

УДК 669.162

Ю. С. Семенов^{1,*}, к.т.н., с.н.с., зав. відділу, ORCID 0000-0003-2299-5742**В. В. Горупаха**¹, н.с., ORCID 0000-0003-0531-1871**С. В. Ващенко**¹, к.т.н., с.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0001-8344-961X**Є. І. Шумельчик**¹, к.т.н., с.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0001-5350-6425**О. Ю. Худяков**¹, к.т.н., с.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0002-6507-1120**К. В. Баюл**¹, д.т.н., пр.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0003-1426-7956¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некасова НАН України*^{*} *Автор для листування: yuriy.semenov.isi@gmail.com*

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛОМ ПАРАМЕТРІВ ДУТТЯ ПО ФУРМАХ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ

Анотація. У статті наведений опис проблеми автоматизованого контролю кількісного розподілу дуття по повітряних фурмах доменної печі (ДП), яка вивчається багато років та досі є повністю не вирішеною та актуальною, оскільки нерівномірність розподілу дуття значно впливає на газорозподіл і тепловий стан у всьому об'ємі ДП. Показані результати ефективності застосування методу управління розподілу параметрів дуття по повітряних фурмах при проведенні ручним способом вимірювань теплових навантажень на фланцях підвішених колін фурмених приладів ДП-1М та ДП-12 ПрАТ «Камет-сталь» у 2018–2020 рр. Представлено методологічні та інформаційні засади системи підтримки прийняття рішень (СППР) щодо управління розподілом параметрів дуття по фурмах ДП, яка розробляється останніми роками в Інституті чорної металургії. Створення СППР складається з наступних етапів: використання інформації сучасних засобів автоматизованого контролю з встановленням статистичних залежностей цієї інформації з показниками доменної плавки; створення представницької бази даних, яка містить різні режими роботи ДП з відповідними техніко-економічними показниками доменної плавки, параметрами режиму завантаження та інформацією засобів контролю; розробка блоку рекомендацій. СППР повинна включати: візуалізацію первинної інформації щодо розподілу по окружності ДП перепадів температур та витрат охолоджувальної води; візуалізацію розрахункової інформації щодо розподілу по окружності ДП фактичної теоретичної температури горіння, витрат та швидкості дуття, геометрії фурмених осередків; блок генерації рекомендацій щодо коригування витрат паливних добавок на окремих фурмах для забезпечення необхідного окружного розподілу

© Ю. С. Семенов, В. В. Горупаха, С. В. Ващенко, Є. І. Шумельчик, О. Ю. Худяков,
К. В. Баюл, 2026



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

теоретичної температури горіння; сигналізацію щодо наявності т.зв. «зашлакованості» фурм; рекомендації щодо зміни діаметрів повітряних фурм. СППР щодо управління окружним розподілом параметрів дуття в ДП також повинна передбачувати розробку методів та критеріїв, які дозволяють забезпечити синергетичну взаємодію функціонування різних, встановлених на ДП СППР. В статті вперше показаний вплив нерівномірності окружного розподілу теплового стану нижньої зони ДП, згідно з розподілом теоретичної температури по повітряних фурмах, на розвиток центрального газорозподілу верхньої зони та каналного ходу ДП, згідно показань засобів контролю температур газового потоку над поверхнею засипу шихти. Отримані залежності температурних показників газового потоку над поверхнею засипу шихти від середньоквадратичного відхилення теоретичної температури горіння по окружності ДП. В статті зазначено, що важливим етапом розробки СППР є апробація, як окремих її складових, так і комплексу рекомендацій по управлінню доменною плавкою в реальних умовах виробництва.

Ключові слова: доменна піч, системи підтримки прийняття рішень, пилувугільне паливо, окружний розподіл дуття, температури газового потоку.

Посилання для цитування: Розробка системи підтримки прийняття рішень щодо управління розподілом параметрів дуття по фурмах доменної печі / Ю. С. Семенов, В. В. Горупаха, С. В. Ващенко, Є. І. Шумельчик, О. Ю. Худяков, К. В. Баюл // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 272-289. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-018>

Стан проблеми

Сучасні принципи автоматизації доменних печей (ДП) у світовій практиці спираються на комплексне використання засобів автоматизованого контролю та систем підтримки прийняття рішень (СППР) або експертних (інтелектуальних систем), в залежності від прийнятої термінології. СППР зазвичай функціонують на основі математичних моделей, інформації засобів автоматизованого контролю і накопиченого експертного досвіду, забезпечуючи високу якість інформаційного супроводу технології плавки з формуванням обґрунтованих рекомендацій. Розробка СППР базується на створенні відповідних методів контролю та управління, які забезпечують цільове функціонування СППР, а саме – генерацію своєчасних рекомендацій, необхідних для забезпечення ефективного управління процесом користувачем (оператором-технологом). Інформаційні засади СППР полягають у створенні такої сукупності та структури інформації, яка сприяє найбільш ефективній взаємодії між інтерфейсом програмного забезпечення СППР та користувачем для досягнення ефективного технологічного результату. Аналіз літературних джерел показує певну кількість впроваджених в доменному виробництві математичних

моделей [1–5], модельних систем [6, 7], систем моніторингу [8–11] та СППР [5, 12–17].

Проблема контролю кількісного розподілу дуття по повітряних фурмах ДП вивчається багато років та досі є актуальною, оскільки нерівномірність розподілу дуття значно впливає на газорозподіл і тепловий стан у всьому об'ємі ДП [18–22]. При значному відхиленні параметрів дуття по окремих повітряних фурмах від середнього, створюється нерівномірність теплового стану, розмірів фурмених вогнищ і складу горнового газу. Така робота ДП веде до зміщення зони малорухомих матеріалів щодо осі ДП, викликаючи нерівномірність зносу футерівки ДП, нерівномірності сходу матеріалів по окружності на колошнику та їх перерозподіл, вносячи додаткову нерівномірність розподілу шихти та спотворення газового потоку [18, 21, 22].

