

151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 669.162.22

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351016

КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ ПІД ЧАС ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ НА ДУТТІ ДВОХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ

Кравченко В.П.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8467-7796 , e-mail: kravchenko_vp@ukr.net ;
Койфман О.О.	канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2075-7417 , e-mail: aleksey.koifman@mipolytech.education ;
Сімкін О.І.	канд. техн. наук, професор, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9939-7866 , e-mail: a.i.simkin@mipolytech.education ;
Мірошніченко В.І.	канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5956-7867 , e-mail: v.i.miroshnichenko@mipolytech.education

У статті розглядається проблема забезпечення безперервного й стабільного подавання гарячого дуття у доменну піч під час циклічної роботи регенеративних повітрянагрівачів (ПН). Традиційно чотири ПН у блоці працюють послідовно, по черзі переходячи з режиму нагріву в режим дуття, що призводить до значних коливань температури і великих гідравлічних втрат. Автори досліджують альтернативний спосіб організації роботи — паралельний режим двох ПН, при якому два нагрівачі одночасно подають дуття, а інші два перебувають у режимі регенерації тепла. Проведено аналіз існуючих режимів: послідовного, попарно-паралельного та змішаного, з урахуванням технологічних обмежень і особливостей теплового агрегату. Виконано математичне моделювання процесу, яке продемонструвало, що в паралельному режимі час дуття одного ПН збільшується з 60 до 160 хвилин, тоді як час нагріву становить 120 хвилин, що створює необхідний резерв для маневрування з потоками повітря. При цьому втрати тиску знижуються в 8 разів, а число переключень між режимами за добу зменшується з 24 до 18. Окрему увагу приділено алгоритму автоматичного переходу до паралельного режиму залежно від поточного стану температури й тиску в кожному ПН. Розроблено блок-схему керування, яка забезпечує своєчасне відкриття та закриття клапанів холодного дуття, що дозволяє утримувати відхилення температури гарячого дуття в заданих межах без застосування складних ручних регулювань. Запропоноване рішення дозволяє значно підвищити ефективність використання тепла регенератора, зменшити гідравлічні втрати та стабілізувати температурний режим без додаткових капіталовкладень у модернізацію обладнання.

Ключові слова: доменна піч, повітрянагрівачі, паралельний режим дуття, умови переключення повітрянагрівачів, зменшення втрат тиску дуття, кількість переключень повітрянагрівачів, алгоритм переключення, система керування.

Постановка проблеми

Технологічний процес доменної плавки вимагає безперервного забезпечення доменної печі (ДП) потоком гарячого дуття із стабільними параметрами температури та витрати. Однак формування такого потоку характеризується циклічністю, що обумовлено специфікою функціонування повітрянагрівачів (ПН) як теплових агрегатів регенеративного типу [1, 2].

Традиційно для доменної печі використовують чотири повітрянагрівачі, об'єднані в єдиний технологічний блок. Найпоширенішим режимом експлуатації є послідовна робота ПН, при якій один агрегат функціонує в режимі подачі дуття, тоді як решта перебувають у стадії нагріву. Оскільки температура дуття на виході

робочого ПН зазвичай перевищує задані параметри, система автоматичного регулювання температури забезпечує додавання холодного дуття через відповідний трубопровід.

Стабілізація температурного режиму дуття в стаціонарному режимі роботи ПН не становить технологічних труднощів. Проте забезпечення температурної стабільності під час переключення режимів ПН представляє значно більшу складність. Перехідні періоди характеризуються найсуттєвішими збуреннями системи, зокрема значним перевищенням температури дуття відносно номінальних значень, що негативно впливає на тепловий баланс доменної печі.

Прагнення до збільшення тривалості безперервного дуття та мінімізації частоти переключень ПН

стимулює дослідження альтернативних режимів експлуатації блоку повітрянагрівачів. Серед перспективних підходів слід виділити попарно-паралельну та паралельну роботу ПН [1, 3]. На сучасному етапі окремі металургійні підприємства України впроваджують паралельний режим роботи двох повітрянагрівачів.

Мета даного дослідження полягає в аналізі особливостей функціонування системи формування та подачі гарячого дуття до доменної печі при паралельній роботі двох повітрянагрівачів у режимі дуття.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Функціонування повітрянагрівачів та систем автоматичного регулювання температури в процесі дуття є предметом широкого висвітлення у науково-технічній літературі [1-5]. Постійний пошук ефективних технологічних схем та технічних засобів автоматичного регулювання температури гарячого дуття доменних печей зумовлений потребою вдосконалення систем забезпечення ДП гарячим дуттям [1, 4-6]. Водночас, дослідження роботи системи підготовки дуття в перехідні періоди (переключення ПН) представлені у значно меншому обсязі та характеризуються суперечливістю в інтерпретації результатів.

Для забезпечення безперервної подачі гарячого дуття до доменної печі блок повітрянагрівачів може функціонувати в одному з п'яти основних режимів [1, 3, 4, 7]:

1. Послідовний режим по часу передбачає роботу трьох ПН, де один агрегат протягом визначеного періоду (наприклад, однієї години) перебуває в режимі дуття, тоді як інші функціонують у режимі нагріву (мінімальний період нагрівання становить 1,5 години). При досягненні заданої тривалості дуття ініціюється процес переключення: охолоджений ПН переводиться в режим нагрівання, а найбільш нагрітий – у режим дуття.

2. Послідовний сигнальний режим базується на сигналі системи автоматичного регулювання температури дуття про закриття регулюючого органу на трубопроводі подачі холодного дуття для змішування. За цим сигналом до трубопроводу гарячого дуття підключається нагрітий ПН, тоді як охолоджений відключається та переводиться в режим нагрівання.

3. Паралельний режим характеризується одночасним функціонуванням двох ПН у режимі дуття – одного з вищою температурою (менша тривалість дуття) та іншого з нижчою температурою (більша тривалість дуття), тоді як два інших агрегати перебувають у режимі нагрівання. Потік холодного дуття розподіляється рівномірно між двома працюючими ПН. Стабілізація температури дуття досягається шляхом автоматичного регулювання кількості холодного дуття для змішування у трубопроводі гарячого дуття.

