

Ю. С. Семенов, к.т.н., с.н.с., ORCID: 0000-0003-2299-5742

Є. І. Шумельчик, к.т.н., с.н.с., ORCID: 0000-0001-5350-6425

В. В. Горупаха, н.с., ORCID: 0000-0003-0531-1871

С. В. Ващенко, к.т.н., с.н.с., ORCID: 0000-0001-8344-961X

О. Ю. Худяков, к.т.н., с.н.с., ORCID: 0000-0002-6507-1120

К. П. Єрмоліна, пров. інженер

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

І. Ю. Семіон, директор з технології та якості

І. В. Чичов, старший майстер виробництва з технології

ПрАТ «ДКХЗ» Металургійне виробництво, м. Кам'янське

ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО УПРАВЛІННЯ ДОМЕННОЮ ПЛАВКОЮ В УМОВАХ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА ПрАТ «ДКХЗ»

Анотація. Метою роботи є підвищення рівня автоматизації доменного виробництва за рахунок розробки й впровадження нових систем підтримки прийняття рішень щодо управління доменною плавкою в змінних технологічних та паливно-сировинних умовах. Представлено опис трьох систем підтримки прийняття рішень (СППР) у режимі порадирика технологічному персоналу доменних печей, які реалізовані ІЧМ або пройшли дослідно-промислове випробування у складі АСУ доменного цеху металургійного виробництва ПрАТ «ДКХЗ» (м. Кам'янське). Перша СППР з управління тепловим станом реалізована у 2021 р., включає весь перелік необхідної персоналу інформації у зручному та компактному вигляді, генерує рекомендації при відхиленнях технології та при неправильних діях персоналу сигналізує про необхідність здійснення коректних дій. Основні рекомендації системи полягають у коригуванні теоретичної температури горіння, витрати коксу при зміні його характеристик та рудного навантаження. Використання системи дозволяє як скоротити питому витрату коксу, так і запобігти неплановим простоям. Друга СППР з управління розподілом паливних добавок по фурмах заснована на інформації теплових навантажень, що визначаються на водоохолоджуваних елементах фурмених приладів. Основні рекомендації системи полягають у коригуванні на окремих фурмах кількості пилоугільного палива з метою забезпечення рівномірного розподілу теоретичної температури горіння по окружності доменної печі і, як наслідок, енергоефективності доменної плавки. Третя СППР з коригування параметрів режиму завантаження заснована на інформації засобів контролю температури газового потоку над поверхнею засипу в доменній печі. Функціонування даної системи полягає у визначенні еталонних кривих розподілу газового потоку по радіусах печі, відповідних мінімальній витраті коксу та максимальній

продуктивності, і на пошуку рішень методами прямої та ітераційної оптимізації, які дозволяють шляхом коригування параметрів завантаження забезпечити раціональний розподіл шихтових матеріалів та газового потоку в доменній печі.

Ключові слова: доменна піч, системи підтримки прийняття рішень, управління доменною плавкою, тепловий стан, пиловугільне паливо, розподіл дуття, термозонд, система завантаження доменної печі.

Посилання для цитування: Семенов Ю. С., Шумельчик С. І., Горупаха В. В., Ващенко С. В., Худяков О. Ю., Єрмоліна К. П., Семіон І. Ю., Чичов І. В. Впровадження систем підтримки прийняття рішень щодо управління доменною плавкою в умовах металургійного виробництва ПрАТ «ДКХЗ». *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2021. Вип. 35. С. 78-94. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-78-94

Стан проблеми. Світова практика автоматизації доменних печей (ДП) заснована на максимально прийнятному рівні отримання оперативної та достовірної інформації технологічним персоналом з наданням рекомендацій, що генеруються комп'ютерними системами відповідно до баз знань, що базуються на технологічному досвіді, а також з використанням математичних та статистичних моделей, інформації засобів автоматизованого контролю. Такі комп'ютерні системи, зазвичай, називають системами підтримки прийняття рішень (СППР). Аналіз літературних даних показує різноманітність як використання математичних моделей, модельних систем, експертних модулів та систем моніторингу [1-8] для підтримки прийняття рішень, так і комплексних СППР у доменному виробництві [8-12].

Метою роботи є підвищення рівня автоматизації доменного виробництва ПрАТ «ДКХЗ» за рахунок розробки й впровадження нових систем підтримки прийняття рішень щодо управління доменною плавкою в змінних технологічних та паливно-сировинних умовах.

Основний матеріал дослідження. Представлені дослідження та розробка СППР виконано для умов роботи трьох ДП металургійного виробництва ПрАТ «ДКХЗ» (м. Кам'янське, Дніпропетровська область, Україна, до вересня 2021 р. – назва: Дніпровський металургійний комбінат): ДП №1М (корисний об'єм 1500 м³, конусний завантажувальний пристрій, 20 повітряних фурм), №9 (корисний об'єм 1386 м³, конусний завантажувальний пристрій, 18 повітряних фурм) та №12 (корисний об'єм 1386 м³, конусний завантажувальний пристрій, 16 повітряних фурм).