Відомі способи контролю кількісного розподілу дуття по повітряних фурмах ДП шляхом встановлення на кожній фурмі автоматичного регулюючого пристрою (керамічні пробки, неохолоджувані укорочені вимірювальні сопла та метеликові клапани з жароміцної сталі, дросель-клапани) та витратоміра (труба Вентурі) з подальшим автоматичним коригуванням положення регулюючого пристрою на основі вимірної витрати дуття через кожну фурму, порівнюючи її із середнім або заданим значенням [23, 24]. Такі способи та системи контролю та регулювання не отримали тривалого практичного застосування. Причинами цього стала схильність імпульсних трас між датчиком і місцем вимірювання тиску до негативного впливу пилу, також траси мають різні відстані від датчиків до місця вимірювання тиску, що не дозволяє зробити коректне тарування показань датчиків тиску на працюючій ДП. Крім цього, величина тиску на окремих ділянках фурменого приладу залежить не тільки від витрати дуття, а й від температури, вмісту кисню в дутті і ряду геометричних параметрів газового тракту, що вносить суттєву похибку при визначенні витрати дуття [25]. Тому в останні роки дослідження розподілу дуття по повітряних фурмах в ДП виконують переважно за допомогою методів математичного або фізичного моделювання [26, 27].

В 2000-х роках протягом певного часу на ДП-9 комбінату «АрселорМіттал Кривий Ріг» при застосуванні в дутті природного газу функціонувала система, яка базувалася на способі, який включає вимір перепаду температури і витрати води охолоджуваного сопла фурменого приладу з подальшим визначенням витрат дуття для кожної фурми пропорційно величинам теплових навантажень на охолоджувані сопла фурмених приладів та розрахунком рекомендованих витрат природного газу для кожної фурми відповідно до заданого окружного розподілу величин температур горіння у фурмених осередках [25, 28]. Брак коштів

для підтримання працездатності цієї системи контролю в умовах кризи 2008 р. та подальша часткова або повна відмова від природного газу на користь пиловугільного палива (ПВП) зумовили нетривале функціонування даної системи контролю.

Таким чином, як у вітчизняній практиці, так і у світовій, відсутні дані про розробку та впровадження СППР, які спрямовані саме на контроль та управління розподілом дуття (параметрами дуття) по окружності ДП. В останні роки в ІЧМ розробляються методологічні та інформаційні засади такої СППР та методи, які дозволяють забезпечити синергетичну взаємодію функціонування цієї СППР з іншими засобами автоматизованого контролю та (або) СППР, спрямованих на управління режимом завантаження та тепловим станом ДП. Окремі модулі розробленої СППР пройшли дослідну апробацію.

Метою роботи є підвищення рівня автоматизації доменної плавки шляхом розробки та впровадження систем підтримки прийняття рішень, основаних на сучасних цифрових технологіях.

Основний матеріал дослідження

Установка з вдування ПВП на металургійному виробництві ПрАТ «Камет-сталь» є єдиною в Україні (починаючи з 2014 р. і на даний час), що дозволяє регулювати витрату ПВП на окремих повітряних фурмах ДП у відсотковому співвідношенні і тим самим забезпечувати окружну рівномірність або задану нерівномірність параметрів дуттєвого режиму [25, 28–31]. Основним показником, що характеризує окружний розподіл дуттєвих параметрів є теоретична температура горіння (у закордонній літературі прийнятий термін RAFT – Raceway adiabatic flame temperature) у фурменому осередку на кожній окремо взятій повітряній фурмі. Теоретична температура горіння відображає ізотермічний температурно-тепловий баланс фурменої зони, де весь кисень і волога дуття, реагуючі з вуглецем палива перетворюються на CO і H_2 , а важливими аспектами для досягнення ефективності вдування ПВП є вибір раціональних діапазонів питомої витрати ПВП в залежності від якості коксу при своєчасному коригуванні теоретичної температури горіння. На практиці зазвичай використовують лінійні емпіричні формули для визначення RAFT, розроблені з урахуванням дослідних даних [32, 33].

Управління та контроль розподілу дуття по фурмах в автоматизованому режимі є невирішеним завданням, необхідним як для ефективного вдування паливних добавок з використанням наявної можливості установки по вдуванню ПВП, так і для створення умов для рівномірної роботи ДП по окружності.

Сутність методу контролю розподілу дуття по повітряних фурмах полягає у розрахунковому визначенні витрат дуття по кожній фурмі

пропорційно тепловим навантаженням, які вимірюються на водоохолоджуваних елементах фурмених приладів [13, 25, 28–30]. В останні роки доведено, що в ролі калориметра можуть виступати водоохолоджувані фланці підвішених (рухомих) колін, оскільки сопла фурмених приладів (приклад ДП-9 АМКР 2000-х років [28]), в сучасних умовах не мають охолодження, тому прийнято, що елементами фурмених приладів, які працюють у порівнянних з соплами умовах є водоохолоджувані фланці підвішених (рухомих) колін [25]. Необхідно також відзначити, що в послідовну пов'язку елементів, що охолоджуються, також включені фланці фурмених оглядових вікон. Вони приймають теплове навантаження як від конвективного теплообміну від гарячого дуття, так і променистого – від горіння палива у фурменому приладі і нагрітого до високих температур коксу в фурменій зоні ДП. Однак проведені дослідження нерівномірності розподілу дуття з нерівномірністю розподілу природного газу, коригованою за візуальними спостереженнями «роботи фурм», показали достатній зв'язок для регулювання та вирівнювання теоретичних температур горіння по окружності ДП. На підставі цього, в подальшому у розрахунках променистим теплообміном, що сприймається фланцями фурмених оглядових вікон нехтували [29].

При виконанні попередніх досліджень [29, 30] була доведена ефективність методу управління розподілу параметрів дуття по повітряних фурмах при проведенні ручним способом вимірювань теплових навантажень на фланцях підвішених колін фурмених приладів ДП ПрАТ «Камет-сталь».

