

УДК 669.14.018; 668.168

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-26>

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ТА ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ КОЛОСНИКОВОГО ПОЛЯ ПІД ЧАС ОБПАЛЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ

Іванов Андрій Сергійович,

заступник начальника фабрики огрудкування

ПрАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат»

Панченко Ганна Миколаївна,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри металургійних технологій

Державного університету економіки і технологій

ORCID ID: 0000-0001-7565-0380

Сусло Наталія Валеріївна,

кандидат технічних наук, доцент,

директор навчально-наукового технологічного інституту

Державного університету економіки і технологій

ORCID ID: 0000-0001-9280-6316,

Гук Єлізавета Сергіївна,

асистент кафедри хімічних технологій та інженерії

Державного університету економіки і технологій

ORCID ID: 0000-0002-8866-9467

У статті розглянуто вплив температурного режиму та складу газової фази на працездатність колосникового поля в обпалювальних машинах під час виробництва залізорудних окатишів. Показано, що робочі елементи обпалювального обладнання зазнають значних термоциклічних навантажень, особливо за короткочасних зупинок машини, які супроводжуються різкими перепадами температур. Установлено, що ці умови сприяють підвищеному зносу колосників і зменшенню їх ресурсу. Проведено аналіз розподілу температури та концентрацій основних компонентів газового середовища (O_2 , CO, NO_x , SO_2) по довжині обпалювальної машини. Визначено ділянки, де поєднання температурних коливань і агресивного газового середовища створює найвищі ризики виходу з ладу сталевих елементів. Запропоновано напрями зниження негативного впливу зазначених чинників на колосникове поле шляхом оптимізації експлуатаційних режимів і мінімізації зупинок машини.

Ключові слова: колосникове поле, температурний режим, термоциклічне навантаження, газова фаза, окатиші, обпалювальна машина.

Ivanov Andrii, Panchenko Hanna, Suslo Nataliia, Huk Yelyzaveta. Investigation of the Influence of Temperature Regime and Gaseous Environment on the Serviceability of Grate Bars during Iron Ore Pellet Roasting

The article examines the influence of temperature regime and gas composition on the serviceability of grate bars in roasting machines used for iron ore pellet production. It is shown that the operating elements are exposed to significant thermocyclic loads, particularly during short-term machine stoppages, which are accompanied by sharp temperature changes. These conditions lead to accelerated wear of the grate bars and a reduced service life. The study includes an analysis of temperature distribution and concentrations of key gas components (O_2 , CO, NO_x , SO_2) along the length of the roasting machine. Critical areas were identified where the combination of temperature fluctuations and an aggressive gaseous environment poses the greatest threat to the integrity of steel components. The article suggests strategies to reduce the negative impact of these factors through the optimization of operating conditions and minimization of unplanned downtime.

Keywords: grate system, temperature regime, thermal cycling, gas phase, pellets, roasting machine.

Вступ. Залізорудні окатиші є основною сировиною для доменної плавки – ключового етапу у виробництві чавуну. Саме від якості

окатишів значною мірою залежить ефективність металургійного процесу, витрата палива, стабільність роботи доменних печей та вихід

продукції з необхідними експлуатаційними характеристиками.

На сучасному етапі розвитку гірничо-металургійної галузі питання забезпечення стабільного та контрольованого технологічного процесу виробництва окатишів набуває особливої актуальності. Його серцевиною є обпалення окатишів, що виконується у складному термохімічному середовищі на конвейєрних обпалювальних машинах. Важливим конструктивним елементом цих машин є колосникове поле, яке забезпечує не лише переміщення, а й рівномірне прогрівання та охолодження шару шихти.

Підвищення вимог до якості готової продукції та розширення міжнародних ринків збуту зумовлює посилення стандартів і до матеріалів, з яких виготовляються робочі елементи технологічного обладнання. Особливо це стосується жароміцних сталей для колосникових решіток, які працюють в умовах значних термоциклічних та хімічних навантажень. Їх надійність, довговічність і стійкість до руйнування безпосередньо впливають на ефективність, безперервність та економічність виробництва окатишів.