4. Попарно-паралельний режим передбачає роботу двох ПН у режимі дуття зі стабілізацією температури через регулювання співвідношення кількості

холодного дуття, що проходить через кожен агрегат. Основний обсяг холодного дуття спрямовується через менш нагрітий ПН, решта – через більш нагрітий. З плином часу, внаслідок охолодження ПН, кількість дуття через більш нагрітий агрегат збільшується, а через менш нагрітий – зменшується. Коли весь обсяг дуття починає проходити через більш нагрітий ПН, менш нагрітий відключається та переводиться в режим нагрівання, а нагрітий на цей момент ПН переводиться в режим дуття і цикл повторюється. Основним недоліком цього методу є необхідність значної технічної реконструкції тракту підведення холодного дуття до ПН, включаючи встановлення вузлів контролю та регулювання витрат та систем регулювання співвідношення цих витрат на трубопроводі кожного ПН, що потребує значних капітальних інвестицій.

5. Змішаний режим характеризується тим, що частину періоду дуття працює один ПН, стабілізація температури здійснюється додаванням холодного повітря у трубопровід гарячого дуття. При зменшенні кількості доданого холодного дуття до нуля підключається попередньо нагрітий ПН, і наступну частину періоду вони працюють паралельно. Стабілізація температури дуття забезпечується розподіленням дуття між гарячим та охолодженим ПН. Цей режим також потребує наявності вузлів контролю та регулювання кількості холодного дуття на вході всіх ПН, що передбачає реконструкцію тракту подачі холодного дуття на всіх ПН.

У сучасній практиці найбільшого поширення набув послідовний режим завдяки своїй простоті. Однак останнім часом окремі металургійні підприємства почали впроваджувати паралельний режим роботи двох ПН. Слід зазначити, що особливості функціонування повітрянагрівачів у цьому режимі практично не висвітлені у науково-технічній літературі.

Таким чином, актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю аналізу особливостей паралельного режиму роботи повітрянагрівачів та заповнення існуючої прогалини в науковому висвітленні цієї проблематики.

Мета статті

Метою даного дослідження є комплексний аналіз режиму паралельного функціонування двох повітрянагрівачів доменної печі в процесі формування гарячого дуття.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

- розробити математичну модель паралельного режиму роботи повітрянагрівачів для дослідження його характерних особливостей;
- провести порівняльний аналіз ефективності паралельного режиму відносно традиційних схем експлуатації блоку повітрянагрівачів;

- оцінити вплив паралельного режиму на стабільність та безперервність процесу подачі гарячого дуття;
- дослідити можливості мінімізації гідравлічних втрат при паралельній роботі ПН;
- визначити параметри оптимального автоматичного регулювання температури дуття в умовах паралельного функціонування повітрянагрівачів.

Реалізація поставлених завдань дозволить обґрунтувати доцільність впровадження паралельного режиму роботи повітрянагрівачів та розробити рекомендації щодо оптимізації теплового режиму доменної печі.

Виклад основного матеріалу

Безперервне забезпечення доменної печі гарячим дуттям вимагає функціонування блоку повітрянагрівачів у визначеному режимі з автоматичною стабілізацією температурних параметрів дуття. Як при послідовному, так і при паралельному режимах експлуатації ПН стабілізація температури дуття здійснюється системою автоматичного регулювання (САР) температури гарячого дуття традиційної структури (рис. 1). В якості зворотного зв'язку контролюється температура дуття за допомогою датчика, розташованого на трубопроводі гарячого дуття перед кільцевим трубопроводом доменної печі. Сигнал поточної температури гарячого дуття з цього датчика порівнюється із заданим значенням, що встановлюється вручну задатчиком (ЗД). Отримана різниця між фактичним та номінальним значеннями температури надходить на вхід автоматичного регулятора (АР). Автоматичний регулятор генерує керуючий

вплив, який через виконавчий механізм (ВМ) регулює положення змішувальної заслони (ЗЗ) на байпасному трубопроводі. Таким чином забезпечується збільшення або зменшення подачі холодного дуття для змішування, що дозволяє підтримувати температуру гарячого дуття на заданому рівні.

Представлена система автоматичного регулювання характеризується класичною структурою управління з одноконтурним регулюванням за відхиленням, що забезпечує стабільність теплового режиму доменної печі незалежно від режиму роботи блоку повітрянагрівачів.

Описаний алгоритм регулювання функціонує до моменту надходження сигналу на переключення повітрянагрівачів. При автоматичному процесі переключення ПН формування такого сигналу відбувається автоматично відповідно до заданого режиму роботи блоку повітрянагрівачів. Найбільшого поширення набув послідовний режим експлуатації ПН з ініціацією переключення при закритті ЗЗ. Коли температура повітря на виході ПН, що працює в режимі дуття, знижується до значення заданої температури дуття, автоматичний регулятор повністю закриває ЗЗ на байпасному трубопроводі холодного дуття. Цей стан є індикаторним сигналом для початку процесу переключення повітрянагрівачів. Процес переключення ПН супроводжується порушенням стабільності температурного режиму гарячого дуття, що надходить до доменної печі. Такі температурні коливання становлять значні збурення для процесу доменної плавки та можуть негативно впливати на технологічні показники виробництва.