Внаслідок промислової реалізації спрямованого зменшення витрат ПВП на окремих групах повітряних фурмах та створення умов щодо зменшення нерівномірності теоретичної температури горіння по окружності двох ДП ПрАТ «Камет-сталь» (ДП-12 та ДП-1М) були отримані наступні показники ефективності [29, 30]:

- на ДП-12 (2018 р., 25 діб) зменшення на 2,2% питомої витрати коксу (порівняння дослідного періоду з попереднім базовим) при зменшенні на 12% середньоквадратичного відхилення вмісту кремнію в чавуні на випусках продуктів плавки. Після дослідного періоду ухвалено рішення про збільшення діаметра повітряних фурм із 140 до 150 мм;

- на ДП-1М (2019–2020 рр., 60 діб) – 2,9% економії питомої витрати коксу при зменшенні температури периферійного газового потоку на 100–120 °С.

СППР щодо управління розподілом дуття по фурмах ДП заснована на інформації про зміну витрат дуття у часі для кожної окремої повітряної фурми ДП. Для автоматизованого контролю розподілу

параметрів дуття по фурмах необхідна установка на кожен фурменний прилад витратоміра води, що надходить на фланці (на рис. 1 показано стрілками) підвищеного коліна фурменного приладу (на рис. 1 показаний чорним кольором) та термопари на ділянці зливного трубопроводу після охолодження. СППР щодо управління розподілом дуття по повітряних фурмах повинна містити як необхідний набір інформації для прийняття рішень щодо здійснення коригуючих дій, так і комплекс рекомендацій, що генерується при функціонуванні СППР.

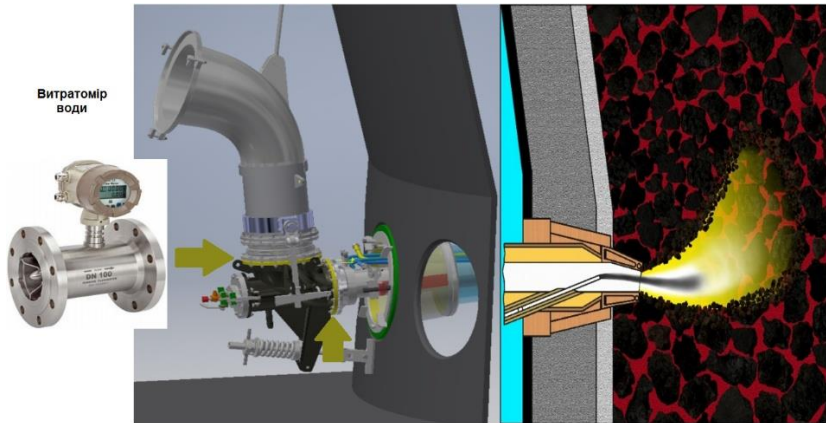


Рисунок 1 – Схема обладнання, необхідного для впровадження системи управління автоматизованого контролю розподілу дуття

СППР щодо управління окружним розподілом параметрів дуття в доменній печі повинна включати: візуалізацію первинної інформації щодо розподілу по окружності ДП перепадів температур та витрат охолоджувальної води; візуалізацію розрахункової інформації щодо розподілу по окружності ДП фактичної теоретичної температури горіння, витрат та швидкості дуття, геометрії фурмених осередків; блок генерації рекомендацій щодо коригування витрат паливних добавок на окремих фурмах для забезпечення необхідного окружного розподілу теоретичної температури горіння; сигналізації щодо наявності т.зв. «зашлакованості» фурм; рекомендації щодо зміни діаметрів повітряних фурм.

На рис. 2 показано головний відеокادر СППР щодо управління окружним розподілом параметрів дуття в доменній печі. На рис. 3 представлена ілюстрація фурмених осередків (основа допоміжного відеокадру СППР) при ідеальному розподілі дуття (№1), характерному (робочому) на прикладі роботи ДП-1М ПрАТ «Камет-сталь» (№2) та при нерівномірності, що вимагає внесення коригуючих впливів (№3).