Тому в роботі проаналізовано механізми втрати працездатності колосникового поля, вплив технологічного середовища на вихід із ладу сталевих елементів, а також виявлено критичні фактори, що визначають хімічну стійкість конструкційних матеріалів в умовах обпалення.

Методи та методики дослідження. Методологічною основою дослідження є експериментальні вимірювання та матеріалознавчий аналіз, спрямовані на встановлення механізмів втрати працездатності колосникових решіток.

Для дослідження хімічного складу газів, що проходять через колосникову решітку в умовах реальної експлуатації, використано газоаналізатор типу OKCI-5M. Газоаналіз проводився безпосередньо на обпалювальній машині Лургі-552 ПрАТ «ПівнГЗК» у місті Кривий Ріг. Було здійснено 12 замірів, що дозволило отримати просторове розподілення основних газових компонентів – O_2 , CO , SO_2 , NO_x – по довжині машини. Крім того, проводився контроль температурного режиму за допомогою стаціонарних термопар.

Окрему увагу приділено аналізу термоциклічних навантажень, що діють на решітку в процесі експлуатації.

Результати. На сучасних гірничозбагачувальних комбінатах для виробництва окатишів здебільшого використовуються конвейєрні обпалювальні машини, на яких встановлюються колосникові решітки різних типів і конструкцій. Головно застосовується колосникове поле

трьох типів: ланцюгове, суцільнолите і набірне (що складається з окремих колосників). Основні типи колосникових решіток представлено на рис. 1.

В обпалювальних машинах з ланцюговими колосниковими решітками відсутні візки. У таких машинах колосники збираються в ланцюг, який рухається відносно рами обпалювальної машини. У ланцюгових колосникових решіток досить складна конструкція і низька ремонтпридатність.

Суцільнолиті колосникові решітки являють собою литу секцію з поперечними щілинами для просмоктування газу. Основний недолік таких решіток – у разі прогорання колосникового поля доводиться міняти цілу секцію, що пов'язано зі значними витратами на заміну решітки. Цей тип решіток не набув широкого застосування.

Натепер найбільшого поширення набули набірні колосникові решітки. Колосникове поле збирається з окремих колосників різноманітних конструкцій, установлених на обпалювальних візках (рис. 1, в). Такі решітки зручні в експлуатації, мають хорошу ремонтпридатність, оскільки для відновлення працездатності конвейєрної машини досить замінити колосники, що вийшли з ладу.

На ПрАТ «ПівнГЗК» (м. Кривий Ріг) обпалення залізородних окатишів здійснюється на обпалювальній машині Лургі-552 [1]. Довжина машини 138 м, ширина 4 м. Вона обладнана 216 обпалювальними візками розміром $4 \times 1,5$ м кожна. На візку встановлюється від 360 до 380 колосників (плюс 4–5 колосників із кожного боку) в кожному з 4 рядів. Усього в одному ряді встановлюється від 90 до 95 колосників.

Колосники, що застосовуються в обпалювальних машинах, працюють в умовах постійного перепаду температур від 50–80 °С (зони завантаження та охолодження) до 1100–1300 °С (зона обпалення). Тому для їх виготовлення використовують жароміцні й жаростійкі сталі та чавуни.

Однак стійкість таких колосників в умовах обпалення окатишів невисока і становить у середньому 6–9 місяців. Заміна колосників, що втратили працездатність, здійснюється шляхом зупинки конвейєрної машини і заміни всього візка. Зазвичай тривалість зупинки машини для заміни візка на Лургі-552 може становити до 20 хвилин.