Перша СППР щодо стабілізації теплового стану ДП розроблена та реалізована ІЧМ на ПрАТ «ДКХЗ» у 2021 р. Цільовою функцією управління тепловим станом доменної плавки служить підтримання стійкості теплового режиму на рівні, що забезпечує отримання чавуну з

мінімальними відхиленнями від рівня параметрів, що його характеризують. Як основний показник (критерій) теплового стану найчастіше використовується вміст кремнію в чавуні [Si] [13]. Підтримка цієї величини в певних межах, з одного боку, забезпечує найбільш економічний тепловий режим – без зайвого резерву тепла, тобто без перевитрати палива, але з максимальною продуктивністю, а з іншого – гарантує дотримання вимог до доменної плавки є: температура чавуну, вміст сірки у чавуні, вміст FeO та лужних оксидів у шлаку.

Багаторічний досвід теорії і практики управління тепловим станом доменної плавки, як правило, зводився до розробки й впровадженню методів прогнозування [Si], але більшість відомих методів прогнозування мала невисокий ступінь точності через багатofакторність впливу технологічних параметрів на тепловий стан доменної плавки та неконтрольованість деяких з них [12]. Крім того, точність цих способів прогнозування визначається двома головними умовами: оперативним отриманням повного обсягу достовірної інформації про параметри технології та сталістю паливно-сировинних та дуттєвих параметрів. Дотримання першої умови важко здійснити, а при дотриманні другої умови забезпечується стабільність теплового стану, що супроводжується зміною параметрів теплового стану в рамках допустимих діапазонів, що виключає необхідність прогнозування як такого. Тому актуальною є задача стабільності ведення процесу, чіткого розуміння ступеня впливу тих чи інших факторів, оперативності реагування на зміни та дотримання технологічної інструкції.

Для найбільш точної оцінки стабільності теплового стану доменної плавки прийнято використовувати середньоквадратичне відхилення (СКВ) вмісту кремнію в чавуні $\sigma[\text{Si}]$, яке визначають або в рамках однієї доби роботи ДП (за кількістю випусків, що припадають на добу), або на часовому проміжку, що дорівнює 10 випусків. Оцінка $\sigma[\text{Si}]$ на більш тривалій часовій ділянці ускладнює аналіз виявлення факторів, що вплинули на СКВ, оскільки порівняння відбувається щодо середньої величини [Si], на яку кожної доби впливають інші фактори. При виконанні аналізу динаміки зміни $\sigma[\text{Si}]$ на ДП ПрАТ «ДКХЗ» у 2020–2021 рр. визначено фактори, що найбільше впливають на зниження даного показника: стабільність зміни теоретичної температури горіння (при середньому значенні понад 2000°C) та параметрів її визначальних; оперативність прийняття коригувальних дій у разі перших ознак порушення теплового стану; зміна рудного навантаження відповідно до тенденції зміни теплового стану та з кроком зміни, що не перевищує 0,3 т/т; дотримання графіка випусків; стабільність показників якості коксу та

хімічного складу агломерату; задовільний (без захаращення) стан горнів за умов застосування відсіву коксу у складі залізорудної частини шихти; наявність резервів тепла перед зупинками ДП на ремонт. Крім того, беруться до уваги такі негативні фактори, що існують на ПрАТ «ДКХЗ», як: технічний стан печей (головним чином, стан горнів); відсутність автоматичного контролю вологості коксу; відсутність відсіву агломерату; нестабільність кисню, що подається на збагачення дуття; нестабільність зміни витрати пиловугільного палива (ПВП); високі СКВ показників якості коксу та хімічного складу агломерату; затримка отримання результатів хімічного аналізу продуктів плавки через особливості роботи пневмопошти [12].

Цільовим значенням $\sigma[\text{Si}]$ у прогнозованих умовах роботи ДП ПрАТ «ДКХЗ» може бути величина менше ніж 0,100 од. з урахуванням досягнутої величини 0,081– 0,091 од. у травні-липні 2021 р. після проведення капітального ремонту на ДП №1М з шоткретуванням шахти та промивок горна високозакисним агломератом та брикетами на ДП №9 та ДП №12. Для досягнення цієї величини необхідно: дотримання вимог щодо динаміки зміни теоретичної температури горіння та рудного навантаження; дотримання графіка випусків; проведення цільових промивок горна важковідновними матеріалами при його захаращенні [14–18]; проведення профілактичних м'яких промивок від флюсових залишків та коксового сміття у проміжній зоні ДП сумішню залізорудних матеріалів основністю 0,65– 0,85 од. [17–19]; забезпечення рівномірного розподілу теплового стану фурмених зон по окружності ДП шляхом спрямованого регулювання витрати ПВП за повітряними фурмами [19–21]; використання в доменній шихті матеріалів, що містять марганець, для підтримки вмісту марганцю в чавуні в діапазоні 0,25– 0,35 % [19,22]; використання рекомендацій розробленої СППР щодо управління тепловим станом доменної плавки.