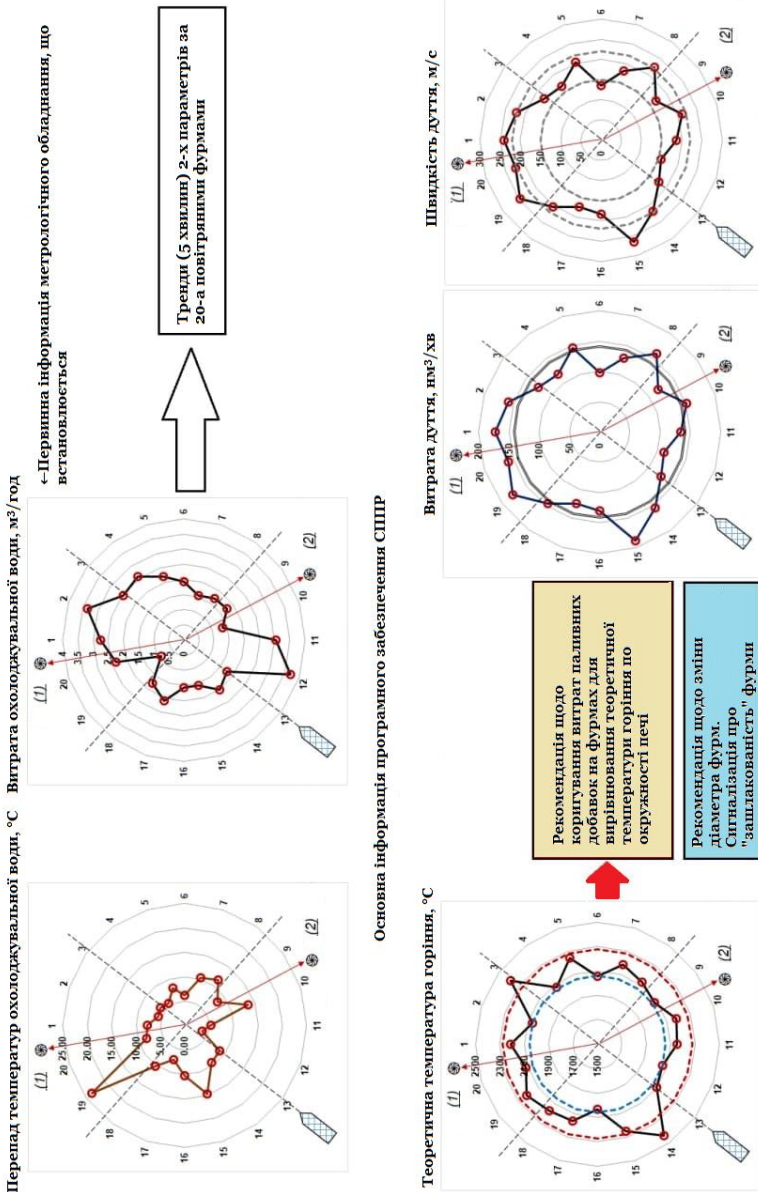
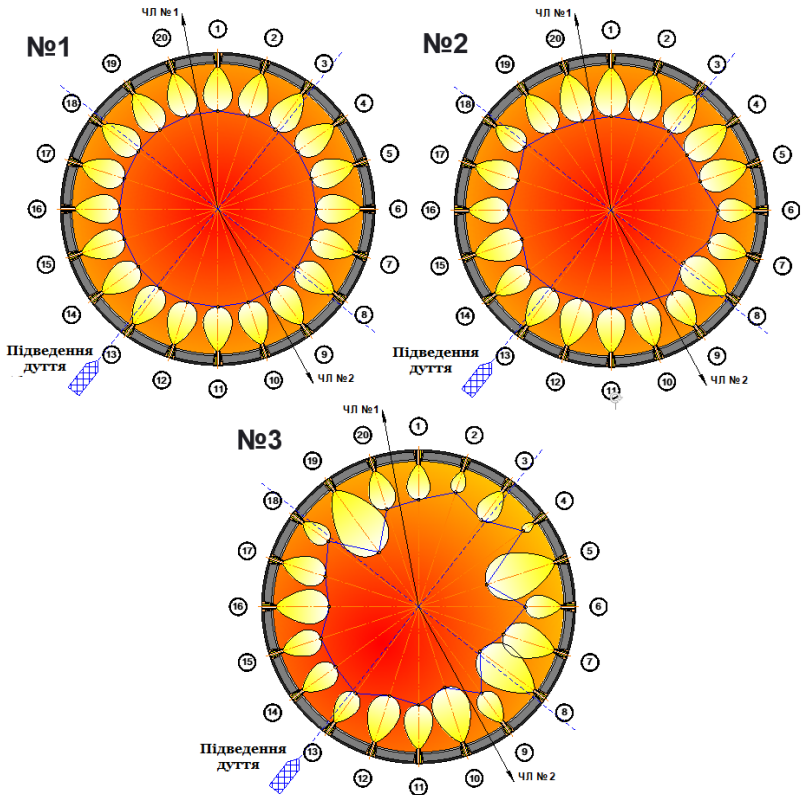


Рисунок 2 – Головний відеокADR СППР щодо управління окружним розподілом дуття в доменній печі (на прикладі ДП-1М ПрАТ «Камет-сталь»)



1 ...20 – повітряні фурми, ЧЛ №1, №2 – чавунні льотки

Рисунок 3 – Фурмени осередки (фрагмент відеокадру СППР) для трьох варіантів розподілу дуття для умов роботи ДП-1М ПрАТ «Камет-сталь»

Розробка СППР передбачає з використанням технології «Bigdata» [34] створення представницької БД різних режимів розподілу дуття та техніко-економічних показників доменної плавки із встановленням зв'язків окружного розподілу параметрів дуття та технологічних показників, на підставі яких створення критерію оцінки окружного газорозподілу в ДП, який забезпечує алгоритмічне поєднання (синергію) даної СППР з іншою (іншими) СППР з генерацією відповідних комплексних рекомендацій по управлінню доменною плавкою. В якості складової такого критерію має виступати встановленні залежності теоретичної температури горіння та температурних показників розподілу газового потоку, отримані як в попередніх дослідженнях [31], так і розвинуті в даній роботі та

представлені нижче.

Основні рекомендації СППР щодо управління окружним розподілом параметрів дуття в ДП полягають у наступному:

1) при відхиленні теоретичної температури горіння (T_f^n) на повітряній фурмі n на 5% від середнього значення по печі (T_f^{avg}), генерується рекомендація щодо зміни витрати ПВП або природного газу (ПГ) або (ПВП+ПГ) відповідно до формул [25] на цій фурмі для забезпечення дотримання умови:

$$T_f^{min} < T_f^n \leq T_f^{max},$$

де $T_f^{min} = T_f^{avg} \cdot (1 - 5\%)$, $T_f^{max} = T_f^{avg} \cdot (1 + 5\%)$ – мінімально та максимально допустимі межі діапазону зміни теоретичної температури горіння по кожній повітряній фурмі; величина допустимого відхилення 5% – встановлена при виконанні досліджень, що передують розробці СППР [29, 30], і може змінюватись технологом на його розсуд.

2) при одночасному на повітряній фурмі зменшенні кожену добу мінімум на 5% витрати дуття та збільшенні мінімум на 20% перепаду температур води системи охолодження («рильної» частини фурми) генерується текстове повідомлення про «зашлакованість» повітряної фурми.

3) при використанні коксу погіршеної якості за показником CSR, який становить 48% та менше (величина експериментальна та може змінюватись при експлуатації СППР) з одночасним зменшенням кожену добу мінімум на 5% витрати дуття на повітряній фурмі генерується текстове повідомлення про доцільність збільшення діаметру цієї фурми.

Поєднання (синергія) рекомендацій СППР щодо управління окружним розподілом дуття з рекомендаціями СППР щодо управління режимом завантаження, яка використовує інформацію про зміну температур газового потоку над поверхнею засипу шихти по чотирьох радіусах ДП [35], полягає у наступному.