На ПрАТ «ПівнГЗК» вимірювання температури і складу газів, що відходять, проводилося газоаналізатором OKCI-5M. Хромель-алюмелева термопара з електродами діаметром 1,3 мм застосовувалася для виміру температури на

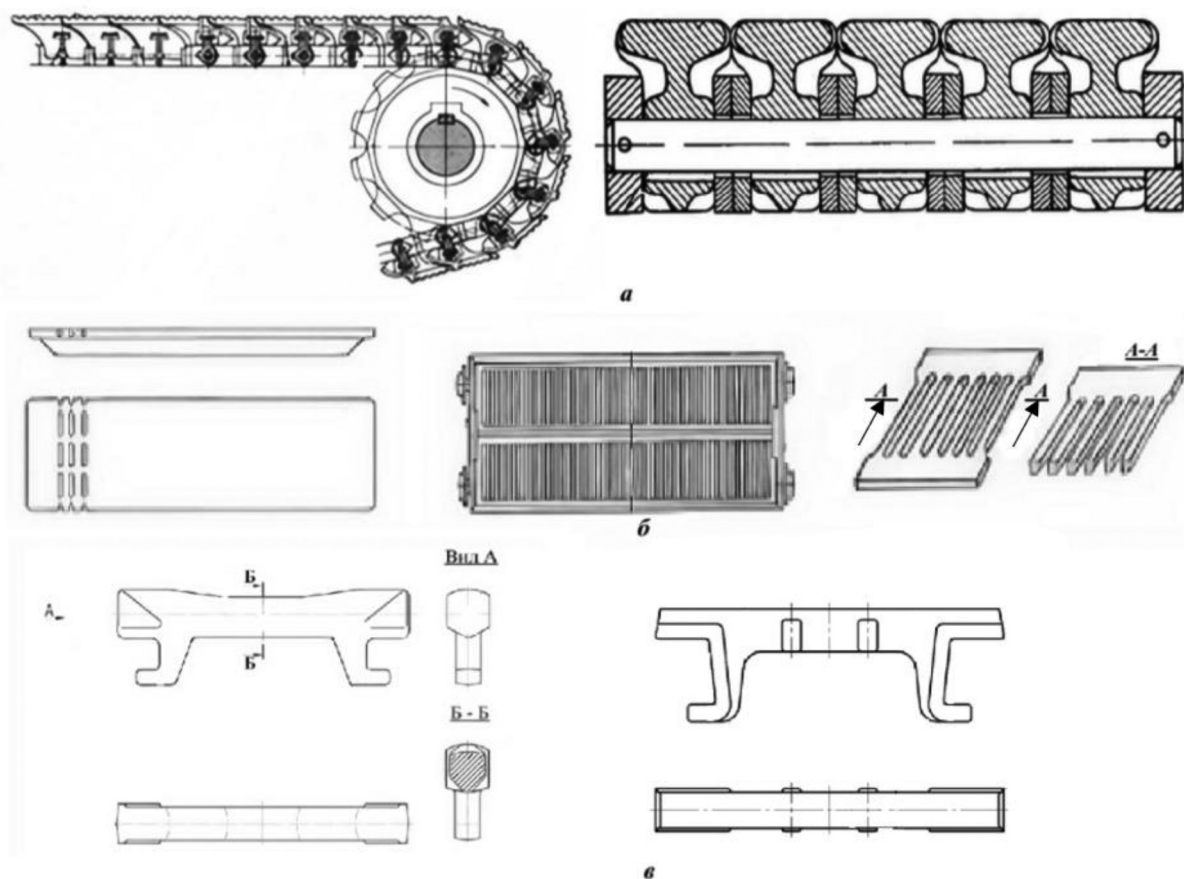


Рис. 1. Типи колосникових решіток: а) ланцюгова колосникова решітка; б) суцільнолита колосникова решітка; в) конструкції колосників набірних колосникових решіток

поверхні колосників. Як вторинний прилад використовували мілівольтметр із градуванням ХА. Вільні кінці термопари за допомогою кабелю підводилися до бортів візка, де під'єднувалися до контрольно-виміральної апаратури. Експериментальні дані з виміру температур на

колосниках за безупинної роботи обпалювальної машини представлено на рис. 2.

