

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-03>

УДК 669.162

**В. В. Горупаха**<sup>1</sup>, н.с., ORCID 0000-0003-0531-1871**Ю. С. Семенов**<sup>1,\*</sup>, к.т.н., с.н.с., зав. відділу, ORCID 0000-0003-2299-5742**О. Ю. Худяков**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0002-6507-1120**Є. І. Шумельчик**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0001-5350-6425**С. В. Ващенко**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0001-8344-961X**К. В. Баюл**<sup>1</sup>, д.т.н., пр.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0003-1426-7956<sup>1</sup> *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некасова НАН України*\* *Автор для листування: [yuriy.semenov.isi@gmail.com](mailto:yuriy.semenov.isi@gmail.com)*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ОКРУЖНОГО ГАЗОРОЗПОДІЛУ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЇ ПРО РОЗПОДІЛ ДУТТЯ ТА СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ**

**Анотація.** У статті представлено результати досліджень окружного газорозподілу в доменній печі з використанням інформації про розподіл дуття та сучасних засобів контролю, виконаних на доменних печах ПрАТ «Камет-сталь». Виділені постійні та змінні фактори впливу на нерівномірність витрат дуття по окружності доменних печей. Основними постійними факторами є особливості та технічні рішення тракту підведення гарячого дуття, розташування льоток та конструктивні особливості футерівки зони льоток. Визначено якісний та кількісний вплив вузлів підведення дуття від прямого до кільцевого повітропроводу, а також розташування чавунних льоток для сучасної роботи доменних печей ПрАТ «Камет-сталь». Основними змінними факторами впливу на нерівномірність витрат дуття є технологічні та паливно-сировинні умови доменної плавки. У статті розроблено критерій оцінки окружної рівномірності дуття для періодичних вимірювань цієї нерівномірності, а також встановлені кореляційні залежності основних газодинамічних та температурно-теплових параметрів фурменої зони, а саме: швидкості дуття на виході із фурми, яка відображає фактичний об'єм дуття, що проходить через переріз повітряної фурми без урахування впливу палива, що подається у фурму та без урахування впливу теплового випромінювання осередку горіння; витрати дуття та теоретичної температури горіння, яка відображає ізотермічний температурно-тепловий баланс фурменої зони, в залежності від величини коефіцієнта нерівномірності розподілу дуття по окремих повітряних фурмах для умов роботи доменних печей ПрАТ «Камет-сталь». У статті встановлений зв'язок між окружною нерівномірністю дуття по

© В. В. Горупаха, Ю. С. Семенов, О. Ю. Худяков, Є. І. Шумельчик, С. В. Ващенко, К. В. Баюл, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

повітряних фурмах та температурою периферійного газового потоку та зв'язок між теоретичною температурою горіння та температурними показниками оцінки газового потоку над поверхнею засипу шихти, які характеризують розвиток осьового та периферійного газового потоку, газопроникність проміжної зони радіусу колошника печі та розмір осьової віддушини. Розглянутий та проаналізований багатофакторний зв'язок між: дуттям – теоретичною температурою горіння – співвідношенням відновлення в «нижній» та «верхній» зоні доменної печі – рудним навантаженням, показана необхідність дотримання умов спалювання паливних домішок для зниження теоретичної температури та досягнення економічності доменної плавки.

**Ключові слова:** доменна піч, управління доменною плавкою, пиловугільне паливо, окружний розподіл дуття, температури газового потоку.

**Посилання для цитування:** Дослідження окружного газорозподілу в доменній печі з використанням інформації про розподіл дуття та сучасних засобів контролю / В. В. Горупаха, Ю. С. Семенов, О. Ю. Худяков, Є. І. Шумельчик, С. В. Ващенко, К. В. Баюл // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2025. Вип. 39. С. 34-60. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-03>.

### **Стан проблеми**

Кількісний розподіл дуття по повітряних фурмах та його нерівномірність значно впливає на газорозподіл і тепловий стан у всьому об'ємі доменної печі. При значному відхиленні витрати дуття по окремих повітряних фурмах від середнього значення, створюється нерівномірність теплового стану (теоретичної та балансової температур), розмірів фурмених вогнищ та складу горнового газу. Така робота печей призводить до зміщення зони малорухливих матеріалів від центральної осі, викликаючи тим самим нерівномірність зносу футерівки печі, нерівномірності сходу матеріалів по окружності на колошнику та їх перерозподіл, вносячи тим самим додаткову нерівномірність розподілу шихти та спотворення газового потоку. Для підвищення ефективності спалювання палива, що вдувається на фурмах, нерівномірність розподілу дуття зменшують шляхом поліпшення якості залізородної частини шихти та коксу, пред'явлення до неї більш високих вимог, обмеження кількості палива, що подається в залежності від якості шихти.

Нерівномірність розподілу дуття по окружності доменної печі викликана низкою факторів: конструктивних особливостей, техніко-експлуатаційним станом та технологічними особливостями. Виходячи з цього, можна розділити окружну нерівномірність дуття на «умовно постійну» та «змінну», що виявляється під впливом технологічних факторів.

Основними умовно-постійними факторами є нерівномірність розподілу дуття по окружності, викликана особливостями та технічними рішеннями тракту підведення гарячого дуття, розташування льоток та конструктивні особливості футерівки зони льоток.

Переважає більшість доменних печей малого та середнього об'ємів мають одностороннє підведення гарячого дуття, при цьому вісь прямої частини повітропроводу розташовується тангенціально до кільцевого повітропроводу або навіть осторонь від нього, а потім, перед перпендикулярною врізкою, робиться 1-2 невеликі повороти під кутами до 15-25° відносно осі прямого повітропроводу (рис. 1). Це необхідно для того, щоб створити в кільцевому повітропроводі радіальні сили, що сприяють зменшенню окружної нерівномірності дуття. Набагато рідше підведення прямого повітропроводу роблять під кутом до горизонтальної площини кільцевого повітропроводу. Для доменних печей великого об'єму використовуються складніші конструктивні підходи, що можуть включати в себе двосторонні та двосторонні обвідні підводи повітропроводу, а також вертикальні повороти перед врізанням в кільцевий повітропровід та інші [1–3].

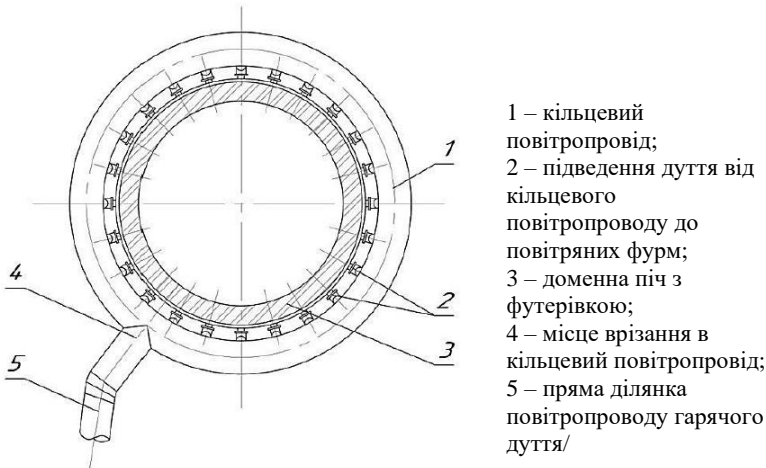


Рисунок 1 – Схематичне зображення варіанта одностороннього горизонтального підведення та врізання під кутом прямого повітропроводу гарячого дуття в кільцевий повітропровід.

Також в результаті низки досліджень, що проводилися на незавантажених доменних печах перед задувкою, відзначалися сектори зі збільшеною на 10–20% витратою дуття на повітряних фурмах поблизу підведення дуття та на діаметрально протилежній стороні, на

окремих фурмах нерівномірність витрати дуття досягала 30–60% від середньої витрати [4–8]. Використання різних пристроїв та пристроїв для зменшення нерівномірності витрати дуття на діючих печах, на сьогоднішній день, не використовуються, у зв'язку з їх швидким зносом та виходом їх з ладу в агресивних умовах доменного дуття, а також «пульсуючого» характеру зміни розподілу дуття.

На доменних печах ПрАТ «Камет-сталь» підведення дуття від прямої ділянки повітропроводу (поз. 5 на рис. 1) до перпендикулярної врізки в кільцевий повітропровід (поз. 4 на рис. 1) через поворот між ними реалізовано по-різному. Найбільш близьке до представленого на рис. 1 розташування даних вузлів на ДП-1М, яке реалізовано через «правий  $\pi$ » поворот з найменш різким кутом цього повороту перед врізанням в кільцевий повітропровід. На ДП-12 і ДП-9 підведення виконано через «лівий  $\pi$ » поворот, при цьому на них кут повороту більш різкий, особливо на ДП-12, що пов'язано з конструктивними відмінностями печей, зокрема діаметрами прямих і кільцевих повітропроводів, кількістю повітряних фурм, просторовим розташуванням обладнання цеху. Ці фактори, а також розташування льоток і кількість повітряних фурм створюють постійну нерівномірність на доменних печах цеху [9–11].

**Метою роботи** є підвищення ефективності доменної плавки в існуючих змінних технологічних та паливно-сировинних умовах за рахунок контролю та регулювання окружним розподілом дуття по повітряних фурмах з використанням отриманих зв'язків розподілу дуття та температури газового потоку верхньої частини доменної печі.

