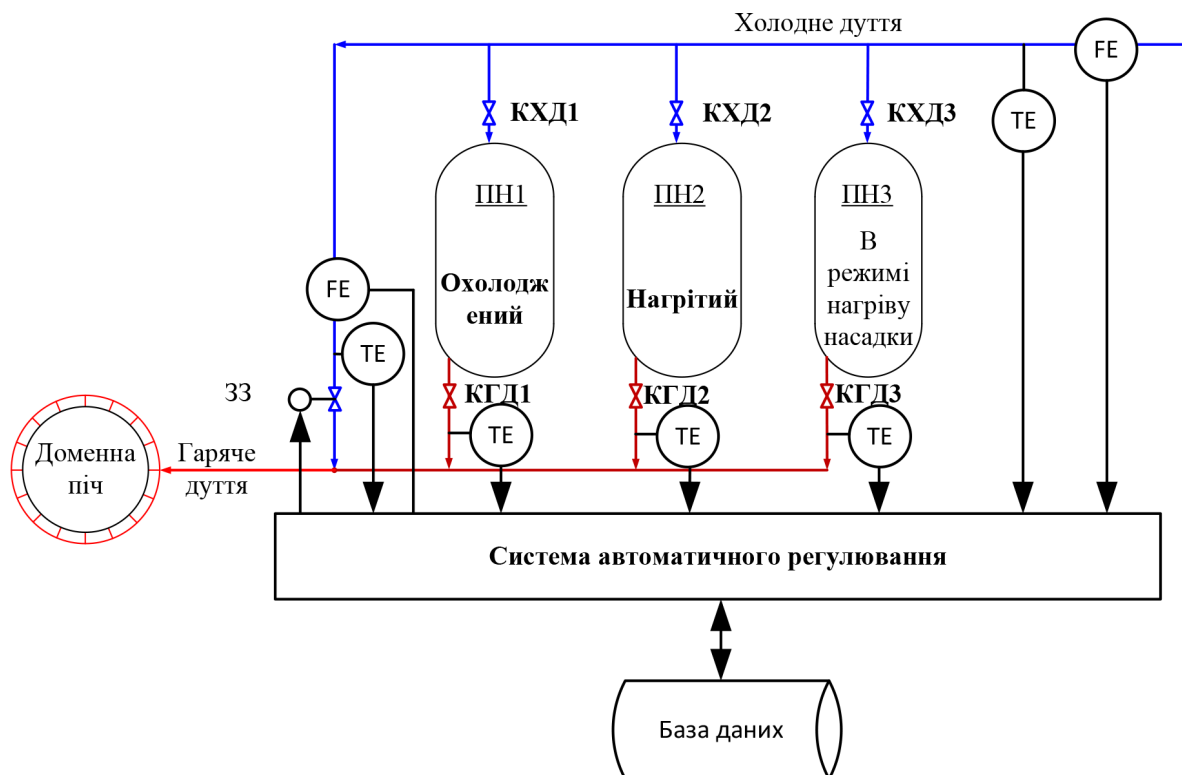


Рис. 6. Система автоматичного регулювання температури гарячого дуття

поворотної регулювальної засувки шиберною на байпасі холодного дуття, а також синхронізації відчинення та зачинення клапанів ПН і шиберної регулювальної засувки. Інтеграція схеми безударного перемикавання ПН із системою