Результати отримані за швидкості руху стрічки 4,2 м/хв. і витрати газу 23,5 нм³/год. Середня швидкість нагріву колосників у зоні обпалення (за температури газу-носія

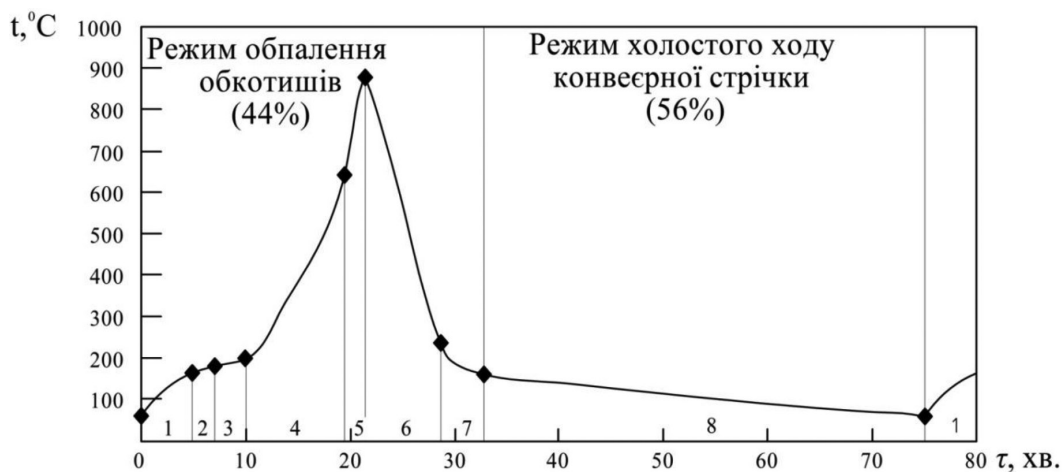


Рис. 2. Зміна температури колосників під час обпалення офлюсованих залізорудних окатишів на конвеєрній машині Лургі-552: 1 – сушка 1; 2 – сушка 2; 3 – підігрів; 4 – обпалення; 5 – рекуперація; 6 – охолодження 1; 7 – охолодження 2; 8 – холостий хід колосників

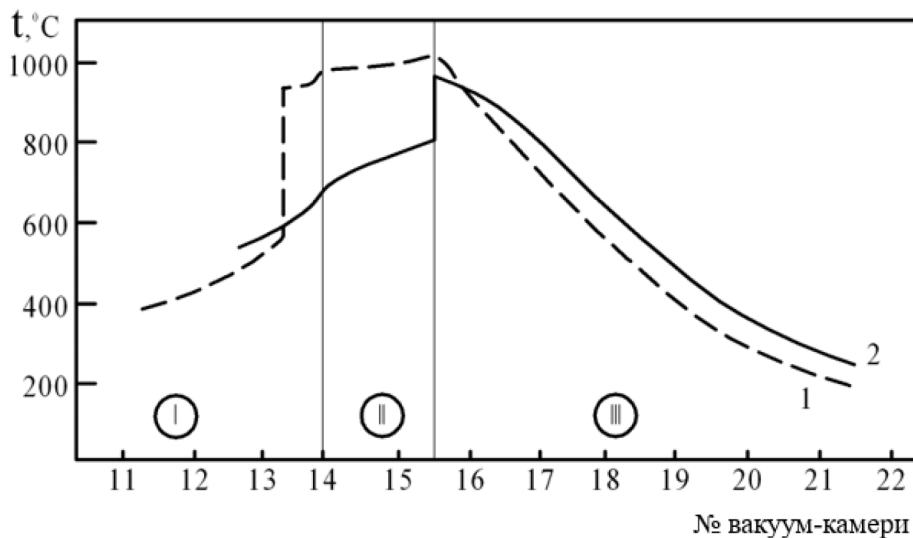


Рис. 3. Зміна температури колосників у разі зупинок машини:
I – зона обпалення; II – зона рекуперації; III – зона охолодження;
1 – зупинка в камері 13; 2 – зупинка на стику 15 і 16 камер