### **Основний матеріал дослідження**

#### ***Дослідження окружного розподілу дуття.***

Протягом 2021 – початку 2022 рр. в доменному цеху ПрАТ «Камет-сталь» проводився ряд постійних вимірів теплотімань з охолоджуваних елементів фурмених приладів на всіх доменних печах, за результатами яких встановлено середній розподіл дуття по окружності в даному періоді, середні мінімальні та максимальні відхилення (рис. 2). Розрахунок проводився за методикою [10–13].

З наведеного на рис. 2-(а) слідує, що на ДП-1М максимальні витрати дуття спостерігаються на групі фурм 20-1-5, розташованих з протилежного боку від підведення дуття до кільцевого повітропроводу з деяким відхиленням до чавунної льотки (ЧЛ)-1. Збільшення витрати дуття на цій групі складає 10,9% від середньої витрати дуття по ДП, а на окремих повітряних фурмах цієї групи збільшення становить від 5,9 до 19,3%. На групі фурм 8-12, у районі ЧЛ-2, незначне на ~4 % (від 2 до

5 % на окремих повітряних фурмах) збільшення дуття швидше компенсує зменшену витрату дуття з протилежного боку.

Мінімальні витрати дуття відзначені на групі фурм 14–19, які розташовуються за годинниковою стрілкою від врізки дуття в кільцевий повітропровід, середнє зниження становить 7,3% (за винятком повітряної фурми №15), на окремих фурмах середнє зниження дуття становить від 5,4 до 10,9%, також постійне зниження витрати дуття спостерігається на повітряній фурмі №7, що знаходиться між льотками.

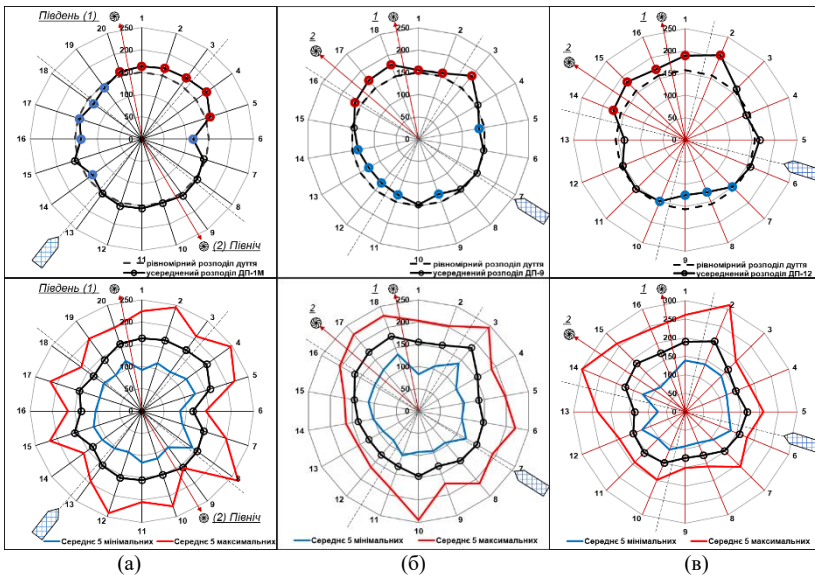


Рисунок 2 – Розподіл витрат дуття по повітряних фурмах, а також середніх мінімальних та максимальних значень протягом 2021-2022 рр. для ДП-1М – (а), ДП-9 – (б) та ДП-12 (в)

Середнє значення 5-ти максимальних значень по окремих повітряних фурмах (червона лінія) також вказує на наявність групи фурм 1-5 з частішою збільшеною витратою дуття навпроти вузла підведення дуття, при цьому частота збільшених витрат дуття по інших в/ф розподілена більш рівномірно по всій окружності ДП-1М (повітряні фурми №№ 10, 12, 15, 17). Середнє значення 5-ти мінімальних значень витрат дуття, показує рівномірну розподілену частоту мінімальних значень дуття по окружності доменної печі, окрім повітряної фурми №8.

На ДП-9 початок зони збільшеної витрати дуття розташовується навпроти вузла врізки трубопроводу гарячого дуття в кільцевий повітропровід, починаючи від ЧЛ-2, та далі за годинниковою стрілкою

через ЧЛ-1 займає 1/3 окружності печі, група повітряних фурм 16-18-1-3, рис. 2-(б). Середня величина збільшення витрати дуття у цій групі фурм становить 12,5 % та змінюється на окремих повітряних фурмах від 3,1 до 18,9–23,4 %. Зона зниженої витрати дуття на групі фурм 9–14 поширюється від вузла врізки в кільцевий повітропровід та далі за годинниковою стрілкою, що також становить ~ 1/3 від окружності ДП-9. При цьому слід відзначити зменшення 5-ти середніх максимальних температур на групі фурм 11–15, а також більш нижче значення 5-ти мінімальних значень витрати дуття в цій зоні, що вказує на сталість зменшеної витрати по всій цій групі повітряних фурм і можливості переважного зменшення витрати додаткового палива на них в постійному режимі.

На ДП-12, так само як і на ДП-9, початок групи з підвищеною витратою дуття (14-16-1-2) розташовується навпроти врізки в кільцевий повітропровід і поширюється за годинниковою стрілкою від ЧЛ-2 через ЧЛ-1 до повітряної фурми №3 (рис. 2- (в)). Витрата дуття на цій групі повітряних фурм на 18,4 % більша, ніж у середньому по доменній печі, по окремих повітряних фурмах збільшення становлять від 9,7 до 121–131,7 %. Зона зниженої витрати дуття розташовується з діаметрально протилежної сторони на групі фурм 7–10, витрата дуття на них в середньому нижча на 12,1%, на окремих повітряних фурмах цієї зони зниження становить від 4,6 % до 20,4 %. Різниця 5-ти максимальних і 5-ти мінімальних значень витрати дуття по окремих повітряних фурмах на ДП-12 фактично мінімальна на більш ніж 60 % фурм (№№ 3–12), а максимальні зміни витрат дуття по окремих повітряних фурмах відбуваються в зоні підвищеної витрати дуття. Це свідчить про процеси постійного перерозподілу дуття між сусідніми фурмами в цій зоні – зоні чавунних льоток та підвищеного сходження шихтових матеріалів. У зоні мінімальної витрати дуття зміни витрати дуття мінімальні, тобто витрата дуття цих фурмах була мінімальна протягом усього аналізованого періоду.

Як видно з вищенаведеного, на доменних печах відзначається характерна постійна нерівномірність розподілу дуття яка викликана, в першу чергу, конструктивними особливостями вузла підведення дуття до кільцевого повітропроводу, що тільки частково узгоджується з окружною нерівномірністю теплових навантажень системи охолодження по окружності доменних печей, що викликані інтенсивністю сходу матеріалів та випусків продуктів плавки в зоні чавунних льоток. Це добре проглядається на прикладі ДП-1М, вплив розташування льоток набагато менший (підвищення витрати дуття на 4–6%), порівняно з впливом вузла врізання трубопроводу гарячого дуття в кільцевий повітропровід доменної печі (збільшення витрати

дутья становить 12–19%). Збільшення витрати дутья безпосередньо в районі врізки прямого повітропроводу в кільцевий не спостерігається.

Постійна зона зменшених витрат дутья також значною мірою викликана конструктивними особливостями, зокрема поворотами перед врізанням в кільцевий повітропровід. Це добре проглядається на прикладі порівняння доменних печей ДП-12 і ДП-9, однакових за об'ємом та розташуванням чавунних льоток. На ДП-12 більший кут повороту супроводжується і відповідним більшим зменшенням витрати дутья з лівого боку (за годинниковою стрілкою) від врізки в кільцевий повітропровід, що викликано нерівномірністю тиску і швидкостей потоку по перерізу трубопроводу гарячого дутья.

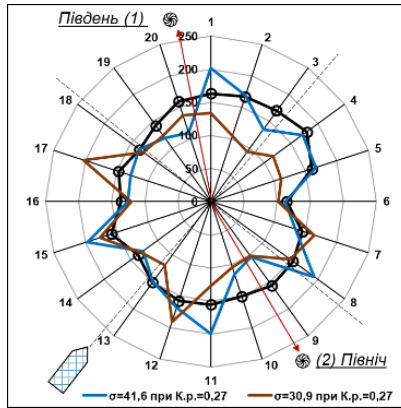
Згідно отриманих результатів вимірювання розподілу дутья по повітряних фурмах, незважаючи на наявність окремих фурм і зон зі зниженою витратою дутья, періодично, в одному або ряді вимірювань, на них відбувається збільшення витрати дутья за рахунок перерозподілу з інших повітряних фурм та зон з вирівнюванням окружної нерівномірності. А збільшення витрати дутья на окремих фурмах або групах повітряних фурм поза зонами з характерними постійно зниженими витратами дутья, неминуче призводить до значного зменшення дутья в цих зонах. Це призводить до логічної необхідності враховувати, насамперед, зниження витрати дутья на фурмах, особливо, групі повітряних фурм. З іншого боку, значне збільшення витрати дутья на окремих повітряних фурмах, не за рахунок перерозподілу на них дутья від сусідніх (зі зниженням витрати дутья на них), веде до збільшення ймовірності каналного ходу.