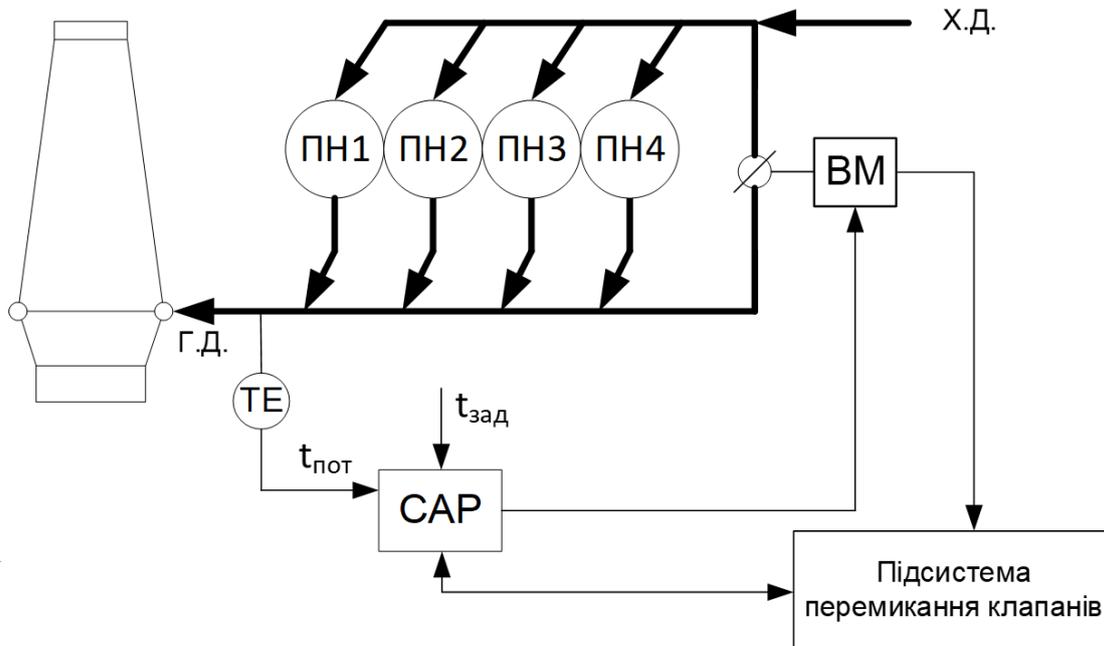


Рис. 1 – Структура системи автоматичного регулювання температури гарячого дуття

Для послідовного режиму роботи блоку ПН задана температура дуття відповідно до теплового балансу процесу змішування гарячого і холодного дуття визначається співвідношенням:

$$t_{Дзад} = \frac{k \cdot (G_{мр\Sigma} - G_{33}(\tau)) \cdot t_1(\tau) \cdot C_{p t_1}^M + G_{33}(\tau) \cdot t_2 \cdot C_{p t_2}^M}{k \cdot (G_{мр\Sigma} - G_{33}(\tau)) \cdot C_{p t_3}^M + G_{33}(\tau) \cdot C_{p t_3}^M}$$

де $t_{Дзад}$ – температура дуття на вході у піч (задана) [°C];

$G_{мр\Sigma}$ – загальна масова кількість холодного дуття на піч [кг/с];

$k = 0,9$ – доля виходу гарячого дуття на виході ПН від загальної кількості Q_{Σ} холодного дуття на піч (змінюється в часі системою автоматичного регулювання температури дуття, в залежності від положення ЗЗ);

$$t_{Дзад} = \frac{k \cdot \left[\frac{G_{мр\Sigma} - G_{33}(\tau)}{2} t_{11} \cdot C_{p t_{11}}^M + \frac{G_{мр\Sigma} - G_{33}(\tau)}{2} t_{12} \cdot C_{p t_{12}}^M \right] + G_{33}(\tau) \cdot t_2 \cdot C_{p t_2}^M}{C_{p t_{Дзад}}^M \cdot \left[k \cdot (G_{мр\Sigma} + (1 - k) \cdot G_{33}(\tau)) \right]}$$

де $t(\tau)_{11}$ – температура дуття на виході працюючого гарячого ПН (температура склепіння) [°C];

$t(\tau)_{12}$ – температура дуття на виході працюючого охолодженого ПН (температура склепіння) [°C];

t_2 – температура холодного дуття на змішування [°C];

$C_{p t_{11}}^M$ – теплоємність дуття при температурі t_{11} [$\frac{кДж}{кг \cdot K}$];

$C_{p t_{12}}^M$ – теплоємність дуття при температурі t_{12} [$\frac{кДж}{кг \cdot K}$];

$C_{p t_2}^M$ – теплоємність холодного дуття на змішування при температурі t_2 [$\frac{кДж}{кг \cdot K}$];

$C_{p t_{Дзад}}^M$ – теплоємність дуття на вході в піч при температурі $t_{Дзад}$ [$\frac{кДж}{кг \cdot K}$].

Значення масової теплоємності гарячого повітря для діапазону температур 900-1250°C [8] наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Масова теплоємність гарячого повітря

t [°C]	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250
$C_{p t}^M$ [$\frac{кДж}{кг \cdot K}$]	1,173	1,179	1,185	1,193	1,199	1,204	1,210	1,216

Паралельне функціонування двох повітрянагрівачів має бути припинене по закритті змішувальної заслони, коли температура змішаного дуття з обох ПН досягає заданого значення температури дуття.

$G_{33}(\tau)$ – кількість холодного дуття на змішування (змінюється в часі системою автоматичного регулювання температури дуття) [кг/с];

$t_1(\tau)$ – температура дуття на виході працюючого на дутті ПН (температура склепіння) [°C];

t_2 – температура холодного дуття на змішування [°C];

$C_{p t_1}^M$ – теплоємність дуття при температурі t_1 [$\frac{кДж}{кг \cdot K}$];

$C_{p t_2}^M$ – теплоємність дуття при температурі t_2 [$\frac{кДж}{кг \cdot K}$];

$C_{p t_3}^M$ – теплоємність дуття на вході в піч при температурі t_3 [$\frac{кДж}{кг \cdot K}$].

При паралельній роботі потік холодного повітря розділяється та у рівних частинах проходить через обидва ПН. Тоді задана температура дуття $t_{Дзад}$ буде визначатися рівнянням:

Ця умова свідчить про те, що змішаний потік дуття з обох повітрянагрівачів досяг номінального температурного рівня та більше не може його підтримувати. У такому випадку виникає необхідність відключення охолодженого ПН та підключення попередньо нагрітого агрегату для забезпечення безперервності технологічного процесу. В момент переключення температури дуття можна описати наступним рівнянням:

$$t_{Дзад} = \frac{k \cdot [0,5 \cdot G_{мр\Sigma} \cdot t_{11} \cdot C_{p t_{11}}^M + 0,5 \cdot G_{мр\Sigma} \cdot t_{12} \cdot C_{p t_{12}}^M]}{C_{p t_{Дзад}}^M \cdot k \cdot G_{мр\Sigma}}$$

Після спрощення маємо рівняння:

$$t_{Дзад} = \frac{0,5 \cdot [t_{11} C_{p t_{11}}^M + t_{12} C_{p t_{12}}^M]}{C_{p t_{Дзад}}^M}$$

або

$$t_{Дзад} \cdot C_{p t_{Дзад}}^M = 0,5 \cdot [t_{11} C_{p t_{11}}^M + t_{12} C_{p t_{12}}^M]. \quad (1)$$

Відповідно до рівняння (1), умовою забезпечення заданої температури дуття обома повітрянагрівачами в момент відсутності холодного дуття для змішування (при повному закритті ЗЗ системою автоматичного регулювання) є рівність між значенням ентальпії гарячого дуття та половиною значення ентальпії сумарного потоку дуття з ПН. У цьому рівнянні відомою є лише ліва частина, що включає задану температуру дуття та його теплоємність, тоді як права частина містить чотири невідомі параметри. Така кількість невідомих