830–1280 °C) в умовах експерименту становила 47 град/хв., а в зоні рекуперації – 107,5 °C/хв. Збільшення швидкості нагріву в зоні рекуперації, незважаючи на відсутність пальників, пояснюється тепловою інерцією шару окатишів. У цій же зоні спостерігається і максимум температур, оскільки під час переходу від 15 до 16 вакуум-камери потік гарячих газів на колосники від шару окатишів змінюється на потік холодного повітря через колосники в шар. Швидкість охолодження колосників у камері 16 становить приблизно 105 °C/хв. Таким чином, на межі зон рекуперації і охолодження відбувається різка зміна умов роботи колосників. Швидкий нагрів змінюється не менш швидким охолодженням. Подібний режим роботи машини створює умови, за яких можливе протікання структурних перетворень у колоснику (збільшення розміру зерна, перекристалізація аустеніту у ферит та ін.).

У разі нормальної роботи машини, залежно від стану колосників і іншого устаткування, кількість зупинок може досягати декількох за зміну, що чинить істотний вплив на умови експлуатації колосників. Оскільки при цьому пальники не відключаються, а лише дещо зменшується подача дуття, колосники, що опинилися в зонах обпалення і рекуперації, витримують тривалішу й інтенсивнішу теплову дію порівняно з безупинним режимом.

Експерименти з виміру температури колосників за короточасних зупинок машини проводили в момент проходження візків із термопарою в 13 і на стику 15 і 16 камер. Тривалість зупинок була відповідно 8 і 6 хвилин. Отримані експериментальні дані представлено на рис. 3.

З рис. 3 видно, що в разі зупинки в камері 13 (крива 1) температура за 8 хвилин піднялася з 560 до 930 °C, швидкість нагріву в середньому становила 46 град/хв. Після початку руху температура колосників збільшилася до 1005 °C на стику 15 і 16 камер, після чого почала різко падати, що пояснюється технологічним режимом обпалення окатишів, оскільки вакуум-камера 16 відповідає початку режиму охолодження обпалених окатишів. Швидкість охолодження в камері 16 становила 137 град/хв. За зупинки на стику 15 і 16 камер (рис. 3, крива 2) спостерігається менш інтенсивне зростання температури (за 6 хвилин із 810 до 960 °C). Швидкість нагріву і наступного охолодження при цьому істотно нижча (25 і 62 град/хв. відповідно).

Криві температури колосників 1 і 2 у зоні охолодження мають загасаючий характер (рис. 4). Під час зупинки візка на стику 15 і 16 вакуум-камер стаціонарні термопари показали підвищення температури в горні на 112 °C, що і викликає підвищення температури на колосниках під час зупинки машини.

Проведені дослідження показали, що за експлуатації обпалювальної машини в нормальному режимі колосники піддаються циклічному тепловому впливу, що супроводжується різкою зміною температури під час переходу колосників із зони рекуперації в зону охолодження. Максимальна температура на поверхні колосників при цьому не перевищує 900–920 °C.

Найбільш несприятливі умови роботи колосників виникають за короточасних зупинок машини (особливо на візках, що перебувають

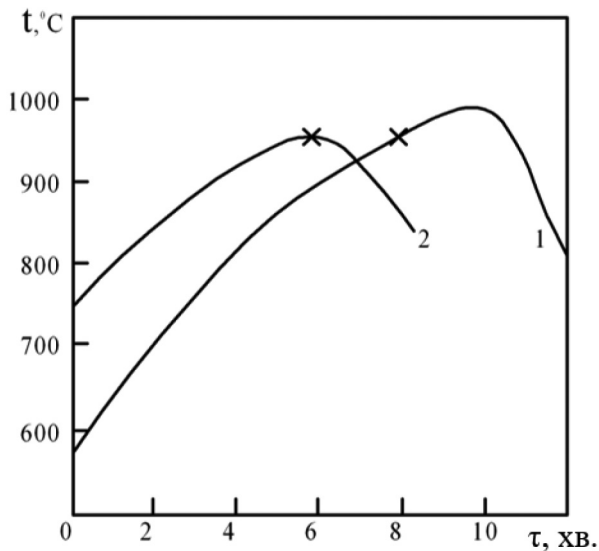


Рис. 4. Зміна температури колосників у разі зупинок машини: 1 – зупинка машини за перебування експериментального візка в зоні обпалення (вакуум-камері 13); 2 – зупинка машини за перебування експериментального візка в зоні рекуперації (на стику 15 і 16 вакуум-камер); х – момент початку руху візка