Відповідно до бази знань, отриманої при виконанні досліджень у 2018–2021 рр. на ПрАТ «ДКХЗ» [12, 17–22], та в результаті виконаного у 2020–2021 рр. детального аналізу порушень теплового режиму доменної плавки ІЧМ розроблено систему підтримки прийняття рішень у режимі порадирика з управління тепловим станом доменних печей ПрАТ «ДКХЗ». Screenshots СППР представлені на рис. 1. СППР включає весь перелік необхідної інформації у зручному та компактному вигляді: таблиця хімічних аналізів чавуну та шлаку; таблиця хімічних аналізів агломерату; показники якості коксу та ПВП; графіки динаміки зміни газодуттєвих параметрів; графіки зміни рудного навантаження; графіки зміни вмісту кремнію та температури чавуну; графіки зміни температур периферійного газового потоку та колошикового газу; система завантаження та склад подач. Крім того, система генерує рекомендації при тих чи інших

відхиленнях технології: при зміні якості коксу та ПВГ; при відхиленнях від базового діапазону зміни теоретичної температури горіння та параметрів, що її визначають; при некоректній зміні рудного навантаження та ін. При неправильних діях персоналу система сигналізує необхідність здійснення коригуючих дій.

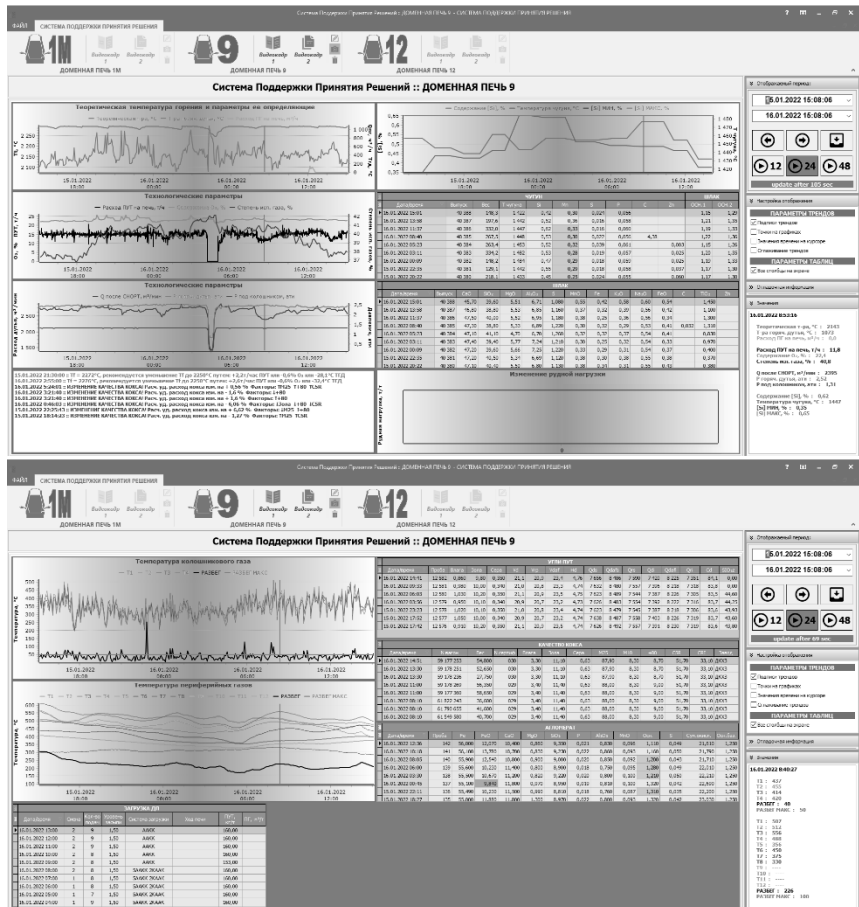


Рисунок 1 – Screenshots СППР щодо стабілізації теплового стану ДП.