автоматичного регулювання температури дуття дасть змогу повністю автоматизувати процес безперервного забезпечення ДП гарячим дуттям з мінімальним відхиленням його температури від заданої.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Modern Blast Furnace Ironmaking / M. Geerdes et al. IOS Press, 2020. URL: <https://doi.org/10.3233/stal9781643681238>
2. Treatise on Process Metallurgy. Elsevier, 2014. URL: <https://doi.org/10.1016/c2010-0-67121-5>
3. Hot Blast Stoves – IspatGuru. *IspatGuru*. URL: <https://www.ispatguru.com/hot-blast-stoves/> (дата звернення: 16.12.2024).
4. Blast Furnace Ironmaking / I. Cameron et al. Elsevier, 2020. 828 p. URL: <https://doi.org/10.1016/c2017-0-00007-1>
5. Blast Furnace and Stoves – Eurotherm by Watlow. URL: <https://www.eurotherm.com/heat-treatment-articles/blast-furnace-and-stoves/> (дата звернення: 10.12.2024).
6. Koyfman O., Simkin O., Klimov Y., Scherbakov, S. Using of Intelligence Analysis of Technological Parameters Database for Implementation of Control Subsystem of Hot Blast Stoves Block ACS. *Computer Modeling and Intelligent Systems 2021* (Zaporizhzhia, April 27, 2021). Zaporizhzhia, 2021. PP. 145–157. DOI: <https://doi.org/10.32782/cmisi/2864-13>
7. Койфман О. О., Горобченко М. О., Клімов Є. Г., Доля Д. Т. Застосування інтелектуального аналізу архівної бази даних АСУТП в управлінні блоком доменних повітрянагрівачів. *Наука та виробництво : зб. наукових праць*. 2020. № 23. С. 328–337. URL : <http://sap.pstu.edu/article/view/241189>
8. Şahin A., Morari M. Optimizing control of hot blast stoves in staggered parallel operation. *IFAC Proceedings Volumes*, 2008. № 41(2). PP. 1982–1987. DOI: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00337>
9. Smith A. M. (2012). A hot blast main mixer stage with an asymmetric input arrangement. (U.K. Patent GB2491873A). UK Patent Application. URL: <https://patents.google.com/patent/GB2491873A/en>
10. Грес Л. П., Карпенко С. А., Миленина А. Є. Теплообмінники доменних печей. *Дніпропетровськ: «Пороги»*, 2012, 491 с.
11. Система подачі гарячого дуття: пат. 98081 Україна: МПК С 21В 9/14, С 21В 3/00. № 201106166; заявл. 25.11.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7. 4 с.

12. Система автоматичного регулювання температури гарячого дуття: пат. 98080 Україна: МПК С 21В 9/14, G05В 15/00. № 201106166; заявл. 25.11.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7. 4 с.
13. Blast Furnace Hot Stove Changeover by Thermal Control / R. S. N. Motta et al. 42° *Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas / 13° Seminário Brasileiro de Minério de Ferro / 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking*. 2012. Vol. 6, no. 6. P. 80–90. DOI : 10.5151/2594-357X-21537. URL: <https://abmproceedings.com.br/en/article/blast-furnace-hot-stove-changeover-by-thermal-control-2>
14. VAG ZETA®control Knife Gate Valve. *Valves and Solutions for Water and Wastewater Applications*. URL: <https://www.vag-group.com/en/products/products-detail/vag-zetacontrol-knife-gate-valve-3> (дата звернення: 17.12.2024).
15. Bhatia A. Control Valve Basics: Sizing and Selection. NY : Continuing Education and Development, 2014. 64 p. URL: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Control%20Valves%20Basics%20-%20Sizing%20&%20Selection.pdf>
16. Кравченко В. П., Холькін О. М. Конструктивна характеристика клапана холодного дуття і її вплив на температуру дуття доменної печі в період переключення повітрянагрівачів. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2020. № 40. С. 159–167. URL: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.40.2020.216222>
17. Койфман О. О., Орехов М. В., Сімкін О. І. Розрахунок значень теплофізичних властивостей газів для уточненого розрахунку доменного повітрянагрівача. *Перспективи розвитку сучасної науки і техніки: зб. тез доп. Всеукр. інтернет-конференції (Маріуполь, 20-21 лютого 2020 р.)*. ДВНЗ «ПДТУ». Маріуполь, 2020. С. 20–22.
18. Койфман О. О., Орехов М. В., Солдатов Д. В., Будур В. С., Голоядов А. В. Управління нагріванням насадки доменного повітрянагрівача з використанням програми розрахунку горіння палива. *Наука та виробництво : зб. наукових праць*. 2020. № 23. С. 338–346. URL: <http://sap.pstu.edu/article/view/241192>
19. Vargaftik, N. B. Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases: Pure Substances and Mixtures, 2nd ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1975; ISBN 978-3-642-52506-3
20. Circular of the Bureau of Standards no. 564::tables of thermal properties of gases comprising tables of thermodynamic and transport properties of air, argon, carbon dioxide, carbon monoxide hydrogen, nitrogen, oxygen, and steam. / J. Hilsenrath et al. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 1955. 508 p. URL: <https://doi.org/10.6028/NBS.CIRC.564> (дата звернення: 06.08.2024).
21. Система подачі гарячого дуття: заявка на патент України на корисну модель: МПК С 21 В 9/14, С 21 В 3/00. № у 2025 03204; заявл. 07.07.2025.
22. Система автоматичного регулювання температури гарячого дуття: заявка на патент України на корисну модель: МПК С 21 В 9/14, G05В 15/00. № у 2025 03179; заявл. 03.07.2025.