у зонах обпалення і рекуперації). Тривалість високотемпературної дії на них збільшується і значно зростає максимальна температура колосників у зоні рекуперації, яка сягає 1005 °С.

З огляду на неможливість повного усунення зупинок машини навіть у разі нормального стану устаткування колосники повинні мати високу жаростійкість за короткочасної дії температури до 1000 °С. Таким чином, забезпечення стабільної роботи устаткування і зменшення

кількості зупинок обпалювальної машини на профілактичні огляди і ремонт зумовлює підвищення стійкості колосників.

Окрім температурного режиму роботи обпалювальної машини, причинами втрати працездатності колосників також є хімічний склад газів, що утворюються в процесі обпалення окатишів.

Із 12 замірів, виконаних газоаналізатором ОКІ-5М на Лургі-552, виявлено наявність таких газів, як O_2 , CO , SO_2 , NO_x . Вміст кисню по довжині обпалювальної машини коливається в межах від 13 до 17 %, причому в разі зупинки машини він зростає до 20 %, при цьому спостерігається також різке збільшення SO_2 , тоді як NO_x і CO зменшується. Вміст CO , SO_2 , NO_x по довжині машини нерівномірний та показаний на рис. 5–7.

У разі взаємодії матеріалу колосника із сіркою можуть утворюватися легкоплавкі евтектики з температурою плавлення значно нижчою за температури в колоснику під час обпалення окатишів (для заліза – 985 °С, для нікелю – 645 °С), що може призводити до знищення окалини на деяких ділянках, відкриваючи нові місця для корозійного впливу газового середовища [2].

Висновки.

1. Колосникові решітки обпалювальних машин піддаються інтенсивним термоциклічним навантаженням, зокрема під час зупинок агрегату. Найбільші перепади температур фіксуються на межі зон рекуперації та охолодження, де швидкість зміни температури може сягати 137 °С/хв.

2. Виявлено, що короткочасні зупинки машини сприяють нагріву колосників до

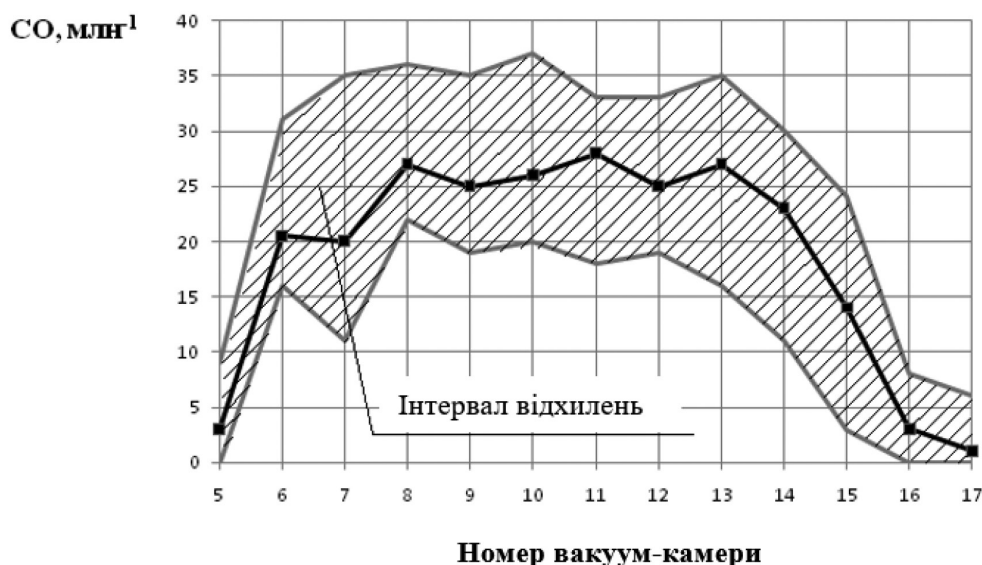


Рис. 5. Графік розподілення CO під колосниками обпалювального візка по довжині машини