При тривалому (протягом 3-х діб) виконанні умови: $K_3 > K_3^{optimum}$ має місце зайве завантаження коксом проміжної зони печі або каналний хід у проміжній зоні, у цьому випадку визначаються показники K_3 по кожному з 4-х термозондів (радіусів ДП), встановлюється сектор з максимальним K_3 та відповідний модуль СППР щодо управління режимом завантаження генерує рекомендацію: «Надмірно інтенсивний газовий потік у секторі ДП: $N_2n \dots N_2n + m$. Необхідно визначити розподіл дуття по повітряних фурмах і вжити заходів щодо вирівнювання теоретичної температури горіння по окружності ДП». В даній рекомендації модуля СППР щодо управління режимом завантаження K_3 – це показник газового потоку проміжної зони радіуса ДП, який

визначається співвідношенням середньої температури газового потоку проміжної зони до середньої температури. Але для необхідності визначення розподілу дугтя по повітряних фурмах з подальшим вирівнюванням теоретичної температури горіння по окружності ДП необхідно застосовувати аналогічну умову і для показника газового потоку периферійної зони радіуса ДП (K_1 згідно [35]).

Ілюстрація тривалої (протягом 3-х діб) окружної нерівномірності газового потоку (канальний хід ДП), як проміжної зони, так і периферійної в секторі ДП з вимірюванням температур газового потоку термозондом (ТЗ-2) показана на рис. 4 праворуч на прикладі роботи ДП-1М у вересні 2025 р. (09-11.09.2025 р.). На рис. 4 ліворуч показаний розподіл теоретичних температур горіння по повітряних фурмах у порівнянні з середньою теоретичною температурою ДП-1М для даного періоду. Розподіл теоретичних температур горіння по повітряних фурмах ілюструє значне збільшення теоретичних температур горіння у секторі чавунної льотки (ЧЛ-1) та у секторі термозонду (ТЗ-2), що свідчить про канальний хід ДП по висоті стовпа шихти.

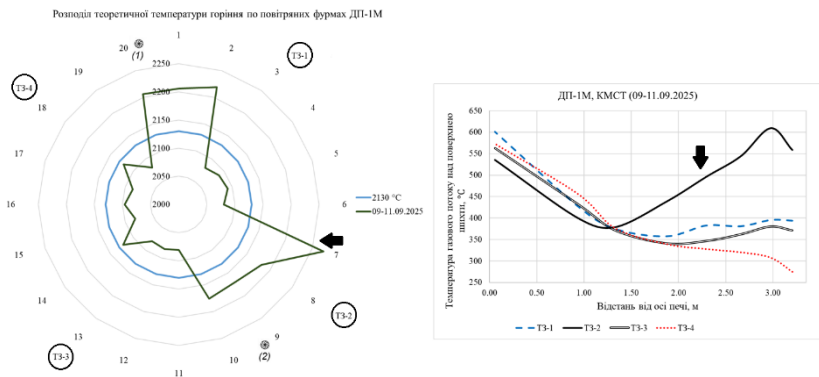


Рисунок 4 – Розподіл теоретичних температур горіння по повітряних фурмах та температури газового потоку над поверхнею засипу шихти по чотирьох радіусах (ТЗ-1...ТЗ-4) ДП-1М ПрАТ «Камет-сталь» у вересні 2025 р.

Інший приклад впливу нерівномірності окружного розподілу теоретичної температури по повітряних фурмах на розвиток газорозподілу верхньої зони ДП, показаний на рис. 5 для умов роботи у серпні 2025 р. На рис. 5 ліворуч показані два періоди тривалістю 3 доби з найбільшою (23-25.08.2025 р.) та найменшою (08-10.08.2025 р.) у другому півріччі 2025 р. роботи ДП-1М окружною нерівномірністю розподілу теоретичних температур горіння по повітряних фурмах. На рис. 5 праворуч показані відповідні розподілам теоретичних температур горіння середні температури газового потоку над поверхнею засипу,

згідно показань чотирьох термозондів.

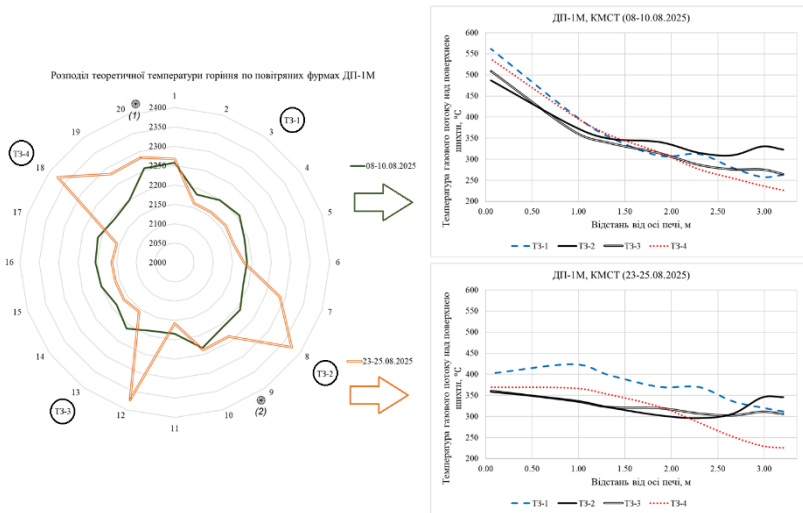


Рисунок 5 – Розподіл теоретичних температур горіння по повітряних фурмах та температури газового потоку над поверхнею засипу шихти по чотирьох радіусах (TZ-1...TZ-4) ДП-1М ПрАТ «Камет-сталь» у серпні 2025 р.

Як впливає з рис. 5 найбільша окружна нерівномірність розподілу теоретичних температур горіння по повітряних фурмах призводить до суттєвого погіршення центрального газорозподілу в ДП ($T_{\text{середн}} = 370^\circ\text{C}$) та окружної нерівномірності температур газового потоку, а рівномірний розподіл теоретичних температур горіння сприяє формуванню сталого центрального ходу печі ($T_{\text{середн}} = 525^\circ\text{C}$) з відносно рівномірним окружним розподілом температур газового потоку.

Слід зазначити, що наведені приклади відносяться до періоду роботи ДП-1М після проведеного в липні 2025 р. планового ремонту печі тривалістю 6 діб з встановленням нових термозондів, отже, наведені періоди роботи ДП-1М передують формуванню по висоті печі стійкого гарнісажу, який міг спотворювати газовий потік.