унеможливило безпосереднє визначення температури холодного ПН у момент початку його відключення. Однак, враховуючи те, що значення теплоємності повітря в діапазоні 1000-1250°C відрізняються лише у другому знаку після коми (табл. 1), рівняння (1) може бути спрощене до наступного вигляду:

$$2 \cdot t_{\text{дзад}} \sim [t_{11} + t_{12}]. \quad (2)$$

Таким чином, у момент припинення подачі холодного повітря для змішування (закриття ЗЗ) сума температур дуття на виході більш нагрітого та більш охолодженого ПН має приблизно дорівнювати подвоєному значенню заданої температури дуття. Комбінації цілочисельних t_{11} та t_{12} в діапазоні 1000-1250°C, що задовольняють рівнянню (2), можуть мати варіативний характер. Визначення конкретних температурних значень та опис роботи ПН у паралельному режимі значно спрощується за умови однакової швидкості зниження температури дуття обох повітрянагрівачів.

Для розглянутого типу ПН при експлуатації в послідовному режимі тривалість перебування в режимі дуття практично ідентична для всіх ПН і становить 60 хв, а швидкість зниження температури протягом періоду дуття 1250-1000°C характеризується наступним співвідношенням:

$$v = \frac{1250 - 1100}{60} = 2,5^\circ\text{C}/\text{хв.}$$

При паралельному режимі роботи ця швидкість зменшується в два рази (1,25°C/хв), оскільки через кожен повітрянагрівач проходить вдвічі менший обсяг дуття.

За умови однакової швидкості зниження температури при паралельній роботі ПН момент закриття ЗЗ настає через однаковий проміжок часу від підключення нагрітого та відключення охолодженого повітрянагрівача. Це відбувається при досягненні заданого співвідношення температур t_{11} і t_{12} , коли нагрітий ПН знижує температуру до 1150°C, а охолоджений – до 1050°C, що задовольняє умовам як рівняння (2), так і рівняння (1).

Описане співвідношення є першим за часом, що настає в період дуття після підключення нагрітого повітрянагрівача з температурою 1250°C. Після відключення охолодженого та підключення нагрітого до 1250°C ПН функціонування в паралельному режимі продовжується до наступного закриття ЗЗ та настання умов, що відповідають рівнянню (1). Таким чином, робота ПН у паралельному режимі набуває регулярного характеру, що дозволяє автоматизувати процес переключення повітрянагрівачів.

У випадку різної швидкості зниження температури дуття при паралельній роботі ПН визначення моменту переключення ускладнюється через можливе невиконання умов рівняння (2). За таких обставин відключення охолодженого ПН доцільно здійснювати в

момент зниження температури дуття більш нагрітого повітрянагрівача на 100°C (з 1250°C до 1150°C) від початку його підключення. При цьому охолоджений ПН може мати різну температуру дуття при відключенні, що вимагатиме різної тривалості його нагрівання. Проте при роботі чотирьох ПН існує часовий резерв для забезпечення необхідного нагрівання.

Залежність тривалості нагрівання ПН від часу дуття при послідовному режимі роботи описується наступним рівнянням [1]:

$$\tau_1 = (N - 1)\tau_2 - 2\tau_{\text{п}}, \quad (3)$$

де τ_1 – час періоду нагрівання ПН, хв;

τ_2 – час періоду дуття ПН, хв;

N – кількість працюючих ПН у блоці, шт;

$\tau_{\text{п}}$ – час паузи (час переведення ПН з режиму дуття в режим нагрівання або навпаки), хв.

Час нагрівання (3) відповідає максимально можливому часу при послідовному режимі ПН у блоці. Слід зазначити, що шляхом впровадження відповідних технічних заходів цей параметр може бути скорочений. Наприклад, за умови роботи трьох ПН у блоці ($N = 3$), час дуття $\tau_2 = 60$ хв, а час паузи $\tau_{\text{п}} = 15$ хв, максимально можливий час нагріву складає $\tau_1 = 2 \cdot 60 - 2 \cdot 15 = 90$ хв.

Швидкість нагрівання дорівнює:

$$v = \frac{1250 - 1100}{90} = 1,67^\circ\text{C}/\text{хв.}$$

При одночасній роботі чотирьох ПН максимально можливий час нагрівання складає:

$$\tau_1 = 3 \cdot 60 - 2 \cdot 15 = 150 \text{ хв.}$$

Час нагрівання 90 хв при цьому мінімально достатній для одержання потрібної температури склепіння ПН, тобто, при послідовному режимі роботи ПН можна працювати 3-ма ПН в блоці.

Тривалість функціонування в режимі дуття при паралельній роботі ПН від моменту підключення нагрітого та відключення охолодженого агрегата збільшується до

$$\tau = \frac{1250 - 1150}{1,25} = 80 \text{ хв,}$$

що на 20 хв перевищує показник послідовного режиму. Отже, через 80 хв повинен бути нагрітим раніше відключений ПН, а його нагрів, як зазначено вище, потребує 90 хв часу. Це означає, що наявність трьох працюючих ПН не забезпечує паралельний режим роботи двох ПН в режимі дуття. Ситуація зміниться, якщо буде задіяний четвертий ПН і при цьому він буде нагрітим через 80 хв після відключення третього ПН. Графіки роботи трьох ПН у послідовному режимі та чотирьох у паралельному для розглянутої ДП наведені на рис. 2.