Таким чином, для обліку нерівномірності був розроблений критерій оцінки окружної нерівномірності дутья, що складається з різниці двох комплексів: перший – відношення середніх арифметичних трьох мінімальних витрат до середньої витрати дутья по фурмах доменної печі, що враховує вплив знижених витрат дутья, другий комплекс – середніх арифметичних трьох максимальних витрат дутья до середньої витрати, помножений на коефіцієнт 0,3 (коефіцієнт 0,3 враховує менший вплив збільшення витрати дутья порівняно зі зменшенням витрати дутья по окремих повітряних фурмах):

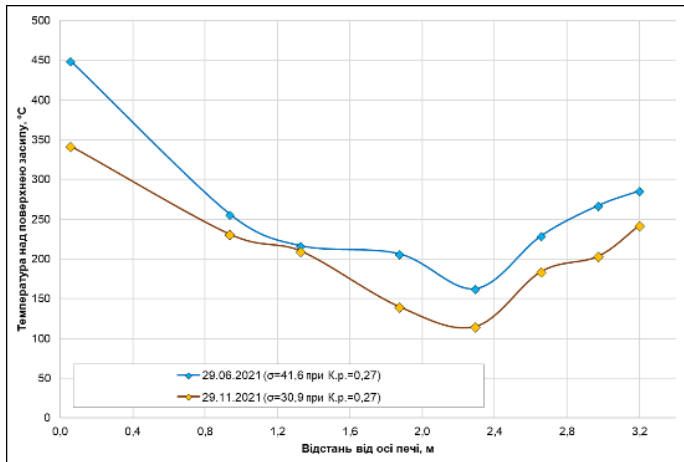
$$K.p. = \bar{X}(F_{\min 1}; F_{\min 2}; F_{\min 3}) / \bar{X}(F_{i-n}) - 0,3 \times \bar{X}(F_{\max 1}; F_{\max 2}; F_{\max 3}) / \bar{X}(F_{i-n})$$

Використання для аналізу коефіцієнту нерівномірності розподілу дутья  $K.p.$  дозволяє знизити вплив підвищених витрат у зазначених вище зонах по окружності доменної печі. На рис. 3 наведено розподіл дутья по повітряних фурмах для двох випадків з однаковим отриманим

коефіцієнтом рівномірності  $K_p=0,27$  од., але при стандартному відхиленні витрат дуття 41,6 і 30,9.



(a)



(б)

Рисунок 3 – Якісне подання розподілу дуття по повітряних фурмах при однакових показниках  $K_p$ , але різних показниках стандартного відхилення (а) та радіальний розподіл газів на колошнику при цих окружних розподілах витрати дуття (б).

Як видно, розподіл дуття у разі більшого середньоквадратичного відхилення дуття (гіршого показника) більше відповідає «постійній» окружній нерівномірності, що спостерігається на ДП-1М та кращому газорозподілу газів на колошнику по радіусу печі (рис. 3), а менше

середньоквадратичне відхилення витрати дуття відповідає менш типовому розподілу, який може свідчити про наявність відхилень у роботі доменної печі. При цьому показник К.р. для обох випадків – однаковий.

За наявності постійних вимірювань нерівномірності дуття по фурмах в доменній печі, необхідно враховувати вплив «постійної нерівномірності» дуття як середнє накопичення значень за певний період часу, а відхилення по окремих повітряних фурмах – фіксуватися як відхилення від нього, а не від рівномірного розподілу по окружності. Фіксувати зменшення витрати дуття необхідно першочергово в зонах зі зниженою витратою дуття з урахуванням перерозподілу дуття між сусідніми повітряними фурмами.

Вимірювання теплотримань з водоохолоджувальних елементів фурмених приборів та розрахунок розподілу дуття, проводяться періодично та не можуть характеризувати повну динаміку технологічного стану в змінних умовах роботи доменних печей, тобто розподіл дуття зазначений на рис. 2 – фрагментований і фіксує тільки технологічний стан в час проведення вимірів. Це призводить до великого зашумлення при зіставленні епізодично вимірюваної нерівномірності розподілу дуття з газо-дуттевими та іншими параметрами роботи доменних печей через їх велику варіативність протягом розглянутого періоду. Вищезазначене підтверджую доцільність встановлення відповідної системи автоматизованого контролю розподілу дуття.

Найкращим показником газодинамічної роботи доменних печей при різному розподілі дуття, якісно вираженому через коефіцієнт рівномірності К.р., є швидкість дуття на виході з повітряних фурм (рис. 4). Швидкість дуття характеризує фактичний об'єм дуття, приведений до температурно-компресійних умов відповідно до закону збереження маси, що проходить через переріз повітряної фурми без урахування впливу палива, що подається у фурму та без урахування впливу теплового випромінювання осередку горіння:

$$V^i = \frac{F_{x, дуття}^i}{S_{\phi}} \cdot \left( \frac{1}{P_{г, дуття} + 1} \right) \cdot \left( 1 + \frac{T_{г, дуття}}{273} \right),$$

де  $F_{x, дуття}^i$  – витрата дуття на окремих повітряних фурмах,  $\text{нм}^3/\text{с}$ ;  $S_{\phi}$  – площа перетину повітряної фурми,  $\text{м}^2$ ;  $P_{г, дуття}$  – тиск гарячого дуття перед кільцевим повітропроводом, аті;  $T_{г, дуття}$  – температура гарячого дуття,  $^{\circ}\text{C}$ .

Як видно, показник швидкості витікання дуття більш повно відображає фізичні характеристики дуття і враховує як зменшення об'єму

дутья зі збільшенням опору стовпа шихти, так і його часткове збільшення при підвищенні температури гарячого дутья та при компенсації збільшенням тиску. Показник витрати дутья (на доменних печах використовується показник витрати приведенний до н.у., тому що він характеризує окислювально-відновлювальний потенціал газів в окисній зоні фурмених осередків та об'ємі доменної печі), хоч і пов'язаний прямопропорційно зі швидкістю дутья та є його невід'ємною складовою, однак має значно нижчий зв'язок з показником окружної нерівномірності розподілу дутья по окремих повітряних фурмах, яка пов'язана, в першу чергу, зі зміною опору проходженню газів у стовпі шихти (як по висоті, так і в радіальному напрямі) і температурно-тепловим (відповідно і відновлювальним) режимом доменної плавки (рис. 4).

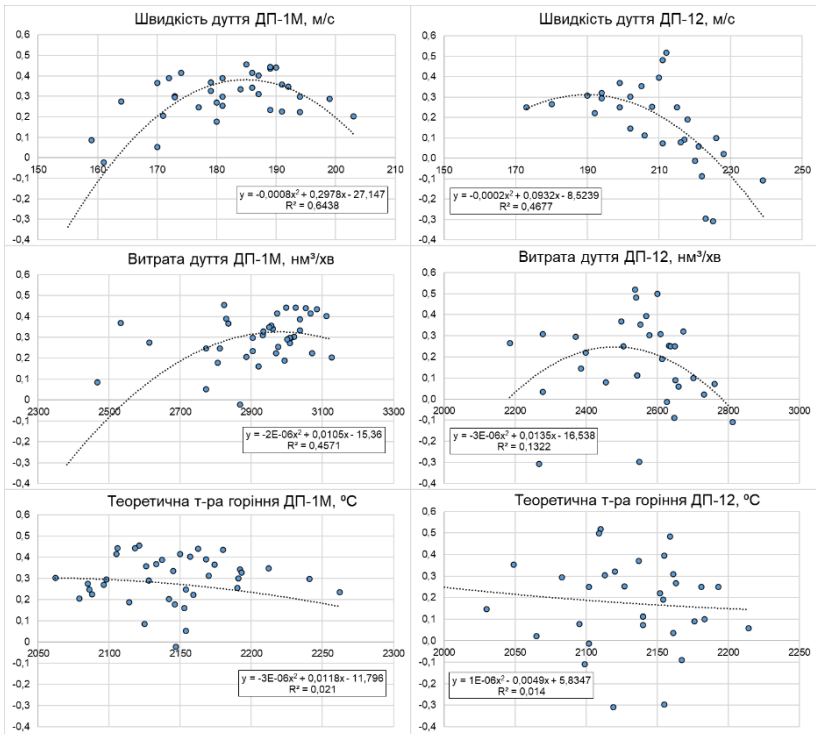


Рисунок 4 – Кореляційні залежності основних газодинамічних та температурно-теплових параметрів фурменої зони (швидкості дутья на виході із фурми, витрати дутья та теоретичної температури горіння) в залежності від коефіцієнта нерівномірності розподілу дутья по окружності печей ДП-1М та ДП-12.

Прийнятий на практиці доменного виробництва показник теоретичної температури горіння (Тт) відображає ізотермічний температурно-тепловий баланс фурменої зони і, незважаючи на те, що в цьому показнику присутня температура гарячого дуття, а витрати паливних добавок і вологи віднесені до витрати дуття, вплив кількості та виду компенсаторів від збільшення теоретичної температури більше впливають на її кінцеву величину. Тому взаємозв'язок рівномірності розподілу дуття, заснований на фрагментованих вимірах, з теоретичною температурою горіння, що визначається видом, кількістю та якісними характеристиками добавок – фактично відсутня (рис. 4).