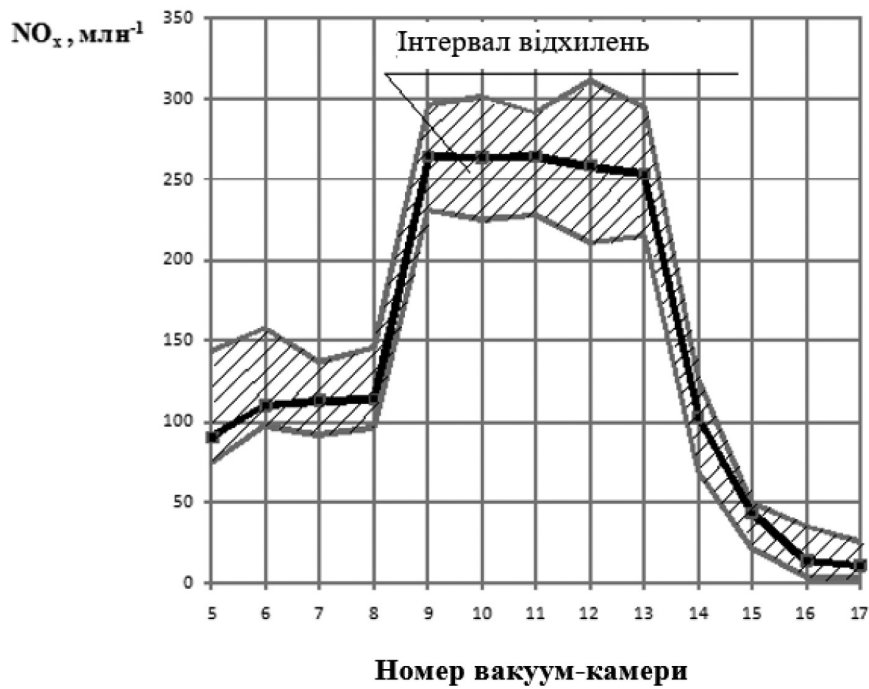


Рис. 6. Графік розподілення NO_x під колосниками обпалювального візка по довжині машини