REFERENCES:

1. Geerdes, M., Chaigneau, R., & Lingardi, O. (2020). *Modern blast furnace ironmaking: an introduction (2020)*. Ios Press. DOI: <https://doi.org/10.3233/STAL9781643681238>
2. Yang, Y., Holappa, L., Saxén, H., & van der Stel, J. (2024). Ironmaking. In S. Seetharaman, R. Guthrie, A. MacLean, S. Seetharaman, & H. Yong Sohn (Eds.), *Treatise on process metallurgy* (2 ed., Vol. 3, pp. 7–88). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-67121-5>
3. Hot Blast Stoves – IspatGuru. Retrieved from: <https://www.ispatguru.com/hot-blast-stoves/> (date of access: 16.12.2024).
4. Cameron, I., Sukhram, M., Lefebvre, K., & Davenport, W. (2019). *Blast furnace ironmaking: Analysis, control, and optimization*. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00007-1>
5. Blast Furnace and Stoves – Eurotherm by Watlow. Retrieved from: <https://www.eurotherm.com/heat-treatment-articles/blast-furnace-and-stoves/> (date of access: 10.12.2024).
6. Koyfman, O., Simkin, O., Klimov, Y., & Scherbakov, S. (2021). Using of Intelligence Analysis of Technological Parameters Database for Implementation of Control Subsystem of Hot Blast Stoves Block ACS. In CMIS (pp. 145–157). DOI: <https://doi.org/10.32782/cmris/2864-13>.
7. Koyfman, O., Horobchenko, M., Klimov, Ye., Dolya, D. (2020) Zastosuvannya intelektual'noho analizu arkhivnoyi bazy danykh ASUTP v upravlinni blokom domennykh povitronahrivachiv [Application Of The ACS Archive Database Mining In Managing Of A Hot Blast Stoves Block]. *Nauka ta vyrobnytstvo – Science And Production*, 23, 328–337. Retrieved from: <http://sap.pstu.edu/article/view/241189> [in Ukrainian].
8. Şahin, A., & Morari, M. (2008). Optimizing control of hot blast stoves in staggered parallel operation. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 1982–1987. DOI: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00337>