Окремо необхідно підкреслити очевидну різницю в характері зміни рівномірності розподілу дуття по окремих фурмах від швидкості витоку дуття на доменних печах ДП-1М і ДП12. Як видно з наведених на рис. 6 даних, для обох печей характерний екстремум функції: для ДП-1М екстремум функції та найкращий газорозподіл по окружності досягається при швидкості витоку дуття 180–190 м/с і витраті дуття 2900–3100  $\text{м}^3/\text{хв}$ , а для ДП-12 найкращому газорозподілу відповідає швидкість дуття 200–210 м/с та витрата дуття 2500–2600  $\text{м}^3/\text{хв}$ . Це викликано насамперед відмінністю об'ємів доменних печей (+8% на ДП-1М) та різною кількістю повітряних фурм: 20 на ДП-1М та 16 на ДП-12. Раніше під час перевірки «технологічності проектних профілів» згідно з рекомендаціями проектних розрахунків було встановлено, що для об'ємів ДП-9 та ДП-12 оптимальна кількість повітряних фурм дорівнює 18. Тому було рекомендовано малу кількість повітряних фурм на ДП-12 компенсувати збільшенням їх діаметра на 10 мм. Таким чином, при сумарних площах перерізів повітряних фурм ДП-1М і ДП-9 0,353  $\text{м}^2$  та 0,322  $\text{м}^2$  оптимальні витрати дуття відповідно становлять 8492  $\text{м}^3/\text{м}^2$  при витраті дуття 3000  $\text{м}^3/\text{хв}$  та 8086  $\text{м}^3/\text{м}^2$  при витраті дуття 2600  $\text{м}^3/\text{хв}$ , що досить близько при порівнянні печей. Однак робочий діапазон витрати дуття ДП-12 у багатьох випадках виходить з оптимального 2600  $\text{м}^3/\text{хв}$  до 2700–2800  $\text{м}^3/\text{хв}$ , що, викликає «передув печі» і збільшення окружної нерівномірності дуття по окремих повітряних фурмах (рис. 4).

#### ***Дослідження зв'язку окружного розподілу дуття з температурними показниками верхньої зони доменної печі.***

Для аналізу ходу печі та технології плавки, всі доменні печі оснащуються вимірювальними термопарами в газовідводах та по периметру доменних печей – периферійними термопарами. Ці температури характеризують загальну економічність плавки та окружну рівномірність газів на колошнику. Для визначення радіальної нерівномірності в даний час використовують безліч вимірювально-

контролюючих приладів, таких як тепловізійні камери, безконтактні термомпари та термозонди [14–25].

На підставі серії вимірювань теплоснімань з охолоджуючих елементів фурменних приладів для дослідження було визначено розподіл витрати дуття по окружності ДП-12 в 2021 р. У квітні – вересні нерівномірність витрат дуття характеризувалася збільшеною витратою з протилежного боку від врізання в кільцевий повітропровід гарячого дуття з поширенням цієї зони на всю область розташування льоток (рис. 5).

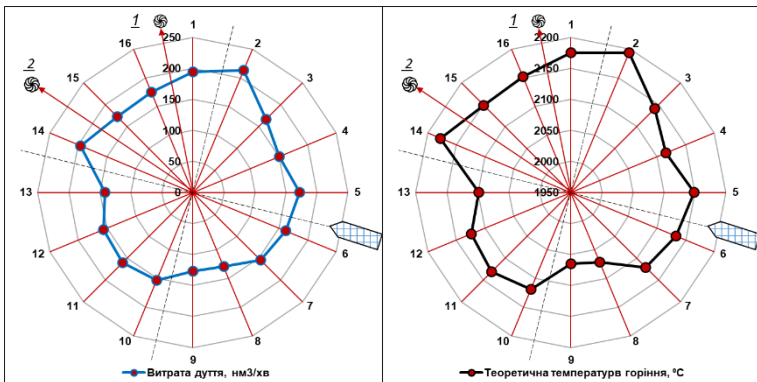


Рисунок 5 – Окружна нерівномірність витрати дуття за окремими повітряними фурмами ДП-12 та створювана нею окружна нерівномірність теоретичних температур горіння.

При подачі ПВП на всі повітряні фурми така окружна нерівномірність створювала відповідну окружну нерівномірність теоретичних температур горіння. У зоні підвищеної витрати дуття теоретична температура була збільшена на  $\sim 100^{\circ}\text{C}$ , а в районі зниженої витрати дуття на повітряних фурмах №№ 8-9 менша на  $100^{\circ}\text{C}$ , при середній  $T_t=2132^{\circ}\text{C}$ . Створювана таким чином окружна нерівномірність витрат і температур у нижній частині ДП-12 сприяла створенню окружної нерівномірності на колошнику, вираженій у спотворенні окружного розподілу температур на периферії (рис. 6).

Як видно з рис. 6, максимальні температури периферійних газів по окружності ДП-12 знаходяться в зоні мінімальних витрат дуття, таким чином – зменшення кількості і швидкості дуття призводить до збільшення периферійних газів. З протилежного боку ДП-12 – у зоні максимальних витрат дуття, навпаки, температури периферії – мінімальні. Абсолютні величини температур периферії – дуже низькі,  $T_{\text{пер.ср}}=121^{\circ}\text{C}$ , що говорить про малий розвиток периферійного ходу,

мінімальні та максимальні значення температури становлять відповідно 80 і 160°C, а значна їх відносна зміна на 66-122 % також характеризує малу кількість периферійного газу, який інтенсивно охолоджується матеріалами, що завантажуються на колошнику.

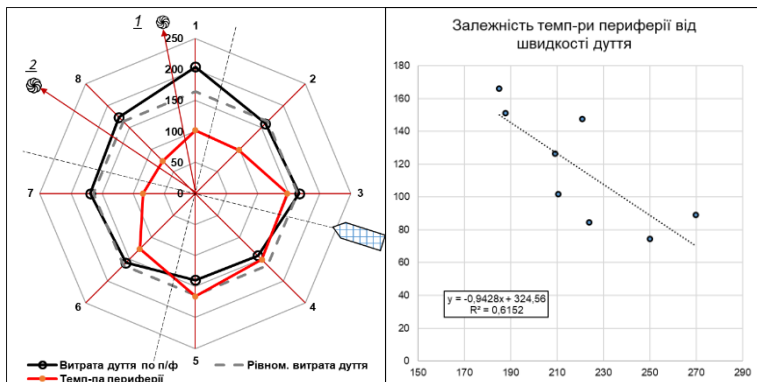


Рисунок 6 – Окружна нерівномірність температури периферійних газів, що створюється окружною нерівномірністю дуття та залежність температури периферії від швидкості закінчення дуття у квітні-вересні 2021 р на ДП-12.

Температури колошникового газу в газовідводах ДП-12 протягом усього періоду, що розглядається, не дивлячись на високий ступінь перемішування газів над поверхнею шихти, так само були більшими зі сторони великих витрат дуття, що узгоджується з розподілом температур периферії:  $T_{\text{го}1}=344^{\circ}\text{C}$  (при температурі периферії в цій зоні  $T_{\text{го}2}=316^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{пер}}=105^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{\text{го}3}=317^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{пер}}=93^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{\text{го}4}=322^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{пер}}=123^{\circ}\text{C}$ ).

Як видно, найбільші температури периферії і колошникового газу в газовідводах характерні для сектору повітряних фурм 16-1-3 з найбільшою постійною витратою гарячого дуття.

Таким чином, збільшення на ДП-12 в окремі зоні витрати дуття призводить до збільшення температури газів у газовідводах, а враховуючи велику ступінь перемішування газів з різних секторів між газовідводами можна зробити висновок, що утворені в процесі спалювання палива на повітряних фурмах і процесі відновлення газу, в секторах підвищеної витрати дуття, виходять з поверхні шихти не тільки через центральну зону (з якої, при класичному осьовому розташуванні «воронки», пічні гази розподіляються більш рівномірно між газовідводами), але й у достатній кількості по всьому радіусу колошника при розвиненому центральному газорозподілі характерному для періоду роботи ДП-12. Окремо слід зазначити, що при збільшенні

температури колошникового газу в секторі підвищеної витрати дуття відбувається зниження температури периферії за рахунок меншої кількості газів, що проходять поблизу стінки печі. Вищесказане може пояснюватися зсувом осі воронки утвореної при завантаженні матеріалів на колошнику щодо осі доменної печі у бік зони збільшеної витрати дуття або утворення в цій зоні шарів з більшою порізністю (псевдоваженням), що сприяє проникненню газів з периферії до центру.

Температури периферії та температури у газівідводах змінюються синхронно односпрямовано та у загальному вигляді характеризують технологічні особливості доменної плавки під час проведення вимірювань розподілу дуття (рис. 7). При цьому температура в газівідводах характеризує загальне температурно-теплове використання газів, яке загальне для всієї зони по радіусу колошника, а температура периферії – лише частковий за радіусом периферійний газорозподіл, тобто вона вимірюється під плитами колошникового захисту та є температурним показником газового потоку в середовищі шихти, що опускається. Таким чином, зміна температури газу в газівідводах тягне за собою, як правило, і відповідну зміну температури периферії, а зміна температури периферії може впливати на температуру в газівідводах (на температуру над поверхнею засипу) тільки у разі сильно розвиненого периферійного газового потоку.