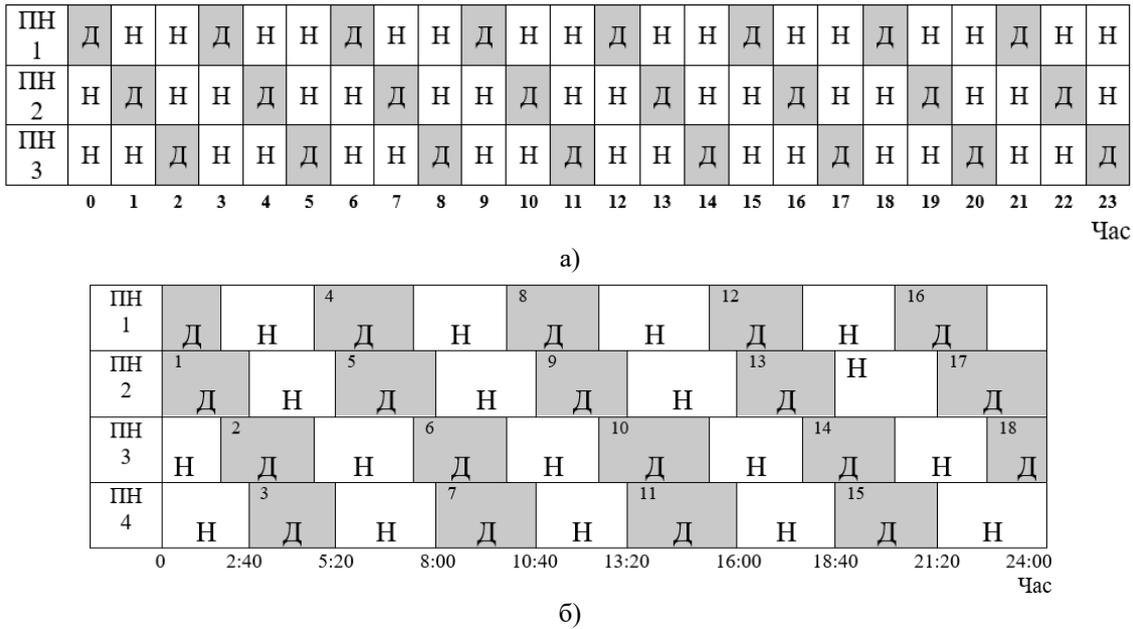


Рис. 2 – Графіки роботи блоку ПН у послідовному та паралельному режимах дуття: а) графік роботи 3-х ПН в послідовному режимі дуття; б) графік роботи блоку в паралельному режимі по два ПН (1-18 – номери і номери моменти переключень ПН). Д – робота в режимі дуття, Н – робота в режимі нагрівання

Відключений повітрянагрівач необхідно нагрівати від 1050°C до необхідної робочої температури 1250°C, що зумовлює збільшення тривалості його нагрівання порівняно з часом нагрівання при послідовному режимі експлуатації. Наприклад, для ДП об’ємом 2000 м³ при послідовному режимі нагрівання ПН від температури склепіння 1100°C до потрібної 1250°C (підвищення на 150°C) потребує 90 хв часу (швидкість нагріву 150/90 = 1,67 °C/хв), а при паралельному режимі нагрівання ПН від температури 1050°C до 1250°C (підвищення на 200°C) при лінійній залежності збільшення температури склепіння від часу (що підтверджується на практиці) потребує вже 200/1,67 = 120 хв. Таким чином, повний час роботи в режимі дуття кожного ПН в паралельному режимі буде дорівнювати:

$$\tau_2 = \frac{1250 - 1050}{1,25} = 160 \text{ хв.}$$

Час нагрівання складає:

$$\tau_1 = \frac{1250 - 1050}{1,67} = 120 \text{ хв.}$$

Відповідно до графіка роботи блоку ПН у паралельному режимі (рис. 2, б), тривалість нагрівання становить 160 хвилин, що забезпечує часовий резерв у 40 хвилин.

Експлуатація повітрянагрівачів у паралельному режимі порівняно з послідовним характеризується кількома суттєвими перевагами.

По-перше, досягається більш повне використання теплової енергії насадки ПН, оскільки тривалість дуття кожного повітрянагрівача збільшується з 60 хвилин при послідовному режимі до 160 хвилин у паралельному.

По-друге, забезпечується зменшення втрат тиску дуття на повітрянагрівачах. При функціонуванні у паралельному режимі обидва ПН на вході отримують розгалужений навіпіл потік холодного дуття, однаковий початковий тиск дуття та ідентичний тиск на виході (рис. 3).

Внаслідок цього, відповідно до формули Дарсі-Вейсбаха [9], перепад тиску (гідрравлічні втрати) зменшується за рахунок збільшення вдвічі прохідного перерізу для потоку дуття та зменшення вдвічі швидкості його руху через кожен з повітрянагрівачів. При роботі ПН у послідовному режимі втрати тиску на агрегаті визначаються наступним співвідношенням:

$$\Delta P_I = \Sigma \lambda_i \frac{L_1 V_1^2}{D_1 2g} \rho,$$

де $\Sigma \lambda_i$ – сумарний коефіцієнт втрат тиску при русі потоку дуття в каналі ПН;

V_1 – швидкість руху потоку через ПН [М/с];

L_1 – довжина каналу руху потоку через ПН [м];

D_1 – узагальнений діаметр каналу руху потоку через ПН [м];

ρ – густина повітря дуття [кг/м³];

g – прискорення вільного падіння [М/с²].

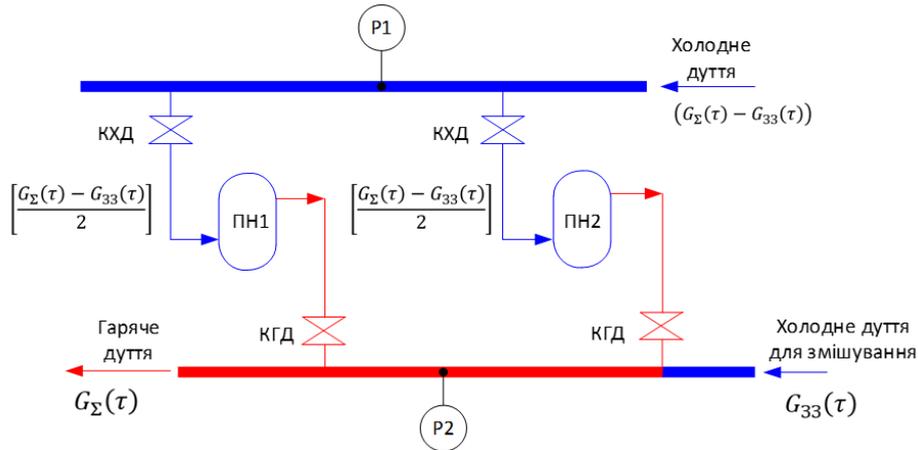


Рис. 3 – Технологічна схема паралельного режиму роботи на дутті двох ПН: КХД – клапан холодного дуття, КГД – клапан гарячого дуття, $G_{\Sigma}(\tau)$, $G_{зз}(\tau)$ – поточні значення кількості дуття загальної та для змішування відповідно

В паралельному режимі:

$$\Delta P_{II} = \Sigma \lambda_i \frac{L_1}{2D_1} \frac{(0,5V_1)^2}{2g} \rho = \frac{1}{8} \Sigma \lambda_i \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} \rho = \frac{1}{8} \Delta P_I.$$

Таким чином, досягається зменшення втрат тиску у вісім разів, що призводить до підвищення тиску дуття на фурмах доменної печі та, як наслідок, до інтенсифікації процесу плавки.