На підставі встановленого зв'язку розподілу теоретичних температур горіння по повітряних фурмах та температур газового потоку над поверхнею засипу шихти з високими коефіцієнтами лінійної кореляції були отримані залежності температурних показників газового потоку від середньоквадратичного відхилення теоретичної температури горіння по повітряних фурмах за період роботи ДП-1М у серпні-жовтні 2025 р. (рис. 6). У якості температурних показників газового потоку

були обрані раніше запропоновані показники $K_1...K_4$ [34], де ($K_1=T_{ПФ}/T_{СЕР}$) – відношення температури периферійної зони до середньої температури, ($K_2=T_{Ц}/T_{СЕР}$) – відношення температури центральної зони до середньої температури, ($K_3=T_{ПР}/T_{СЕР}$) – відношення температури проміжної зони до середньої температури та ($K_4=T_{Ц}/T_{ПР\text{еіс}ь}$) – відношення температури центральної зони до температури приосьової зони. Також був розглянутий додатковий показник ($K_5=T_{Ц}/T_{ПФ}$) – відношення температури центральної зони до температури периферійної зони.

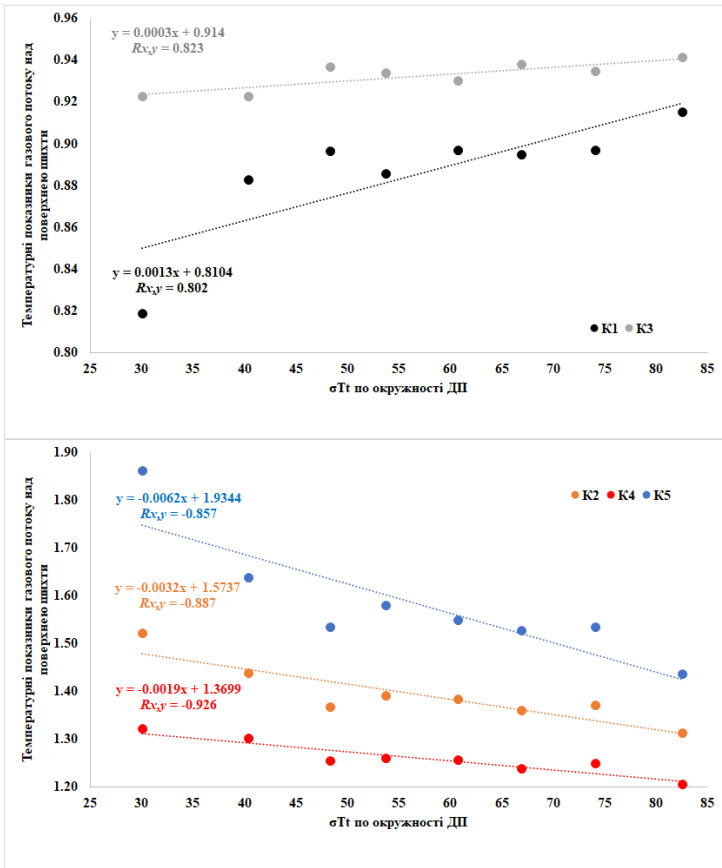


Рисунок 6 – Залежності температурних показників газового потоку над поверхнею засипу шихти ($K_1...K_5$) від середньоквадратичного відхилення теоретичної температури горіння (σT_t) по окружності ДП-1М ПрАТ «Камет-сталь», серпень-жовтень 2025 р.

Кожна точка на графіках, представлених на рис. 6, отримана як середнє за 10 значень, кожне з яких – середнє за 3 доби роботи ДП, отримане ковзним середнім в досліджуваному періоді. Як впливає з рис. 6 чим більше окружна нерівномірність теоретичної температури горіння (σTt) тим більш розвинений периферійний газовий потік (K_1) і більша газопроникність проміжної зони радіусу ДП (K_3) – прямий зв'язок та, відповідно, чим менше σTt тим більш розвинений центральний газовий потік (K_2, K_4, K_5) – зворотній зв'язок. Таким чином, отримані результати дозволяють забезпечити синергетичну взаємодію функціонування СППР щодо управління розподілом параметрів дуття по фурмах доменної печі та СППР щодо управління режимом завантаження шихти.

Висновки

Наведений опис проблеми автоматизованого контролю кількісного розподілу дуття по повітряних фурмах ДП, яка вивчається багато років та досі є повністю не вирішеною та актуальною, оскільки нерівномірність розподілу дуття значно впливає на газорозподіл і тепловий стан у всьому об'ємі доменної печі. Показані результати ефективності застосування методу управління розподілу параметрів дуття по повітряних фурмах при проведенні ручним способом вимірювань теплових навантажень на фланцях підвішених колін фурмених приладів ДП-1М та ДП-12 ПрАТ «Камет-сталь» у 2018–2020 рр. Представлені методологічні та інформаційні засади розробки системи підтримки прийняття рішень щодо управління розподілом дуття по фурмах доменної печі. Показано, що для створення системи підтримки прийняття рішень необхідні: використання інформації сучасних засобів автоматизованого контролю з встановленням статистичних залежностей нових показників, створення на базі цієї інформації, з показниками доменної плавки; створення представницької бази даних різних режимів роботи доменної печі з відповідними техніко-економічними показниками і технологічними параметрами доменної плавки; апробація, як окремих складових системи, так і комплексу рекомендацій по управлінню доменною плавкою в реальних умовах виробництва. В статті вперше показаний вплив нерівномірності окружного розподілу теплового стану нижньої зони доменної печі, згідно з розподілом теоретичної температури по повітряних фурмах, на розвиток центрального газорозподілу верхньої зони та каналного ходу доменної печі, згідно показань засобів контролю температур газового потоку над поверхнею засипу шихти. Отримані залежності температурних показників газового потоку над поверхнею засипу шихти від середньоквадратичного відхилення теоретичної температури

горіння по окружності доменної печі. Отримані результати дозволяють забезпечити синергетичну взаємодію функціонування системи підтримки прийняття рішень щодо управління розподілом параметрів дуття по фурмах доменної печі та системи підтримки прийняття рішень щодо управління режимом завантаження шихти.