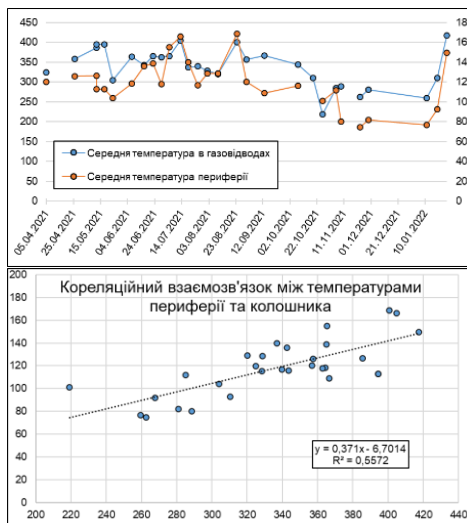


Рисунок 7 – Зв'язок температур периферії та колошникового газу в період проведення вимірів нерівномірності розподілу дуття по повітряних фурмах.

Зокрема, для аналізованого періоду роботи ДП-12, розвиток периферійного потоку, як було показано вище, незначний та не має належного впливу на загальну температуру периферійних термопар над поверхню шихти, що фіксуються за показаннями термозондів (ТЗ), рис. 8. Як видно з наведеного, збільшені температури по радіусу колошника характерні для ТЗ №1 розташованого в районі максимальної витрати дуття – повітряної фурми №1, а за ТЗ №4 фіксуються мінімальні значення температур по радіусу колошника, вплив на які має відносно низька витрата дуття на фурмах №13 та 14 (рис. 5). Максимальні температури центральних термопар фіксуються на ТЗ №1 та №2, що розташовані по сторонах від газовідводу 1.

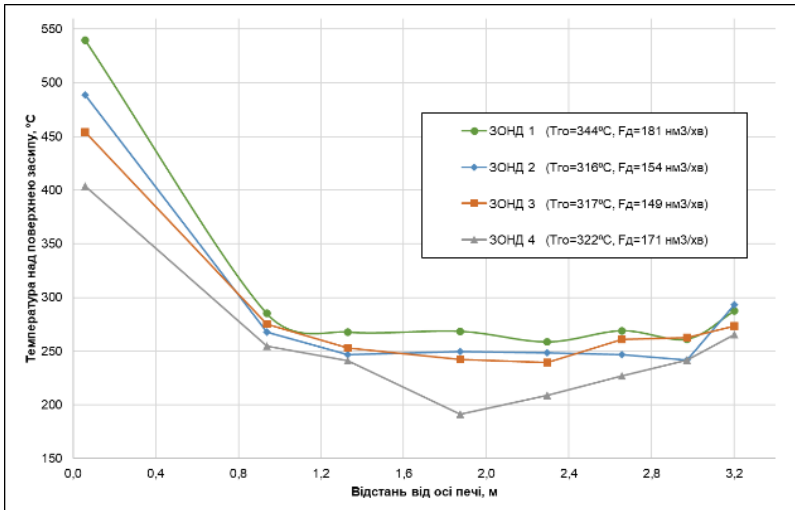


Рисунок 8 – Розподіл температур за радіусами колошника за показаннями термозондів під час проведення вимірів окружної нерівномірності дуття на ДП-12.

Як було показано вище, незважаючи на очевидний зв'язок температур периферії та температури колошникових газів, радіальний розподіл температур за показаннями ТЗ при центральному газорозподілі в доменній печі більшою мірою впливає на температуру газовідводів і значно менше залежить від периферійного газового потоку (температури периферії).

Збільшені температури колошникового газу в газовідводах є характерними для нераціональних режимів плавки з підвищеною витратою палива при малих рудних навантаженнях, підвищення яких, як правило, неможливе у зв'язку з технічними та технологічними

обмеженнями. Тому для поліпшення технологічного режиму необхідно вживати заходів щодо зниження температури колошникового газу: покращення якості шихти, застосування раціональних систем завантаження, збільшення та підтримання рівня засипу.

На рис. 9 наведений розподіл температур по радіусу колошника, що зафіксований термозандами в залежності від температури колошникового газу в газовідводах у квітні-вересні 2021 р. в період проведення вимірювань нерівномірності розподілу дуття по окружності ДП-12. З наведених залежностей видно, що підвищення температури колошникового газу супроводжується відповідним підвищенням температур газів над поверхнею засипу по всьому радіусу колошника, температури газів у периферійній зоні збільшуються в темпі з температурами у проміжній зоні, зростання температур у центральній зоні дещо вище.

Таким чином, загальне збільшення температур по радіусу колошника (збільшення температур ТЗ) призводить до збільшення газів у газовідводах, при цьому максимальний вплив на збільшення температури в газовідводах має проміжна зона, температура в якій починає наближатися до сумарної температури по радіусу (коефіцієнт КЗ прагне до 1), зменшуючи тим самим частки температур інших зон по радіусу колошника, зокрема температури газів на периферії над поверхнею шихти, які також наближається до середньої по радіусу (коефіцієнт К1 наближається до 1). Максимальне використання теплової енергії газів на ДП-12 (мінімальна температура в газовідводах) досягається при максимальному центральному газорозподілі із звуженою центральною віддушиною (зменшення К4), температура периферійного газу при цьому мало розвинена. Про малий розвиток периферійного ходу також свідчить мала величина і мінімальна зміна температури газів на периферії вимірюване термозандами (коефіцієнт К1). Коефіцієнти К1...К4 визначаються згідно [14, 18–20].

На рис. 10 представлені розподіли температур по радіусах ДП-12 для трьох характерних випадків, що вирізняються різною температурою газовідводів. У першому випадку, 26.05.2021 р., при підвищеній температурі в газовідводах до 363°C та при витраті дуття 2555  $\text{нм}^3/\text{хв}$ , спостерігається явно виражене збільшення температури у центрі на 50–100°C, при чому найбільше збільшення спостерігається на ТЗ №1, температура в проміжній зоні також збільшилася у всіх ТЗ на ~50С. При цьому температура периферії збільшилася синхронно з проміжною зоною, а зміна окружного розподілу на периферії не спостерігається.

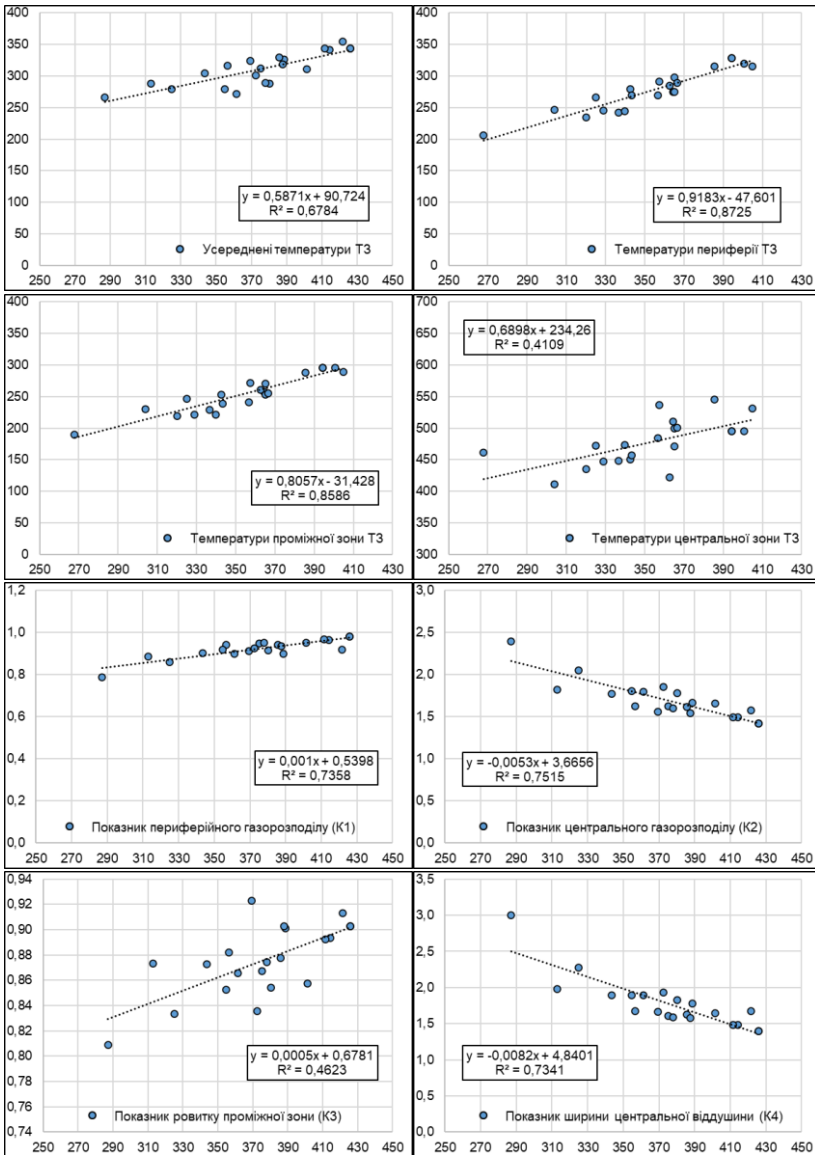


Рисунок 9 – Зміна розподілу температур і температурних показників по радіусу колошника за показаннями термозандів в залежності від температури колошникового газу в газовідводах.