По-третє, функціонування блоку ПН у паралельному режимі забезпечує зменшення кількості переключень повітрянагрівачів між станами дуття та нагрівання. Зокрема, для розглянутої ДП при експлуатації у послідовному режимі переключення здійснюються з

періодичністю 60 хв, що відповідає тривалості роботи ПН на дутті, тоді як при паралельному режимі інтервал між переключеннями збільшується до 80 хв. Відповідно, при послідовному режимі реалізується 24 переключення протягом доби, тоді як при паралельному режимі їх кількість скорочується до 18.

По-четверте, досягається зменшення максимальної кількості холодного дуття для змішування $G_{зз\text{ мр}}(\tau)$ з температурою 100°C у момент підключення нового ПН, нагрітого до температури 1250°C, та залишеного в режимі дуття ПН з температурою 1150°C. Для умов розглянутої ДП величина цього параметра визначається наступним чином:

$$G_{зз\text{ мр}} = G_{\text{мр}\Sigma} \frac{k \cdot 0,5 \cdot t_{11} \cdot C_p^M T_{11} + k \cdot 0,5 \cdot t_{12} \cdot C_p^M T_{12} - t_{\text{Дзад}} \cdot C_p^M t_{\text{Дзад}}}{(1-k) \cdot t_{\text{Дзад}} \cdot C_p^M t_{\text{Дзад}} + k \cdot 0,5 \cdot t_{11} \cdot C_p^M T_{11} + k \cdot 0,5 \cdot t_{12} \cdot C_p^M T_{12} - t_2 \cdot C_p^M T_2}.$$

У представлену формулу підставлено відповідні значення всіх параметрів:

$$G_{зз\text{ мр}} = 77,4 \cdot \frac{0,9 \cdot [0,5 \cdot 1250 \cdot 1,216 + 0,5 \cdot 1150 \cdot 1,204 - 1100 \cdot 1,199]}{0,1 \cdot 1100 \cdot 1,199 + 0,45 \cdot 1250 \cdot 1,216 + 0,45 \cdot 1150 \cdot 1,204 - 100 \cdot 1,016]} = 6,949 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Це відповідає об'ємній кількості холодного дуття

$$G_{зз\text{ вр}} = \frac{6,949 \text{ кг/с}}{3,77 \text{ кг/м}^3} = 1,84 \text{ м}^3/\text{с},$$

в той час як при послідовному режимі роботи блоку ПН цієї ДП максимальна об'ємна кількість складає 2,6 м³/с.

Додатковою перевагою паралельного режиму є наявність часового резерву для нагрівання повітрянагрівачів, що підтверджується графіком їх роботи (рис. 2, б).

До недоліків паралельного режиму належить відсутність резервного ПН, оскільки всі чотири ПН блоку залучені до технологічного процесу. Проте при виході з ладу одного з повітрянагрівачів можливий оперативний перехід на послідовний режим із трьома ПН, що особливо ефективно реалізується при ручному способі переключення.

Блок-схема вибору режиму роботи блоку ПН та реалізації паралельного режиму наведена на рис. 4.

У блоці 1 здійснюється оцінювання основних параметрів роботи та поточного стану всіх повітрянагрівачів, зокрема працездатність кожного ПН, режим роботи, значення основних технологічних параметрів, швидкість зміни температурних характеристик тощо.