Перелік посилань / References

1. Vashchenko, S., Semenov, Yu., Khudyakov, O., et al. (2025). Development and implementation of a mathematical model of charging a blast furnace equipped with a bell-type charging device. *Metallurgical Research & Technology*, 122 (6), 624. <https://doi.org/10.1051/etal/2025095>
2. Chaika, A. L., Lebed, V. V., Kornilov, B. V., et al. (2021). Implementation of a Set of Long-Term and Energy-Saving Cast Iron Production Models in Blast Furnaces in Ukraine. *Steel in Translation*, 51 (3), 201–204. <https://doi.org/10.3103/S0967091221030025>
3. Yuan, M., Zhou, P., Li, M., et al. (2015). Intelligent multivariable modeling of blast furnace molten iron quality based on dynamic AGA-ANN and PCA. *Journal of Iron and Steel Research International*, 22, 487–495. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(15\)30031-5](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(15)30031-5)
4. Zhou, P., Guo, D., Wang, H., Chai, T. (2017). Data-Driven Robust M-LS-SVR-Based NARX Modeling for Estimation and Control of Molten Iron Quality Indices in Blast Furnace Ironmaking. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 29 (9), 4007–4021. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2017.2749412>
5. Agrawal, A., Kothari, A. K., Kuma,r A., et al. (2019). Advances in thermal level measurement techniques using mathematical models, statistical models and decision support systems in blast furnace. *Metallurgical Research & Technology*, 116, 16. <https://doi.org/10.1051/etal/2019019>
6. Semenov, Yu. S., Shumelchik, E. I., Vishnyakov, V. I., et al. (2013). Model system for selecting and correcting charging programs for blast furnaces equipped with a bell-less charging apparatus. *Metallurgist*, 56 (9–10), 652–657. <https://doi.org/10.1007/s11015-013-9630-3>
7. Li, J., Tang, X.-Y., Song, W., et al. (2024). A Blast Furnace Throat Temperature Estimation Method Based on Multi-time Scale Online Fusion. *36th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 25-27 May 2024. <https://doi.org/10.1109/CCDC62350.2024.10587722>
8. Semenov, Yu. S., Shumelchik, E. I., Horupakha, V. V. (2017). Blast Furnace Shaft Thermal State Monitoring System. *Steel in Translation*, 47 (11), 728–731. <https://doi.org/10.3103/S0967091217110092>
9. Fei, J., Jiang, X., Yang, H., et al. (2024). Research and Development of a Big Data Application Platform for Intelligent Blast Furnace Intensive Management and Control. *ACS Omega*, 9 (23), 24674–24684. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsomega.4c01162>
10. Liu, R., Zhang, Zf., Li, X., et al. (2023). Hot metal quality monitoring system based on big data and machine learning. *Journal of Iron and Steel Research International*, 30, 915–925. <https://doi.org/10.1007/s42243-023-00934-4>
11. Zhang, Z., Tang, J., Chu, Ms., et al. (2025). Online calculation and monitoring system of blast furnace operation profile based on data and mechanism

dual drive. *Journal of Iron and Steel Research International*, 32, 4188–4206. <https://doi.org/10.1007/s42243-025-01605-2>

12. Warren, P., & Harvey, S. (2001). Development and implementation of a generic blast-furnace expert system. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 110 (1), 43–49. <https://doi.org/10.1179/mpm.2001.110.1.43>

13. Semenov, Y. S., Shumelchik, Y. I., Horupakha, V. V., et al. (2022). Development and Implementation of Decision Support Systems for Blast Smelting Control in the Conditions of PrJSC "Kamet-steel". *MDPI, Metals*, 12 (6), 985. <https://doi.org/10.3390/met12060985>

14. Semenov, Yu. S., Podkorytov, A. L., Shumelchik, E. I., et al. (2021). Decision Support System for Controlling Thermal State of Blast Furnace Smelting. *Steel in Translation*, 51 (4), 261–266. <https://doi.org/10.3103/S0967091221040094>

15. Zhang, R., Lu, J., & Zhang, G. (2011). A knowledge-based multi-role decision support system for ore blending cost optimization of blast furnace. *European Journal of Operational Research*, 215, 194–203. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.05.037>

16. Mu, Y., Yan, B., He, H., et al. (2026). Mining of expert rules for blast furnace air volume regulation. *Results in Engineering*, 29, 108473. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108473>

17. Wright, B. D., Zulli, P. (2009). Application of decision support system for thermal balance control in the ironmaking blast furnace. BlueScope Steel Research, Old Port Rd Port Kembla, Australia, 1–9. Google

18. Lyalyuk, V. P., Tarakanov, A. K., Kassim, D. A., & Rznitskii, I. G. (2018). Improvement of the Uniformity of Blast Distribution over the Circumference of Blast-Furnace Hearth. *Metallurgist*, 62 (1–2), 119–124. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0633-y>

19. Druzhkov, V. G., & Shirshov, M. Yu. (2017). Improving the Junction Between the Hot-Blast Main and the Bustle Pipe of a Blast Furnace. *Metallurgist*, 60 (11–12), 1239–1242. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0434-8>

20. Shi, B., Liu, H., Liu, B. et al. (2022). Influence of Breeches Pipe Structures on Hot Blast Distribution Rule Around the Hearth Circumferentially. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 53, 3613–3623. <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02624-0>

21. Bol'shakov, V. I., Shuliko, S. T., Kanaev, V. V., et al. (1999). Investigation of gas distribution in a large-volume blast furnace. *Steel in Translation*, 29 (12), 1–5. [Scopus]

22. Bol'shakov, V. I., Shuliko, S. T., & Kanaev, V. V., et al. (1997). Study of the charge and gas-flow distributions in a large blast furnace with a bell-less charging apparatus. *Metallurgist*, 41, 389–390. <https://doi.org/10.1007/BF02768853>

23. Shirshov, M. Yu., & Druzhkov, V. G. (2015). Improving the automatic blast distribution in blast furnaces. *Steel in Translation*, 45 (1), 49–53. <https://doi.org/10.3103/S0967091215010131>

24. Motta, R. S. N., Bortoni, E. C., & Souza, L. E. (2013). Hot Blast Flow Measurement in Blast Furnace in Straight Pipe. *Modern Instrumentation*, 2, 68–73. <http://dx.doi.org/10.4236/mi.2013.24010>