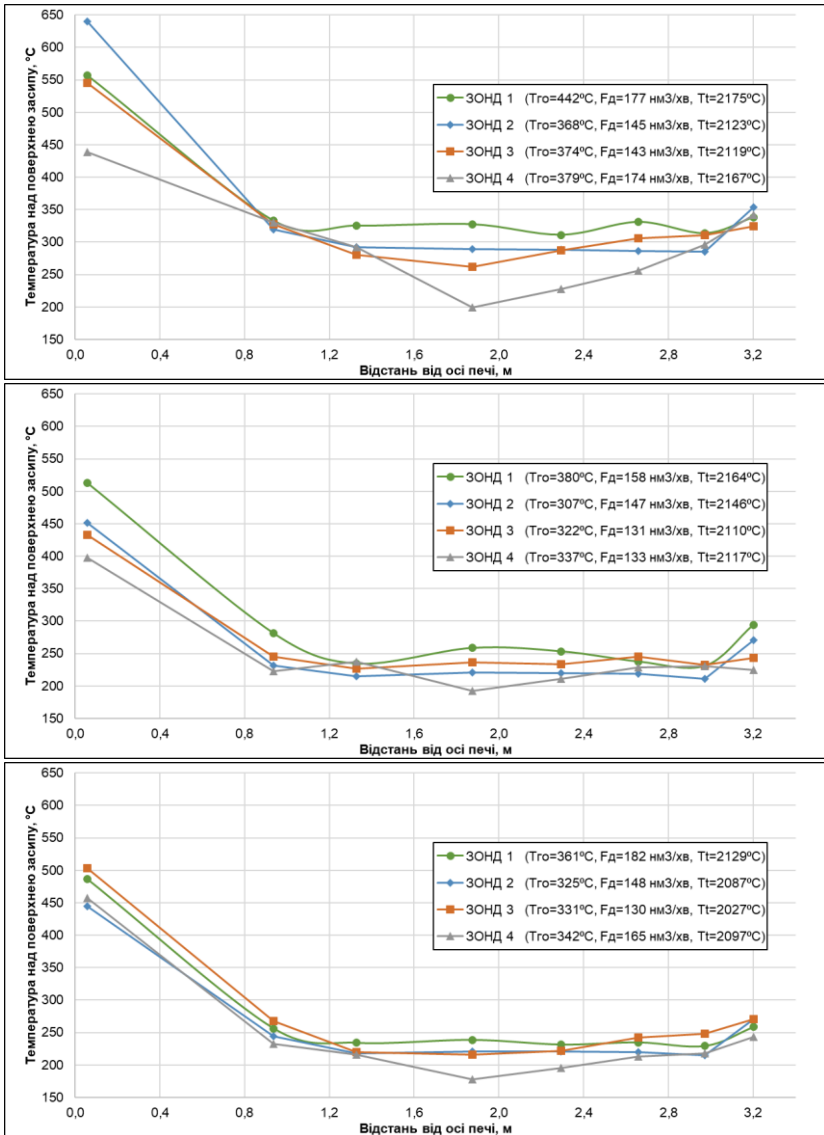


Рисунок 10 – Розподіли температур по радіусах ДП-12 за показниками ГЗ для трьох характерних випадків, що вирізняються різною температурою колошникового газу в газовідводах, витратою дуття та теоретичною температурою горіння.

У другому випадку, 13.07.2021 р., температура в газовідводах у середньому становила 337°C, а витрата гарячого дуття по ДП 2270 нм<sup>3</sup>/хв. Характер розподілу температур по радіусу колошника був близьким до середнього, що спостерігається у всьому періоді (рис. 8), але температура по радіусу дещо нижча, ніж у середньому. Однак показники температур на периферії характеризувалися більшою окружною нерівномірністю, що спричинено зменшенням витрати дуття.

Розподіл температур по радіусах колошника ДП-12, під час проведених через 6 днів 19.07.2021 р. вимірів нерівномірності дуття, при температурі в газовідводах 340°C, відновленій загальній витраті дуття до 2500 нм<sup>3</sup>/хв та збільшені витрати ПВП, показав відновлення окружної рівномірності. розподіл температур по радіусу був близьким до розподілу у другому розглянутому випадку.

Таким чином, показано три характерні випадки, в яких від загальної температури ТЗ залежить температура в газовідводах, а розподіл температур на периферії і окружна нерівномірність залежить від витрати гарячого дуття і швидкості дуття на виході з повітряних фурм. При цьому найбільш раціональне розподілення температур по радіусах ДП спостерігалось в третьому випадку, при раціональній загальній витраті гарячого дуття і дещо нижчій температурі горіння (рис. 10).

Зменшення температур по радіусам колошника при зменшенні теоретичної температури горіння при раціональній витраті дуття досягається за рахунок збільшення коксозамінних добавок до дуття, зменшення їх навпаки приводить до збільшення теоретичної температури горіння та температури колошникових газів.

На рис. 11 наведені показники розподілу температур по радіусу колошника в залежності від теоретичної температури горіння, з яких виходить, що при збільшенні теоретичної температури: збільшується температура периферійних газів над поверхнею засипу відносно середньої температури по радіусу (K1); збільшується температури в центральній зоні ДП (K2), а також ширина центральної віддушини (K4) за рахунок зменшення температур у проміжній зоні. Такі характерні розподіли температур по радіусам колошника близькі до представлених прикладах 1 та 3 на рис. 10.

Загальні температури периферії та температури колошникового газу в газовідводах зі збільшенням теоретичної температури горіння знижуються, що може скласти враження про покращення технологічних умов та зниження витрат палива. Проте, як зазначено вище, при цьому показники радіального розподілу змінюються в негативний бік зі збільшенням осьової віддушини та збільшення температур (кількості) газів на периферії (рис. 11).

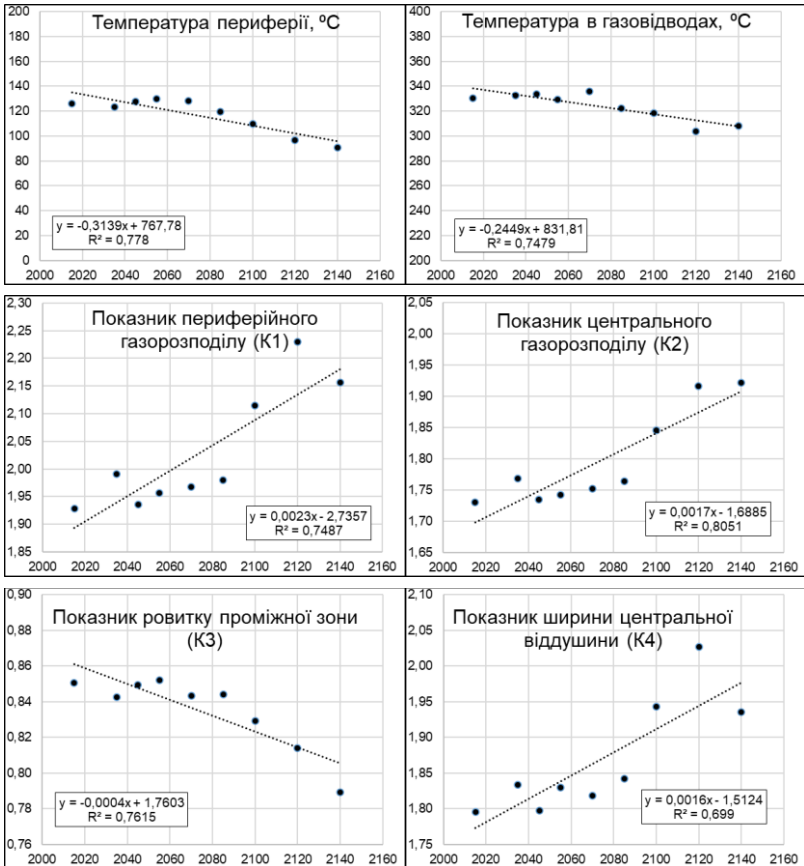


Рисунок 11 – Температури периферійного газового потоку та колошникового газу в газовідводах, показники розподілу температур по радіусу колошника в залежності від теоретичної температури горіння в 2021 р.

Вочевидь це пов'язано зі змінами умов плавки, при яких абсолютні температури колошникових газів та периферії знизилась, але їх кількість в центральній зоні та на периферії збільшилась. Такі зміни розподілу температур на колошнику доменних печей пояснюються багатофакторним зв'язком між: дуттям – теоретичною температурою горіння – співвідношенням відновлення в «нижній» та «верхній» зоні – рудним навантаженням.

Витрата дуття є функцією параметрів тиску дуття та тиску під колошником і сходу шихти, тобто вона залежить від якості газопроникнення, здебільшого нижньої зони. Теоретична температура

горіння є функцією витрати дуття як повітря та всіх дуттєвих добавок, включаючи додатковий кисень та пари води в повітрі та додаткову пару. Співвідношенням відновлення в «нижній» та «верхній» зоні залежать від температурно-теплогового потенціалу нижньої зони та відновлювального потенціалу газів в шахті, якості та видів залізорудної сировини. Рудне навантаження формується за рахунок вищезгаданих параметрів та витраті і якості коксу.

При цьому теоретична температура горіння прямо або опорядковано впливає на інші вище згадані параметри, а зміна абсолютної величини теоретичної температури горіння в ту чи іншу сторону може відбуватися як за рахунок зміни кількості повітря так і за рахунок добавок.