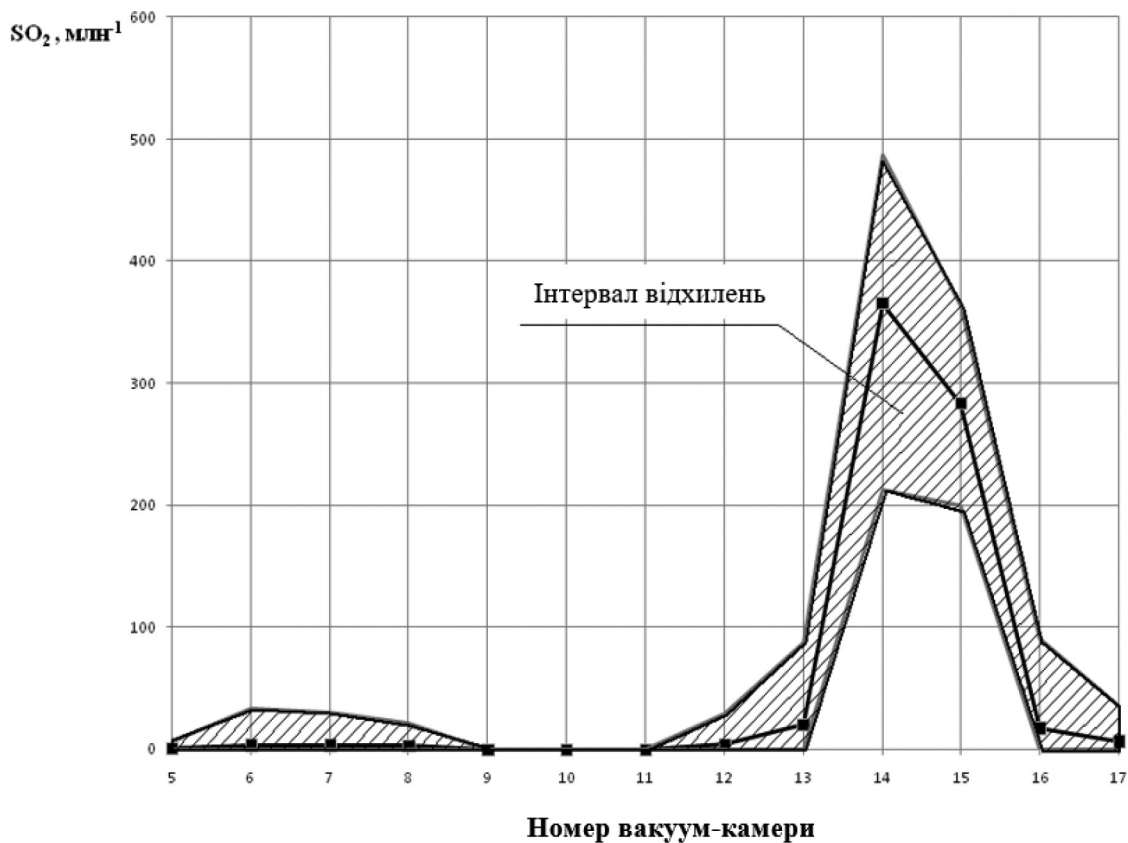


Рис. 7. Графік розподілення SO₂ під колосниками обпалювального візка по довжині машини

температур, близьких до критичних для жароміцних сталей (до 1005 °С). Це створює передумови для структурних перетворень у матеріалі решіток та зниження їх ресурсу.

3. Газовий склад атмосфери обпалення є ключовим чинником зменшення робочого ресурсу колосників. Високі концентрації SO₂ у поєднанні з високими температурами

сприяють утворенню легкоплавких евтектик, що знижують захисну здатність окалини і прискорюють корозію.

4. Ідентифіковано критичні зони по довжині машини, де спостерігається поєднання високих температур і концентрацій агресивних газів (зони обпалення, рекуперації).

5. Для підвищення стійкості колосникового поля рекомендовано:

- мінімізувати кількість зупинок машини;
- забезпечувати рівномірність газового обігріву по довжині агрегату;
- адаптувати склад шихти для зменшення вмісту сірковмісних компонентів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гук Є. С., Панченко Г. М., Сусло Н. В. Дослідження умов експлуатації агломераційних та обпалювальних машин і розробка рекомендацій щодо підвищення стійкості колосникового поля ; Державний університет економіки і технологій, 2023. URL: <https://www.duet.edu.ua/uploads/DocS/st2.pdf> (дата звернення: 24.06.2025).

2. Kubaschewski O., Hopkins B. E. Oxidation of metals and alloys. 2nd ed. London : Butterworths, 1967. 319 p.

REFERENCES:

1. Huk, Y. S., Panchenko, H. M., & Suslo, N. V. (2023). *Doslidzhennia umov ekspluatatsii ahlomeratsiinykh ta obpaliuvalnykh mashyn i rozrobka rekomendatsii shchodo pidvyshchennia stiikosti kolosnykovoho polia* [Research on the operating conditions of sintering and roasting machines and development of recommendations for improving the durability of the grate field] (in Ukrainian). State University of Economics and Technology. Retrieved from <https://www.duet.edu.ua/uploads/DocS/st2.pdf>.

2. Kubaschewski, O., & Hopkins, B. E. (1967). *Oxidation of metals and alloys* (2nd ed.) (in English). London : Butterworths.