Друга СППР яка реалізується у 2021–2022 рр. в ДЦ в комплексі з системою автоматизованого контролю розподілу дуга по повітряних фурмах дозволить здійснювати коригувальні дії щодо забезпечення

насамперед рівномірного розподілу теплового стану фурменої зони по окружності ДП за показником теоретичної температури горіння. Нерівномірність розподілу дуття за повітряними фурмами ДП характерна для умов змінної якості залізородної сировини та коксу, незадовільного стану повітропроводу гарячого дуття, зміни витрат паливних добавок, заростання фурм шлаком, зупинки вдування паливних добавок на кілька фурм [19-21]. Ці фактори призводить до нерівномірного розподілу теоретичної температури горіння по окружності ДП, зниження коефіцієнта заміни ПВП, низького ступеня використання теплової енергії газу по шахті ДП. Для запобігання шкідливого впливу зазначених факторів з метою зниження витрати коксу та збільшення виробництва чавуну доцільним є встановлення систем автоматизованого контролю розподілу дуття за повітряними фурмами ДП [19-21].

Сутність контролю розподілу дуття полягає у визначенні витрат дуття по кожній фурмі пропорційно тепловим навантаженням, які вимірюються на водоохолоджуваних елементах фурмених приладів. В результаті досліджень ІЧМ при використанні в дутті природного газу, де в якості калориметра виступало водоохолоджуване сопло, було встановлено тісний зв'язок між тепловими навантаженнями на водоохолоджувані елементи фурмених приладів і нерівномірністю розподілу дуття, виміряного іншими способами, тобто доведено, що кількість теплоти, що втрачається на водоохолоджуючих елементах фурмених приладів, однозначно залежить від кількості фізичної теплоти і газодинамічного режиму руху дуття, що приходить на повітряну фурму [23-25]. В останні роки доведено, що в ролі калориметра можуть виступати водоохолоджувані фланці підвішених (рухомих) колін (рис. 2), оскільки сопла не мають охолодження [19-21].

Передумовою реалізації автоматизованої системи контролю розподілу дуття по повітряних фурмах включно з відповідною СППР з'явилася, в першу чергу, можливість установки з вдування ПВП на металургійному виробництві ПрАТ «ДКХЗ» у відсотковому співвідношенні регулювати витрату ПВП на окремих повітряних фурмах і тим самим забезпечувати окружну рівномірність параметрів дуттєвого режиму. Слід зазначити, що ця опція установки вдування ПВП в Україні є лише на цьому металургійному підприємстві. По друге, виконані ІЧМ разом з ДЦ у 2018–2021 рр. виміри теплових навантажень на фланцях підвішених (рухомих) колін фурмених приладів, дозволили оцінити окружний розподіл теплового стану фурменої зони за показником теоретичної температури горіння і для її вирівнювання реалізувати спрямовану нерівномірність витрати ПВП [19-21]. В результаті визначення нерівномірності витрати дуття на досліджуваних ДП встановлено визначальний вплив конфігурації підводу тракту гарячого дуття в місці врізки в кільцевий трубопровід, що

призводить до утворення постійної зони зі зниженою витратою дуття на окремих повітряних фурмах.

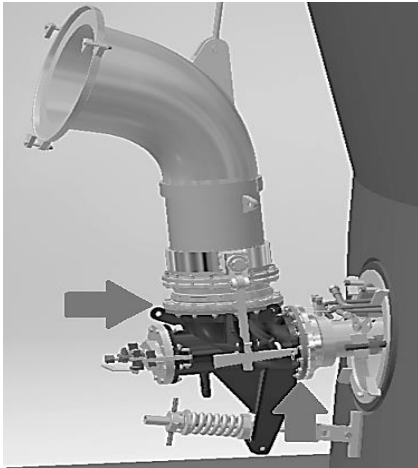


Рисунок 2 – Фурмений прилад ДП (чорним кольором показане підвішене рухоме коліно, стрілками – водоохолоджувані фланці).

На рис. 3 представлена ілюстрація фурмених осередків при ідеальному розподілі дуття (№1), характерному (робочому) для ДП ПрАТ «ДКХЗ» (№2) та при нерівномірності для ДП ПрАТ «ДКХЗ», що вимагає внесення коригуючих впливів (№3).

Ефективність тривалого дослідно-промислового впровадження спрямованої нерівномірності витрати ПВП по окружності доменних печей з метою створення рівномірного окружного розподілу теоретичної температури горіння, складала: на ДП №12 – 2,2% економії приведеної витрати коксу при зменшенні на 12% СКО вмісту кремнію в чавуні на випуску та на ДП №1М – 2,9% економії питомої витрати коксу при зменшенні температури периферійного газового потоку на 100–120 °С. При цьому ефективність впровадження нерівномірності розподілу ПВП на ДП №12 спостерігалась при роботі з кількістю ПВП в дутті до 120 кг/т чавуну [20-21], що в тому числі, сприяло в подальшому впровадити за рекомендацією ІЧМ збільшення діаметру повітряних фурм від 140 до 150 мм.