Аналіз основних показників доменної плавки ДП-12 у 2021 р. при зміні теоретичної температури, представлених на рис. 12, показує, що збільшення  $T_t$  відбувалося за рахунок зменшення кількості паливних добавок та збільшення витрати дуття. Зменшення паливних добавок призводить до зменшення рудного навантаження на колошнику, що в свою чергу призводить до збільшення газопроникнення в верхній зоні, можливості збільшення рівня засипу без порушення сходу шихти, при цьому збільшується витрата дуття як за рахунок зменшення супротиву шихти проходженню печних газів в верхній зоні, так і в нижній при зменшенні кількості недопалу добавок в фурменій зоні. Збільшення температурно-теплогового потенціалу призводить до збільшення відновлення в нижній зоні доменної печі та зниженню температури колошникового газу. В цьому випадку збільшується витрата дефіцитного коксу як за рахунок зменшення заміників коксу, так і за рахунок збільшення коксового еквіваленту (рис. 12). Збільшення коксового еквіваленту частково компенсується збільшенням ступеню використання газу при збільшенні висоти «сухої» зони доменної печі.

Таким чином, теоретичну температуру найбільш доцільно підтримувати на високому рівні за рахунок витрати дуття (проведеними раніше дослідженнями було встановлено, що для умов ПрАТ «Камет-сталь» найбільш раціональним є вміст кисню в дутті на рівні 22,5–23 %) при максимальній витраті паливних добавок до дуття та максимальному рудному навантаженні на колошнику, підтриманням рівня засипу та параметрів і умов доменної плавки.

Для утримання такого режиму роботи доменної печі, вочевидь, першочерговими визначальними технологічними заходами є раціональне завантаження та розподілення матеріалів на колошнику та максимальне спалювання паливних домішок до дуття на фурмах доменної печі.

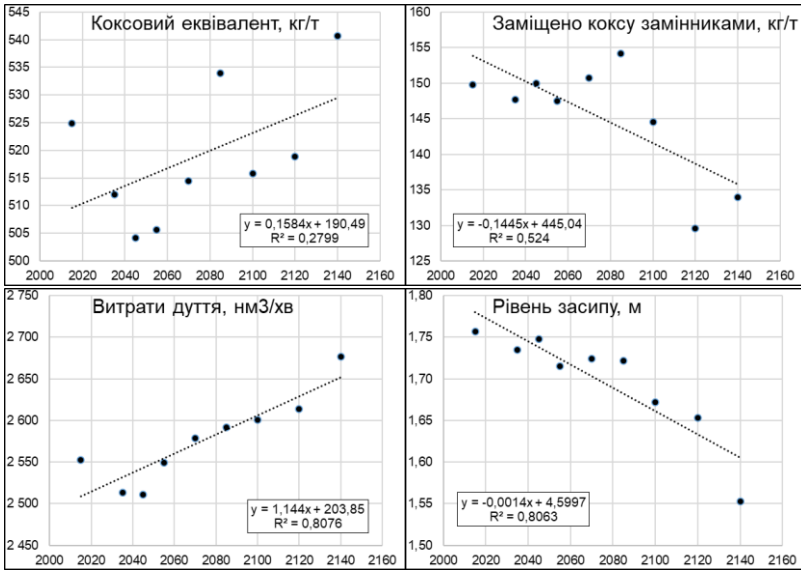


Рисунок 12 – Показники роботи доменної речі ДП-12 при зміні теоретичної температури.

Збільшення паливних домішок на доменних печах обмежено можливостями їх запалювання в окислювальній зоні на фурмах. При подачі великої кількості паливних домішок недопал не встигає реалізовуватись в горні доменної печі, та починається процес їх накопичення, що зменшує газопроникність фурменної зони по напрямку до центру печі та в міру опускання коксової насадки в нижній зоні – горні. Таким чином, супротив коксової насадки проходженню горнових газів і спотворює газорозподілення в доменній печі та порушує схід матеріалів. Тому для забезпечення достатньої витрати дуття та виробництва чавуну необхідно створити умови максимального спалювання паливних домішок.

Нерівномірний розподіл дуття по повітряних фурмах створює значну нерівномірність паливних домішок по відношенню до дуття (рис. 13). Так зменшення витрати дуття на повітряних фурмах №8 і №9 на 20,0–21,5 % призводить до зменшення теоретичної температури горіння на 2,8–3,2 % до 2065–2072°C при середній по ДП 2132°C, а навантаження паливних добавок на цих фурмах більше на 26,0–23,4 г/нм<sup>3</sup> дуття при середньому 87,5 г/нм<sup>3</sup>. Тобто при такому газорозподілі збільшення паливних добавок для цих фурм вже наближується до свого максимуму по умовах спалювання, що

визначається теоретичною температурою горіння і подальше їх збільшення призведе до значного спотворення окружної нерівномірності теоретичної температури горіння, подальшому падінню дуття в зоні роботи цих фурм і порушення сходу матеріалів спровоковане зниженням в'язкості проміжного шлаку і блокуванням догорання не добавок та коксового сміття в окислювальній зоні.

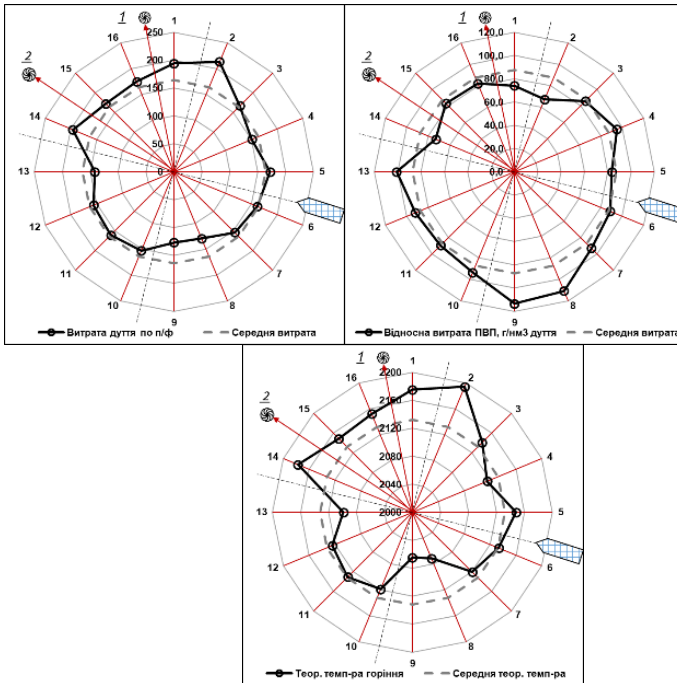


Рисунок 13 – Нерівномірність окружного розподілу дуття по окружності ДП-12 та сформована нерівномірність розподілу паливних домішок по повітряних фурмах.

## Висновки

В результаті виконаних досліджень були виділені постійні та змінні фактори впливу на нерівномірність витрат дуття по окружності доменних печей, визначено якісний та кількісний вплив вузлів підведення дуття від прямого до кільцевого повітропроводу, а також розташування чавунних льоток для сучасної роботи доменних печей ПрАТ «Камет-сталь». Розроблено критерій оцінки окружної рівномірності дуття для фрагментованих (періодичних) вимірювань цієї нерівномірності, а також розглянуті кореляційні залежності основних

газодинамічних та температурно-теплових параметрів фурменної зони в залежності від величини коефіцієнта нерівномірності розподілу дуття по окремих повітряних фурмах ДП-1М и ДП-12 ПрАТ «Камет-сталь».

Встановлений зв'язок між окружною нерівномірністю дуття по повітряних фурмах та температурою периферійного газового потоку та зв'язок між теоретичною температурою горіння та температурними показниками оцінки газового потоку над поверхнею засипу шихти, розглянутий та проаналізований багатofакторний зв'язок між: дуттям – теоретичною температурою горіння – співвідношенням відновлення в «нижній» та «верхній» зоні доменної печі – рудним навантаженням, показана необхідність дотримання умов спалювання паливних домішок для зниження теоретичної температури та досягнення економічності плавки.