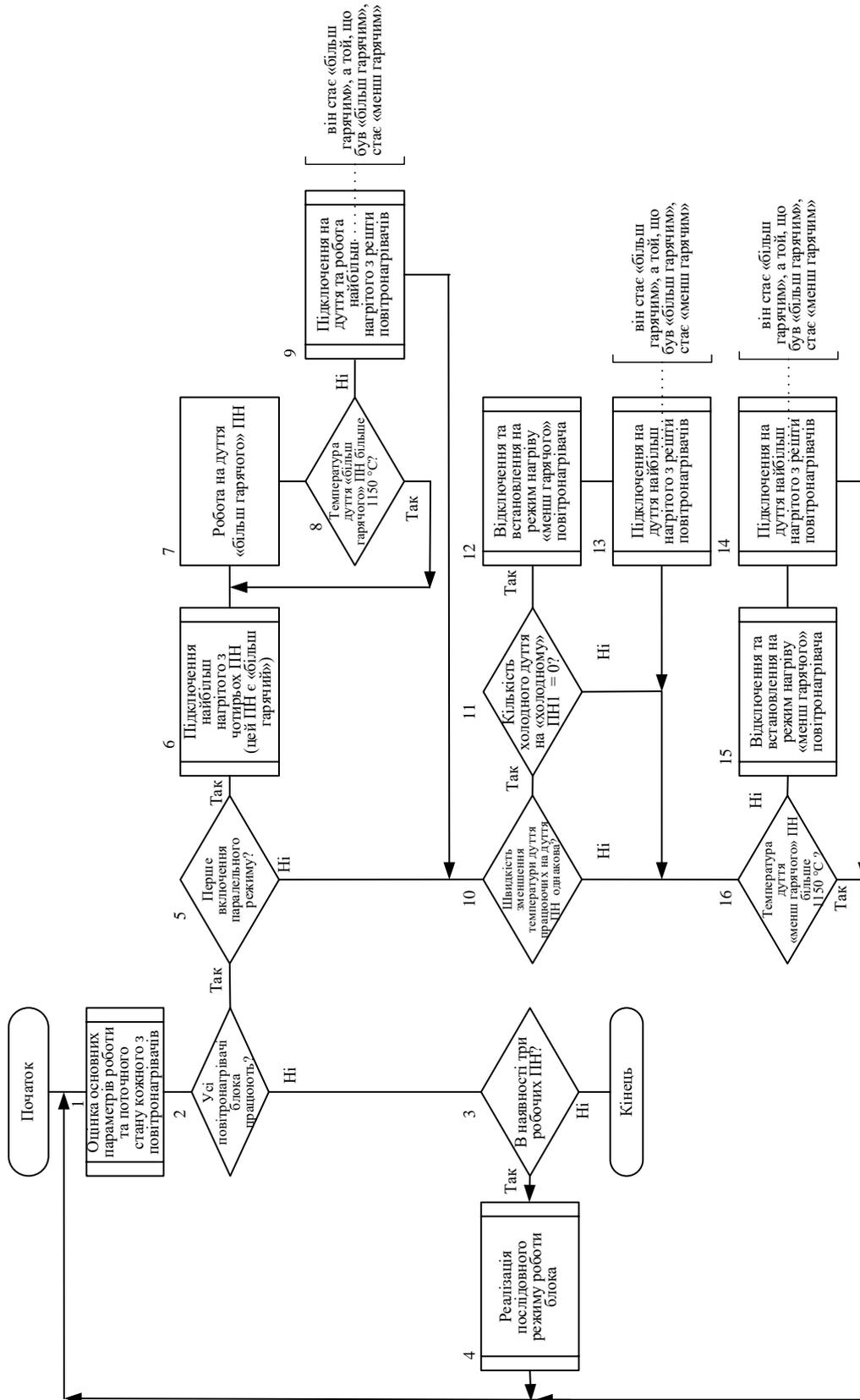


Рис. 4 – Блок-схема вибору режиму роботи та реалізації паралельного режиму роботи блока повітрянагрівачів доменної печі

За умови непрацездатності хоча б одного з чотирьох повітрянагрівачів реалізація паралельного режиму є неможливою, і робота блоку ПН продовжується в послідовному режимі (блоки 3, 4) за наявності трьох працездатних агрегатів. Якщо всі чотири ПН перебувають у робочому стані (блок 2), можлива експлуатація в паралельному режимі, і керування передається до блоку 5.

При першому активуванні паралельного режиму (блок 5) найбільш нагрітий з чотирьох повітрянагрівачів (він стає «більш гарячий») підключається (блок 6) і функціонує в режимі дуття (блоки 7, 8) до моменту зниження температури дуття до 1100°C. Після цього додатково активується (блок 9) найбільш нагрітий з трьох повітрянагрівачів, що залишилися (він стає «найгарячішим», тоді як ПН, що працював, переходить у статус «менш гарячого»). Таким чином забезпечується ініціація паралельного режиму роботи.

Якщо блок ПН вже функціонує в паралельному режимі (тобто перше активування вже відбулося), здійснюється перевірка (блок 10) відповідності швидкостей зниження температури на двох працюючих ПН. За умови їх ідентичності сигналом до відключення (і переведення в режим нагрівання) «менш гарячого» ПН є відсутність холодного повітря для змішування (блоки 11, 12, 13), після чого в режим дуття підключається наступний ПН. Якщо швидкості зниження температур дуття двох працюючих ПН є різними, таким сигналом слугує досягнення температури дуття на виході з «менш гарячого» ПН 1050°C та нижче (блоки 14, 15 та 16).

Запропонований алгоритм вибору режиму функціонування та реалізації паралельного режиму роботи блоку повітрянагрівачів (рис. 4) може бути інтегрований до автоматизованої системи керування блоком повітрянагрівачів [10].

Висновки

У статті обґрунтовано ефективність впровадження паралельного режиму функціонування двох повітрянагрівачів при нагріванні дуття у блоці чотирьох ПН доменної печі, що забезпечує суттєве підвищення стабільності температурного режиму потоку дуття та зниження гідравлічних витрат.

Розроблений алгоритм автоматичного керування дозволяє скоротити кількість переключень між режимами з 24 до 18 за добу. Разом із восьмиразовим зниженням витрат тиску це сприяє більш ефективному використанню теплової енергії регенератора.

Збільшення тривалості дуття одного ПН до 160 хв та оптимізація часу нагрівання на рівні 120 хв формують необхідний технологічний резерв для гнучкого регулювання параметрів процесу та мінімізації температурних коливань.

Практична реалізація запропонованої схеми не потребує значних капітальних інвестицій у модернізацію обладнання, що визначає її економічну доцільність

та забезпечує скорочення експлуатаційних витрат металургійного виробництва.

Перелік використаних джерел

- [1] Грес Л. П., Карпенко С. А., Миленина А. Е. Теплообменники доменных печей. Днепропетровск : Пороги, 2012. 491 с.
- [2] Modern Blast Furnace Ironmaking / M. Geerdes et al. 4th ed. IOS Press, 2020. 274 p. DOI: <https://doi.org/10.3233/stal9781643681238>.
- [3] Blast Furnace and Stoves | Eurotherm. URL: <https://www.eurotherm.com/heat-treatment-articles/blast-furnace-and-stoves/> (дата звернення: 12.05.2025).
- [4] Кравченко В., Койфман О., Сімкін О. Автоматизація технологічних процесів і виробництв у чорній металургії : навчальний посібник. Одеса : Олді+, 2023. 276 с. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17517.65761>.
- [5] Walsh G. C., Mitterer A. Cost effective operation of a blast furnace stove system. *Proceedings of the 1997 American Control Conference*, Albuquerque, NM, USA, 06 June 1997. Vol. 6. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACC.1997.609550>.
- [6] Costa W. B. da, Soares T. G., Souza L. E. de, Motta R. S. N. 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*, Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 October 2012. Vol. 6, no. 6. Pp. 80-90. DOI: <https://doi.org/10.5151/2594-357X-21537>.
- [7] Şahin A., Morari M. Optimizing control of hot blast stoves in staggered parallel operation. *IFAC Proceedings Volumes*. 2008. Vol. 41, no. 2. Pp. 1982-1987. DOI: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00337>.
- [8] 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. Washington, DC, USA : National Bureau of Standards, 1955. 508 p. DOI: <https://doi.org/10.6028/nbs.circ.564>.
- [9] Гідравліка : навч. посіб. / Возняк Л. В., Гімер П. Р., Мердх М. І., Паневник О. В. Івано-Франківськ : ІФНТУ, 2012. 327 с.
- [10] Using of Intelligence Analysis of Technological Parameters Database for Implementation of Control Subsystem of Hot Blast Stoves Block ACS / Koyfman O., Simkin O., Klimov Y., Scherbakov S. *Computer Modeling and Intelligent Systems: Proceedings of the 4th International Workshop, Zaporizhzhia, 27 April 2021*. Pp. 145-157. DOI: <https://doi.org/10.32782/cmis/2864-13>.