Слід зазначити, що заходи щодо вирівнювання теплового стану фурмених зон по окружності ДП без використання автоматизованої системи вимагають щонайменше щодобового проведення контрольних вимірів теплових навантажень на водоохолоджуваних елементах фланців підвішених (рухомих) колін фурмених приладів. Однак, при здійсненні таких вимірів суттєво знижується достовірність результатів, а саме: при

використанні наявних у ДЦ метрологічних засобів; під час проведення вимірів у нестационарних періодах роботи (порушення сходу шихти, зміщення графіка випусків продуктів плавки та ін.); в умовах неможливості вимірів на газонебезпечних ділянках та при корозійному зносі трубок охолодження; при проведенні вимірів різними бригадами водопровідників та майстрів ДЦ (людський фактор).

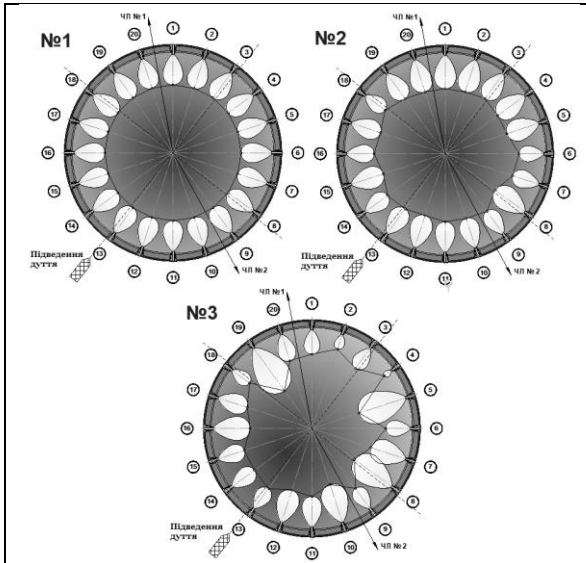


Рисунок 3 –
Фурмени осередки
для трьох варіантів
розподілу дуття на
ДП № 1М МП ПрАТ
«ДКХЗ». 1...20 –
повітряні фурми,
ЧЛ №1, №2 –
чавунні льотки.

Для ефективного контролю розподілу дуття по повітряним фурмам доменної печі і подальшої зміни розподілу ПВП по окружності печі з метою вирівнювання або створення заданої нерівномірності теоретичної температури горіння здійснюється впровадження системи автоматизованого контролю, яка включає установку на кожний фурменний прилад витратоміра води, що надходить на охолоджувані елементи фланців підвищеного (рухомого) коліна фурменого приладу, термоміри на ділянці зливного трубопроводу після охолодження і СППР яка включає візуалізацію первинної інформації щодо розподілу по окружності ДП витрат паливального палива та теплових навантажень; розрахункової інформації щодо розподілу по окружності ДП фактичної теоретичної температури горіння, витрат та швидкості дуття, геометрії фурмених осередків та блок генерації рекомендацій щодо коригування витрат паливних добавок на окремих фурмах для вирівнювання розподілу теоретичної температури горіння, сигналізацію щодо наявності т.зв.

«зашлакованості» фурм, в разі необхідності рекомендації щодо зміни діаметрів повітряних фурм, тощо.

Третя СППР (прийнята на МП ДКХЗ назва: «Експертний модуль»), яка реалізується у 2021–2022 рр. в ДЦ в комплексі з встановленням засобів вимірювання температур газового потоку над поверхнею засипу шихтових матеріалів (термозондів) дозволить обґрунтовано та своєчасно коригувати параметри режиму завантаження [2, 7, 12, 19, 26-32].

В останні роки для оцінки розподілу інтенсивності газового потоку все ширше застосовуються термозонди, які встановлюють над поверхнею засипу шихти в доменній печі (рис. 4). Важливими перевагами термозондів є безперервний вимір розподілу температури газів, що дозволяє використовувати інформацію, що отримується з їх допомогою, для оцінки та коригування режиму завантаження ДП [2, 7, 27], експлуатаційна надійність та довговічність, низька вартість конструкції. Недоліками термозондів є зміна показань при зміні рівня засипу внаслідок перемішування та відхилення газового потоку, зниження значень температур під впливом холодоагенту, а також формування поглиблень поверхні шихти під термозондами. Зазначені недоліки є несуттєвими, оскільки аналіз динаміки зміни температур у часі та оцінка зміни відносних величин, а не абсолютних, досить об'єктивно дозволяють виявити вплив тих чи інших параметрів режиму завантаження на зміну конфігурації температурного поля та визначити допустимі граничні температури (рис. 5), які відповідають високим техніко-економічним показникам доменної плавки.



Рисунок 4 – Встановлення термозондів на ДП-9 МП ДКХЗ.