#### **Перелік посилань / References**

1. Novospasskiy, A. F. (1938). *Konstruksii domennykh pechey i ustroystvo tsekhov. Vol. 2: Podacha syrykh materialov k pecham i nagrev vozdukha*. GONTI
2. Tselikov, A. I., Polukhin, P. I., & Grebenik, V. M. (1987). *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. V 3 t. T.1: Mashiny i agregaty domennykh tsekhov: uchebnik dlya vuzov*. Metallurgiya
3. Lyubin, A. Ye. (2010). *Metallicheskiye konstruksii sooruzheniy kompleksa domennoy pechi. Proyektirovaniye. Eksploatatsiya. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya*. Stal
4. Bugayev, K. M., Antonov, V. M., & Varshavskiy, G. V. (1987). Vliyaniye raspredeleniya dut'ya po furmam na gazovyy potok v domennoy pechi. *Stal*, (2), 17–22
5. Bugayev, K. M. (1974). *Raspredeleniye gazov v domennykh pechakh*. Metallurgiya
6. Tarasov, V. P., & Tarasov, P. V. (2007). *Teoriya i tekhnologiya domennoy plavki*. Internet Inzhiniring
7. Shklyar, F. R., Babushkin, N. M., & Timofeyev, V. N. (1966). Eksperimental'noye issledovaniye raspredeleniya dut'ya po furmennym priboram domennoy pechi pered zaduvkoy. *Teplotekhnika domennogo i aglomeratsionnogo proizvodstva: tr. VNIIMT*, 4, 313–325
8. Druzhkov, V. G., Shirshov, M. Yu., & Prokhorov, I. Ye. (2015). Metody opredeleniya raskhoda goryachego dut'ya na otdel'no vzyatuyu furmu v gorne domennoy pechi. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2, 1–27
9. Semenov, Y. S., Shumelchik, Y. I., Horupakha, V. V., Vashchenko, S. V., Khudyakov, O. Y., Semion, I. Y., Chychov, I. V., Hulina, I. H., & Zakharov, R. H. (2022). Development and Implementation of Decision Support Systems for Blast Smelting Control in the Conditions of PrJSC "Kamet-steel". *MDPI, Metals, Special Issue "Mathematical Modelling of the Ironmaking Blast Furnace"*, 12(6), 985. <https://doi.org/10.3390/met12060985>

10. Semenov, Yu. S., Horupakha, V. V., & Shumel'chik, Ye. I. (2022). *Sposib upravlinnya okruzhnym rozpodilom duttya v domennyi pechi (Method of controlling the circumferential distribution of blast in a blast furnace)*: patent of Ukraine UA 125879 C2 for the invention. Bulletin No. 26
11. Semenov, Yu. S., Horupakha, V. V., Shumelchik, E. I., & Alter, M. A. (2021). Blast Furnace Operation Improvement by Forming Uniform Circular Distribution of Raceway's Thermal Mode. *AISTech 2021 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference, 29 June–1 July 2021, Nashville, Tenn., USA*. Pp. 184–192. <https://doi.org/10.33313/382/018>
12. Kanaev, V. V., Kobeza, I. I., Buzoverya, M. T., et. al. (1995). Control of blas distribution on air blast furnace tuyeres. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, (2), 69-71
13. Bol'shakov, V. I., Shuliko, S. T., Kanaev, V. V., et al. (1999). Investigation of gas Distribution in a Large Blast Furnace. *Steel in Translation*, 29(12), 1-5
14. Semenov, Y. S., Shumelchik, E. I., & Horupakha, V. V. (2018). *Diahnostyka ta upravlinnya domennoyu plavkoyu v zminnykh palyvno-syrovynnykh umovakh (Diagnostics and Management of Blast Furnace Smelting in Variable Fuel and Raw Materials Conditions)*. Dominanta Print
15. Liu, R., Zhao, W-g., Liu, S., Liu, X-j., Li X., Zhang, Z-f., Zhao, J., & Lyu, Q. (2023). Intelligent Prediction and Real-time Monitoring System for Gas Flow Distribution at the Top of Blast Furnace. *ISIJ International*, 63(10), 1714-1726. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-099>
16. Omeri, Y. (1987). *Blast Furnace Phenomena and Modelling*. Elsevier. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3431-3>
17. Semenov, Y. S., Shumel'chik, E. I., Gorupakha, V. V. (2018). Efficient Management of the Charging of Blast Furnaces and the Application of Contemporary Means of Control over the Variable Technological Conditions. *Metallurgist*, 61(11–12), 950-958. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0591-4>
18. Semenov, Y. S., Shumelchik, E. I., Horupakha, V. V., Kuznetsov, A. M., Zubenko, A. V., & Kovalenko, A. G. (2017). Using Thermal Probes to Regulate the Batch Distribution in a Blast Furnace with Pulverized-Coal Injection. *Steel in Translation*, 2017, 47(6), 389-393. <https://doi.org/10.3103/S0967091217060092>
19. Semenov, Y. S., Shumelchik, E. I., & Horupakha, V. V. Expert Module of the Thermal Probes System for Blast Furnace Charging Control. *Steel in Translation*. 2018. 48(12): 802-806 <https://doi.org/10.3103/S0967091218120136>
20. Shumelchik, Y., Semenov, Y., Horupakha, V., Krot, P., & Hulina, I. (2022). Model-Based Decision Support System for the Blast Furnace Charge of Burden Materials. In: *Chaari, F., Leskow, J., Wylomanska, A., Zimroz, R., Napolitano, A. (eds) Nonstationary Systems: Theory and Applications. WNSTA 2021. Applied Condition Monitoring, Springer, Cham.*, 18, 340-351 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-82110-4\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-82110-4_18)
21. Parshakov, V. M. , Takhautdinov, R. S. , Bodyaev, Y. A. , Gibadullin, M. F., Kanin, L. S., Chevchelov, A. V., Polinov, A. A., & Zakharov, S. A. (2009). Multipoint thermal-probe monitoring the radial gas distribution in blast furnaces with nonconical charging systems at OAO MMK. *Steel in Translation*, 39(10), 886-889. <https://doi.org/10.3103/S0967091209100106>

22. Zhou, P., You, L., Liu, J.-P., & Zhang, X. (2017). Centre Temperature Estimation of Blast Furnace Cross Temperature Measuring Based on M-SVR and RVFLNs. *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*, 38(5), 614-619. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-3026.2017.05.002>

23. Shi, L., Wen, Y.-b., Zhao, G.-s., & Yu, T. (2016). Recognition of blast furnace gas flow center distribution based on infrared image processing. *J. Iron Steel Res. Int.*, 23, 203-209. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(16\)30035-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(16)30035-8)

24. Chen, Z., Jiang, Z., Gui, W., & Yang, C. (2016). A Novel Device for Optical Imaging of Blast Furnace Burden Surface: Parallel Low-Light-Loss Backlight High-Temperature Industrial Endoscope. *IEEE Sensors Journal*, 16(17), 6703-6717. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2587729>

25. Xu, T., Jiang, Z., & Gui, W. (2018). A Light Field Imaging Based Measuring Method for Blast Furnace Burden Distribution. *IFAC-PapersOnLine*, 51(21), 257-261. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.428>

**V. V. Horupakha**<sup>1</sup>, Researcher, ORCID 0000-0003-0531-1871

**Yu. S. Semenov**<sup>1,\*</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Research, Head of the Department, ORCID 0000-0003-2299-5742

**O. Yu. Khudyakov**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Research, ORCID 0000-0002-6507-1120

**Ye. I. Shumelchik**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Research, ORCID 0000-0001-5350-6425

**S. V. Vashchenko**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Research, ORCID 0000-0001-8344-961X

**K. V. Baiul**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Leading Researcher, ORCID 0000-0003-1426-7956

<sup>1</sup> *Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov, National Academy of Sciences of Ukraine*

\* *Corresponding author: yuriy.semenov.isi@gmail.com*

## **RESEARCH OF CIRCULAR GAS DISTRIBUTION IN A BLAST FURNACE USING INFORMATION ON BLOW DISTRIBUTION AND MODERN CONTROL MEASURES**

**Abstract.** The article presents the results of studies of the circumferential gas distribution in a blast furnace using information on the distribution of the blast and modern control means performed on the blast furnaces of PrJSC "Kamet-steel". The constant and variable factors of influence on the unevenness of the blast flow rate along the circumference of the blast furnaces are highlighted. The main constant factors are the features and technical solutions of the hot blast supply tract, the location of the inlets and the design features of the lining of the inlet zone. The qualitative and quantitative influence of the blow supply units from the direct to the annular air duct, as well as the location of the cast-iron inlets for the modern operation of the blast furnaces of PrJSC "Kamet-steel" are determined. The main variable factors of influence on the unevenness of the blow flow rate are the technological and fuel and raw material conditions of the blast furnace smelting. The article develops a criterion for assessing the circumferential uniformity of the blast for periodic measurements of this unevenness, and also establishes correlations between the main gas-dynamic and temperature-thermal parameters of the tuyere zone, namely: the blast velocity at the tuyere exit, which reflects the actual volume of the blast passing through the cross-

section of the air tuyere without taking into account the influence of the fuel supplied to the tuyere and without taking into account the influence of thermal radiation from the combustion chamber; the blast flow rate and the theoretical combustion temperature, which reflects the isothermal temperature-thermal balance of the tuyere zone, depending on the value of the coefficient of unevenness of the blast distribution across individual air tuyere for the operating conditions of the blast furnaces of PrJSC "Kamet-stal". The article establishes the relationship between the circumferential unevenness of the blow along the air tuyeres and the temperature of the peripheral gas flow and the relationship between the theoretical combustion temperature and the temperature indicators of the gas flow assessment above the surface of the charge, which characterize the development of the axial and peripheral gas flow, the gas permeability of the intermediate zone of the furnace top radius and the size of the axial vent. The multifactorial relationship between: blow – theoretical combustion temperature – the ratio of reduction in the "lower" and "upper" zones of the blast furnace – ore load is considered and analyzed, the need to comply with the conditions for burning fuel impurities to reduce the theoretical temperature and achieve the efficiency of blast furnace smelting is shown.

**Keywords:** blast furnace, blast furnace smelting control, pulverized coal, circumferential distribution of blast, gas flow temperatures.

**For citation:** Horupakha, V. V., Semenov, Yu. S., Khudyakov, O. Yu., Shumelchik, Ye. I., Vashchenko, S. V., & Baiul, K. V. Research of circular gas distribution in a blast furnace using information on blow distribution and modern control measures. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 39, 34-60. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-03>

*Рукопис надійшов до редакції / Received 13.08.2025*

*Рекомендовано до друку / Accepted 21.10.2025*