9. Smith, A.M. (2012). *A hot blast main mixer stage with an asymmetric input arrangement*. (U.K. Patent GB2491873A). UK Patent Application. Retrieved from: <https://patents.google.com/patent/GB2491873A/en>
10. Gres, L. P., Karpenko, S. A., & Milenina, A. Ye. (2012). *Teploobminnyki domennykh pechey* [Blast Furnace Heat Exchangers]. Porogi. [in Ukrainian].
11. Koyfman, O., Kravchenko, V., & Simkin, O. (2012). *Systema podachi haryachoho duttya* [System for supply of hot blowing]. (UA Patent UA98081C2). URL: <https://patents.google.com/patent/UA98081C2/en> [in Ukrainian]
12. Koyfman, O., Kravchenko, V., Simkin, O., & Kobysch, O. (2012). *Systema avtomatychnoho rehulyuvannya temperatury haryachoho duttya* [System for automatic regulation of hot blowing temperature]. (UA Patent UA98080C2). URL: <https://patents.google.com/patent/UA98080C2/en> [in Ukrainian]
13. Motta, R. S. N., Costa, W. B. d., Soares, T. G., & Souza, L. E. d. (2012). Blast Furnace Hot Stove Changeover by Thermal Control. *42° Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas / 13° Seminário Brasileiro de Minério de Ferro / 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking*, 6(6), 80–90. DOI : 10.5151/2594-357X-21537. Retrieved from: <https://abmproceedings.com.br/en/article/blast-furnace-hot-stove-changeover-by-thermal-control-2>
14. VAG ZETA@control Knife Gate Valve. Retrieved from: <https://www.vag-group.com/en/products/products-detail/vag-zetacontrol-knife-gate-valve-3> (date of access: 17.12.2024).
15. Bhatia, A. (2014). Control Valve Basics: Sizing and Selection. Continuing Education and Development, Inc., 9. Retrieved from: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Control%20Valves%20Basics%20-%20Sizing%20&%20Selection.pdf>
16. Kravchenko, V. P., & Khol'kin, O. M. (2020). Konstruktyvna kharakterystyka klapanu kholodnoho duttya i yiyi vplyv na temperaturu duttya domennoyi pechi v period pereklyuchennya povitronahrivachiv [The design characteristic of the hot blast valve and its effect on blast furnace temperature during the switching period of the air heaters]. *Visnyk Pryazovs'koho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Ser. Tekhnichni nauky - Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 40, PP. 159–167. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.40.2020.216222>
17. Koyfman, O. O., Orekhov, M. V., & Simkin, O. I. (2020). Rozrakhunok znachen' teplofizychnykh vlastyvostey haziv dlya utochnenoho rozrakhunku domennoho povitronahrivacha [Calculation of the values of thermophysical properties of gases for the refined calculation of a hot blast stove]. *Perspektyvy rozvytku suchasnoyi nauky i tekhniki - Perspectives of the development of modern science and technology* P. 20–22.
18. Koyfman, O. O., Orekhov, M. V., Soldatov, D. V., Budur V. S., Goloyadov, A. V. (2020). Upravlinnya nahrivanniam nasadky domennoho povitronahrivacha z vykorystanniam prohramy rozrakhunku horinnya palyva [Control Of Heating Of The Hot Blast Stove Checkerwork With The Program For Calculation Of Fuel Combustion]. *Nauka ta vyrobnytstvo – Science And Production*, 23, 338–346. Retrieved from: <http://sap.pstu.edu/article/view/241192> [in Ukrainian].
19. Vargaftik, N. B. *Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases: Pure Substances and Mixtures*, 2nd ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1975; ISBN 978-3-642-52506-3.
20. Hilsenrath, J., Benedict, W., Fano, L., Hoge, H., Masa, J., Nuttall, R., Touloukian, Y., & Woolley, H. (1955). *Circular of the Bureau of Standards no. 564::tables of thermal properties of gases comprising tables of thermodynamic and transport properties of air, argon, carbon dioxide, carbon monoxide hydrogen, nitrogen, oxygen, and steam*. National Institute of Standards and Technology. Retrieved from: <https://doi.org/10.6028/NBS.CIRC.564> (accessed August 6, 2024).
21. Kravchenko, V., Koyfman, O., Simkin, O. et al. (2025). *Systema podachi haryachoho duttya* [System for supply of hot blowing]. (Number assigned to the application u 2025 03204) [In Ukrainian]
22. Kravchenko, V., Koyfman, O., Simkin, O. et al. (2025). *Systema avtomatychnoho rehulyuvannya temperatury haryachoho duttya* [System for automatic regulation of hot blowing temperature]. (Number assigned to the application u 2025 03179) [In Ukrainian]

Стаття надійшла: 19.08.2025

Стаття прийнята: 10.09.2025

Опублікована: 10.11.2025