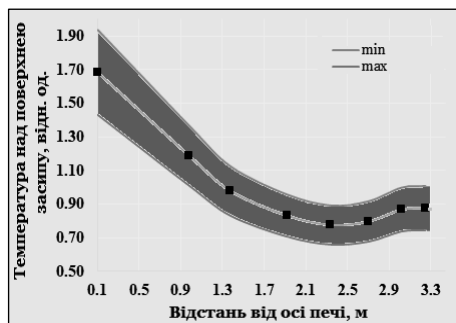


Рисунок 5 – Приклад допустимих граничних температур при використанні системи завантаження ААКК.

Функціонування СППР щодо управління режимом завантаження з використанням показань термозондів має наступну алгоритмічну

структуру. На першому етапі здійснюється формування т.зв. еталонної бази даних, що включає технологічні параметри та показники плавки, режими завантаження ДП (показники та системи завантаження) з відповідними розподілами температур над поверхнею шихти. Тобто для всього переліку режимів завантаження, які використовуються на ДП, виконується «прив'язка» кривих розподілу середньодобових температур над поверхнею шихти по радіусах колошника, які відповідають мінімальній витраті коксу та максимальній продуктивності ДП. Далі здійснюється формування критеріїв впливу параметрів завантаження ДП: системи завантаження, рівня засипу, об'ємів коксу і залізозмісних матеріалів, режимів роботи розподільника шихти по окружності на форму кривих розподілу температур над поверхнею шихти, тобто на зміну температур у кожній точці за радіусами печі.

На наступному етапі здійснюється порівняння фактичних даних роботи печі з «еталонною» базою даних та визначення відхилень розподілу температур газів над поверхнею шихти. Пошук рішень для наближення відхилень до «еталонної» бази даних здійснюється з використанням методів прямої та ітераційної оптимізації. Метод прямої оптимізації полягає у пошуку в базі даних найкращих параметрів завантаження ДП, що відповідають еталонному розподілу температур. Метод ітераційної оптимізації полягає у генерації подальших коригувальних змін одного або декількох параметрів завантаження ДП до максимального наближення розподілу температур до еталонного.

Крім цього, методи оптимізації включають: безперервне навчання аналітичного блоку СППР статистичною інформацією про роботу ДП, включаючи техніко-економічні показники та інформацію всієї наявної на ДП вимірювальної апаратури; накопичений досвід вивчення взаємозв'язків розподілу шихтових матеріалів та газів на колошнику; відомі положення теорії та практики завантаження ДП про вплив параметрів завантаження на економічність плавки та продуктивність печі.

Висновки

Розроблені ІЧМ системи підтримки прийняття рішень, які реалізовані ІЧМ або пройшли дослідно-промислове випробування у складі АСУ доменного цеху металургійного виробництва ПрАТ «ДКХЗ» дозволяють значно підвищити рівень автоматизації виробництва, а своєчасна інформаційна підтримка і рекомендації з прийняття рішень дозволяють в інтерактивному режимі здійснювати коригування процесу і, як наслідок, забезпечувати енергоефективність процесу за рахунок мінімізації кількості перехідних періодів та розладів ДП.

Перелік посилань

1. Semenov Yu. S., Shumelchik E. I., Vishnyakov V. I., Nasledov A. V., Semion I. Yu., Zubenko A. V. Model system for selecting and correcting charging programs for blast furnaces equipped with a bell-less charging apparatus. *Metallurgist*. 2013. Vol. 56. Issue 9-10. P. 652-657.
2. Semenov Yu. S., Shumelchik E. I., Horupakha V. V. Expert Module of the Thermal Probe System for Blast Furnace Charging Control. *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48. No. 12. P. 802-806.
3. Semenov Yu. S., Shumelchik E. I., Horupakha V. V. Blast Furnace Shaft Thermal State Monitoring System. *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. No. 11. P. 728-731.
4. Ivancha N. G., Murav'eva I. G., Shumel'chik E. I., Vishnyakov V. I., Semenov Yu. S. Complex Mathematical Model of the Distribution of Multicomponent Charge in a Blast Furnace. *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. Issue 1-2. P. 95-100.
5. Gasparini V. M., Andrade de Castro L. F., Bitarães Quintas A. C. Thermo-chemical model for blast furnace process control with the prediction of carbon consumption. *Journal of Materials Research and Technology*. 2017. Vol. 6. Issue 3. P. 220-225.
6. Agrawal A., Agarwal M. K., Kothari A. K., Mallick S. A mathematical model to control thermal stability of blast furnace using proactive thermal indicator. *Ironmaking & Steelmaking*. 2017. Vol. 46. Issue 2. P. 133 – 140.
7. Семенов Ю. С., Шумельчик Е. И., Горупаха В. В. Діагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах. Дніпро : Домінанта Прінт, 2018. 260 с.
8. Agrawal A., Kothari A. K., Kumar A., Kumar S. M., Kumar D. S., Ramna R. V. et al. Advances in thermal level measurement techniques using mathematical models, statistical models and decision support systems in blast furnace. *Metallurgical Research and Technology*. 2019. Vol. 116, 421. P. 16. <https://doi.org/10.1051/etal/2019019>
9. Zhang R., Lu J., Zhang G. A knowledge-based multi-role decision support system for ore blending cost optimization of blast furnaces. *European Journal of Operational Research*. 2011. Vol. 215. Issue 1. P. 194-203.
10. Wright B. D., Zulli P. Application of decision support system for thermal balance control in the ironmaking blast furnace. Chemeca 2011: Engineering a Better World: Sydney Hilton Hotel, NSW, Australia, 18-21, September 2011. P. 9.
11. Lavrov V. V., Spirin N. A., Gurin I. A., Rybolovlev V. Yu., Krasnobaev A. V. Software for decision-making support in blast-furnace operation. *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. No. 8. P. 538-543. <https://doi.org/10.3103/S0967091217080071>.
12. Semenov Yu. S., Podkorytov A. L., Shumelchik E. I., Horupakha V. V., Semion I. Yu., Orobtshev A. Yu. Decision Support System for Controlling Thermal State of Blast Furnace Smelting. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51. No. 4. P. 261-266. <https://doi.org/10.3103/S0967091221040094>.
13. Товаровский И. Г. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки. Днепропетровск : Журфонд, 2015. 912 с.
14. Ивко В. В., Крупий В. Г., Руденко Ю. Р. и др. Анализ эффективности