25. Semenov, Yu. S., Horupakha, V. V., & Shumel'chik, Ye. I. (2022). *Sposib upravlinnya okruzhnym rozpodilom dutya v domenni 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 <https://iprop-ua.com/inv/ce25mu8z/>

26. Liu, B., Che, Y., & Shi, B. (2022). Influence of blast volume on hot blast distribution rule around the hearth circumferentially. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 21 (5). <https://doi.org/10.1515/ijcre-2022-0135>

27. Shi, B., Liu, B., Zhang, Y., et al. (2025). Evaluation and discussion on the circumferential distribution of hot blast in the blast furnace. *Metallurgical Research & Technology*, 122 (1), 108. <https://doi.org/10.1051/metal/2024100>

28. Mozharensko, N. M., Kanaev, V. V., Paranosenkov, A. A., et al. (2005). Automated system for monitoring the flow rate of blast through the air tuyeres of a blast furnace. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 11, 34–42. <https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/21582>

29. 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, 184–192. <https://doi.org/10.33313/382/018>

30. Semenov, Yu. S., Podkorytov, A. L., Horupakha, V. V., et al. (2020). New scientific and applied results of studies efficiency use of pulverized coal in the production of cast iron and lime burning. *Metal and Casting of Ukraine*, 2, 15–26. <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/102>

31. Horupakha, V. V., Semenov, Yu. S., Khudyakov, O. Yu., et al. (2025). 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>

32. Geerdes, M., Chaigneau, R., & Lingiardi, O. (2020). Modern blast furnace ironmaking: an introduction. IOS Press BV. ISBN 978-1-64368-123-8. Google

33. Semenov, Yu., Horupakha, V., Khudyakov, O., et al. (2026). Features of blast furnace smelting technology with pulverized coal injection from different coal mixtures under conditions of variable coke quality. *Metallurgical Research & Technology*, article in press. <https://doi.org/10.1051/metal/2026028>

34. Sagioglu, S., & Sinanc, D. (2013). Big data: A review. *International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, 42-47. <https://doi.org/10.1109/CTS.2013.6567202>

35. Semenov, Yu., Shumelchik, Ie., Vashchenko, S., et al. (2025). Optimization of blast furnace charging modes based on changes in gas flow temperatures. *Discover Mechanical Engineering*, 4, 60. <https://doi.org/10.1007/s44245-025-00157-9>

Yu. S. Semenov^{1,*}, Cand. Sc. (Engin.), Senior Research Scientist, Head of the Department, ORCID 0000-0003-2299-5742

V. V. Horupakha¹, Researcher, ORCID 0000-0003-0531-1871

S. V. Vashchenko¹, Cand. Sc. (Engin.), Senior Research Scientist, Senior Researcher, ORCID 0000-0001-8344-961X

Ye. I. Shumelchik¹, Ph. D., Senior Research Scientist, Senior Researcher, ORCID 0000-0001-5350-6425

O. Yu. Khudyakov¹, Cand. Sc. (Engin.), Senior Research Scientist, Senior Researcher, ORCID 0000-0002-6507-1120

K. V. Baiul¹, D. Sc. (Tech.), Senior Research Scientist, Leading Researcher, ORCID 0000-0003-1426-7956

¹*Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine*

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

DEVELOPMENT OF A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR CONTROLLING THE DISTRIBUTION OF BLAST PARAMETERS OVER BLAST FURNACE TUYERES

Abstract. The article describes the problem of automated control of the quantitative distribution of the blast on the air tuyeres of a blast furnace (BF), which has been studied for many years and is still not fully resolved and relevant, since the uneven distribution of the blast significantly affects the gas distribution and thermal state throughout the volume of the BF. The results of the effectiveness of the application of the method of controlling the distribution of the blast parameters on the air tuyeres when manually measuring the thermal loads on the flanges of the suspended knees of the tuyere devices BF-1M and BF-12 of PrJSC "Kamet-steel" in 2018-2020 are shown. The methodological and information principles of the decision support system (DSS) for controlling the distribution of the blast parameters on the tuyeres of the BF, which has been developed in recent years at the Iron and Steel Institute, are presented. The creation of the DSS consists of the following stages: using information from modern automated control tools with the establishment of statistical dependencies of this information with blast smelting indicators; creation of a representative database containing various BF operating modes with corresponding technical and economic indicators of BF smelting, charging mode parameters and information on control means; development of a block of recommendations. DSS should include: visualization of primary information on the distribution of temperature differences and cooling water consumption around the circumference of the BF; visualization of calculated information on the distribution of the actual RAFT (raceway adiabatic flame temperature), consumption and blast speed, and the geometry of the raceway zone around the circumference of the BF; a block for generating recommendations on adjusting the consumption of fuel additives on individual tuyeres to ensure the required circumferential distribution of the RAFT; signaling on the presence of the so-called "slagging" of tuyeres; recommendations on changing the diameters of air tuyeres. DSS for controlling the circumferential distribution of blast parameters in a BF should also provide for the development of methods and criteria that allow for the synergistic interaction of the functioning of various DSSs installed on the BF. The article first shows the influence of the unevenness of the circumferential distribution of the thermal state of the lower zone of the BF, according to the distribution of the RAFT along the air tuyeres, on the development of the central gas distribution of the upper zone and the channel course of the BF, according to the readings of the means of controlling the temperatures of the gas flow above the charge surface. The dependences of the temperature indicators of the gas flow above the charge surface on the root mean square deviation of the RAFT along the circumference of the BF are obtained. The article indicates that an important stage in the development of the DSS

is the testing of both its individual components and a set of recommendations for controlling BF smelting in real production conditions.

Keywords: blast furnace, decision support system, pulverized coal, circumferential distribution of blast, gas flow temperatures.

For citation: Semenov, Yu. S., Horupakha, V. V., Vashchenko, S. V., Shumelchuk, Ye. I., Khudyakov, O. Yu., & Baiul, K. V. (2026). Development of a decision support system for controlling the distribution of blast parameters over blast furnace tuyeres. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40, 272-289. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-018>

Рукопис надійшов до редакції / Received 19.02.2026

Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026

Опубліковано / Published 30.05.2026