CONTROL OF HOT BLAST STOVE GROUP DURING PARALLEL BLAST OPERATION OF TWO STOVES

Kravchenko V.P.	<i>PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8467-7796, e-mail: kravchenko_vp@ukr.net;</i>
Koifman O.O.	<i>PhD (Engineering), associate professor, TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC" LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2075-7417, e-mail: aleksey.koifman@mipolytech.education;</i>
Simkin O.I.	<i>PhD (Engineering), professor, TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC" LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9939-7866, e-mail: a.i.simkin@mipolytech.education;</i>
Miroshnychenko V.I.	<i>PhD (Engineering), associate professor, TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC" LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5956-7867, e-mail: v.i.miroshnychenko@mipolytech.education</i>

The technological process of blast furnace smelting requires continuous supply of hot blast with stable temperature and flow rate parameters to the blast furnace. However, the formation of such a flow is characterized by cyclical nature due to the specific functioning of hot blast stoves as regenerative-type thermal units. Traditionally, blast furnaces utilize four hot blast stoves combined into a single technological unit, with sequential operation being the most widespread mode where one unit supplies blast while others undergo heating. Temperature stabilization during steady-state operation presents no technological difficulties; however, ensuring temperature stability during stove switching represents considerably greater complexity, as transitional periods are characterized by the most significant system disturbances, particularly substantial blast temperature excursions above nominal values that negatively impact the thermal balance of the blast furnace. This study aims to comprehensively analyze the parallel operation mode of two blast furnace hot blast stoves during hot blast formation. A mathematical model of parallel operation was developed to investigate its characteristic features and compare the effectiveness of parallel mode relative to traditional sequential operation schemes. The research establishes that during parallel operation, the cold air flow is divided equally between both stoves, and temperature stabilization is achieved through automatic regulation of cold air mixing in the hot blast pipeline. The condition for switching stoves is defined by the relationship whereby the sum of blast outlet temperatures from the hotter and cooler stoves must approximately equal twice the target blast temperature value when the mixing damper is fully closed. For a blast furnace with 2000 m³ volume, the parallel operation mode extends the blast period for each stove from 60 minutes in sequential mode to 160 minutes, while the heating period increases from 90 to 120 minutes, providing a 40-minute operational reserve. The research demonstrates that parallel operation achieves an eight-fold reduction in hydraulic pressure losses due to the doubled flow cross-section and halved velocity through each stove, decreases the number of daily switching operations from 24 to 18, and reduces maximum cold air mixing requirements from 2.6 to 1.84 m³/s at the moment of connecting a newly heated stove. An algorithmic framework for automatic control system integration is proposed, enabling selection of the optimal operation mode based on stove availability and operational parameters. The algorithm ensures adaptive transition between sequential and parallel modes depending on the technical condition of the equipment. The main limitation of parallel mode is the absence of a reserve stove, as all four units are involved in the technological process; however, rapid transition to sequential mode with three stoves remains possible in case of equipment failure. The scientific novelty lies in developing a mathematical description of parallel operation and establishing quantitative relationships between operational parameters. The practical significance is manifested in substantially improved thermal efficiency of regenerator energy utilization, enhanced blast temperature stability, reduced hydraulic losses leading to increased blast pressure at furnace tuyeres and intensified smelting process, and decreased frequency of transitional disturbances in the blast supply system. Further research directions include optimization of heating schedules and investigation of extended parallel operation modes under varying technological conditions.

Keywords: blast furnace, hot blast stove, parallel operation mode, stove switching conditions, blast pressure loss reduction, number of stove switches, switching algorithm, control system.

References

- [1] L. P. Gres, S. A. Karpenko, and A. E. Milenina, *Теплообmenniki domennykh pechey*. Dnipropetrovsk, Ukraine: Porogi, 2012.
- [2] M. Geerdes et al., *Modern Blast Furnace Ironmaking*. Amsterdam, Netherlands: IOS Press, 2020. doi: 10.3233/STAL9781643681238.
- [3] Blast Furnace and Stoves – Eurotherm by Watlow. Eurotherm. [Online]. Available: <https://www.eurotherm.com/heat-treatment-articles/blast-furnace-and-stoves/>. Accessed on: December 10, 2024.
- [4] V. Kravchenko, O. Koifman, and O. Simkin, *Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv i*

vyrobnytstv u chornii metalurhii: navchalnyi posibnyk [Automation of technological processes and production in ferrous metallurgy: a textbook]. Odesa, Ukraine: Oldi+, 2023. doi: **10.13140/RG.2.2.17517.65761**. (Ukr.)

- [5] G.C. Walsh and A. Mitterer, "Cost effective operation of a blast furnace stove system," in *Proc. of the American Control Conference*, Albuquerque, NM, USA, June 06, 1997, vol. 6, pp. 3852-3856. doi: **10.1109/ACC.1997.609550**.
- [6] W.B. da Costa, T.G. Soares, L.E. de Souza, and R.S.N. Motta, "Blast Furnace Hot Stove Changeover by Thermal Control," in *Proc. of the 42^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas / 6th Int. Congress on the Science and Technology of Iron-making*, Rio de Janeiro, Brazil, Oct. 14-18, 2012, vol. 6, no. 6, pp. 80-90. doi: **10.5151/2594-357X-21537**.
- [7] A. Şahin and M. Morari, "Optimizing control of hot blast stoves in staggered parallel operation," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 1982-1987, 2008. doi: **10.3182/20080706-5-KR-1001.00337**.
- [8] J. Hilsenrath et al., 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. Washington, DC, USA: National Bureau of Standards, 1955. doi: **10.6028/nbs.circ.564**.
- [9] L.V. Voznyak, P.R. Gimer, M.I. Merdukh, and O.V. Panivnyk, *Hidravlika: Navchalnyi posibnyk* [Hydraulics: a textbook]. Ivano-Frankivsk, Ukraine: IFNTUNG Publ., 2012. (Ukr.)
- [10] O. Koyfman, O. Simkin, Y. Klimov, and S. Scherbakov, "Using of Intelligence Analysis of Technological Parameters Database for Implementation of Control Subsystem of Hot Blast Stoves Block ACS," in *Proc. of the 4-th Int. Workshop «Computer Modeling and Intelligent Systems»*, Zaporizhzhia, April 27, 2021, pp. 145-157. doi: **10.32782/cmisis/2864-13**.

Стаття надійшла 30.09.2025

Стаття прийнята 22.10.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Керування групою повітрянагрівачів доменної печі під час паралельної роботи на дутті двох повітрянагрівачів / Кравченко В. П., Койфман О. О., Сімкін О. І., Мірошніченко В. І. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 52. С. 140-150. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351016>.