- применения промывочных материалов для борьбы с загромождениями горнов доменных печей. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 3. С. 17–19.
15. Kurunov I. F., Bol'shakova O. G. Briquets for washing blast furnaces. *Metallurgist*. 2007. Vol. 51. Issue 5-6. P. 253-261. <https://doi.org/10.1007/s11015-007-0048-7>
 16. Kurunov I. F., Shcheglov E. M., Emel'yanov V. L., Titov V. N., Bol'shakova O. G. Washing the hearth of blast furnaces with briquets made from scale. *Metallurgist*. 2007. Vol. 51. Issue 5-6. P. 306-311. <https://doi.org/10.1007/s11015-007-0057-6>.
 17. Semenov Yu. S., Horupakha V. V., Shumelchik Ye. I. Measures for Preventing Disruption in the Blast Furnace Operation under Use of Pulverized Coal. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50. No. 2. P. 100-106. <https://doi.org/10.3103/S0967091220020096>
 18. Семенов Ю. С., Горупаха В. В., Ващенко С. В., Худяков А. Ю., Шумельчик Е. И. Реализация комплекса промывок доменных печей при вдувании ПУТ и использовании шихтовых материалов переменного качества. *Черная металлургия : Бюл. НТИ*. 2021. № 12. С. 1239–1252. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-12-1239-1252>
 19. Семенов Ю.С., Подкоритов О.Л., Горупаха В.В. та ін. Нові наукові і прикладні результати досліджень ефективності використання пиловугільного палива при виробництві чавуну і випалі вапняку. *Метал та лиття України*. 2020. № 2. С. 15 – 26. <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.02.015>
 20. Семенов Ю. С., Горупаха В. В., Семион И. Ю. и др. Эффективность реализации окружной неравномерности распределения ПУТ по воздушным фурмам доменной печи. *Черные металлы*. 2019. № 10. С. 11–16.
 21. Semenov Yu. S., Horupakha V. V., Shumelchik E. I., Alter M. A. 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, P. 184–192. <https://doi.org/10.33313/382/018>
 22. Semenov Yu. S., Gorupakha V. V., Kuznetsov A. M. et al. Experience of Using Manganese-Containing Materials in Blast-Furnace Charge. *Metallurgist*. 2020. Vol. 63. Iss. 9-10. P. 1013–1023. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00920-1>.
 23. Канаев В. В., Кобеза И. И., Бузоверя М. Т. и др. Контроль распределения дутья по воздушным фурмам доменной печи. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1995. № 2. С. 69–71.
 24. Bol'shakov V. I., Shuliko S. T., Kanaev V. V. et al. Investigation of gas Distribution in a Large–Volume Blast Furnace. *Steel in Translation*. 1999. T. 29. № 12. P. 1–5.
 25. Bol'shakov V. I., Shuliko S. T., Kanaev V. V. et al. Study of the charge and gas–flow distributions in a large blast furnace with a bell-less charging apparatus. *Metallurgist*. 1997. Vol. 41. Iss. 12. P. 389–390.
 26. Bolshakov V. I., Semenov Yu. S., Kuznetsov A. M. The Experience of the Implementation of Modern Blast Furnace Equipped with Bell-Less Top Charging Device under Conditions of Changing Quality of Charge Materials. *Metallurgical and Mining Industry*. 2013. Vol. 5. No. 2. P. 56–64.
 27. Semenov Yu. S., Shumelchik E. I., Horupakha V. V. et al. Using Thermal Probes to

- Regulate the Batch Distribution in a Blast Furnace with Pulverized-Coal Injection. *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. No. 6. P. 389–393.
28. Semenov Yu. S., Shumel'chik E. I., Gorupakha V. V. Efficient Management of the Charging of Blast Furnaces and the Application of Contemporary Means of Control Over the Variable Technological Conditions. *Metallurgist*. 2018. Vol. 61. Iss. 11–12. P. 950–958. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0591-4>
 29. Semenov Yu. S. Temperature Distribution of the Gas Flux in Blast Furnaces. *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. No. 7. P. 473–477. <https://doi.org/10.3103/S0967091217070117>
 30. Shumelchik Ye., Semenov Yu., Horupakha V. et al. Model-Based Decision Support System for the Blast Furnace Charge of Burden Materials. *Applied Condition Monitoring*. 2021. P. 340–351. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82110-4_18.
 31. Семенов Ю. С. Разработка и реализация новых подходов к диагностике и управлению доменной плавкой. *Черная металлургия. Бюл. НТИ*. 2020. № 2. С. 123–131. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-2-123-131>
 32. Семенов Ю. С. Использование информации термозондов для управления загрузкой доменной печи. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2018. № 7. С. 208–215.

References

1. Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Vishnyakov V.I., Nasledov A. V., Semion I. Yu., Zubenko A.V. (2013). Model system for selecting and correcting charging programs for blast furnaces equipped with a bell-less charging apparatus. *Metallurgist*, 2013, Vol. 56, 9-10, 652-657. <https://doi.org/10.1007/s11015-013-9630-3>.
2. Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Horupakha V.V. (2018). Expert Module of the Thermal Probe System for Blast Furnace Charging Control. *Steel in Translation*, 2018, Vol. 48, 12, 802-806. <https://doi.org/10.3103/S0967091218120136>.
3. Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Horupakha V.V. (2017). Blast Furnace Shaft Thermal State Monitoring System. *Steel in Translation*, 2017, Vol. 47, 11, 728-731. <https://doi.org/10.3103/S0967091217110092>.
4. Ivancha N.G., Murav'eva I.G., Shumel'chik E.I. et al. (2018) Complex Mathematical Model of the Distribution of Multicomponent Charge in a Blast Furnace. *Metallurgist*, 2018, Vol. 62, 1-2, 95-100. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0630-1>.
5. Gasparini V.M., Andrade de Castro L. F., Bitarães Quintas A. C. (2017). Thermochemical model for blast furnace process control with the prediction of carbon consumption. *Journal of Materials Research and Technology*, 2017, Vol. 6, 3, 220-225. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.12.001>.
6. Agrawal A., Agarwal M.K., Kothari A.K., Mallick S. (2017). A mathematical model to control thermal stability of blast furnace using proactive thermal indicator. *Ironmaking & Steelmaking*, 2017, Vol. 46, 2, 133-140. <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1353765>.
7. Semenov Yu.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]*. Dnipro: Dominanta Print, 2018. 260 p. [In Ukrainian].

8. Agrawal A., Kothari A.K., Kumar A., Kumar S.M., Kumar D.S., Ramna R.V. et al. (2019). Advances in thermal level measurement techniques using mathematical models, statistical models and decision support systems in blast furnace. *Metallurgical Research and Technology*, 2019, Vol. 116, 421, 16. <https://doi.org/10.1051/metal/2019019>.
9. ZhangMR., Lu J., Zhang G. (2011). A knowledge-based multi-role decision support system for ore blending cost optimization of blast furnaces. *European Journal of Operational Research*, 2011, Vol. 215, 1, 194-203. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.05.037>.
10. Wright B.D., Zulli P. (2011). Application of decision support system for thermal balance control in the ironmaking blast furnace. *Chemeca 2011: Engineering a Better World*: Sydney, Australia, 18 – 21, September 2011. (p.p. 9).
11. Lavrov V.V., Spirin N.A., Gurin I.A., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V. (2017). Software for decision-making support in blast-furnace operation. *Steel in Translation*, 2017, Vol. 47, 8, 538-543. <https://doi.org/10.3103/S0967091217080071>.
12. Semenov Yu.S., Podkorytov A.L., Shumelchik E.I., Horupakha V.V., Semion I.Yu., Orobtssev A.Yu. (2021). Decision Support System for Controlling Thermal State of Blast Furnace Smelting. *Steel in Translation*, 2021, Vol. 51, 4, 261-266. <https://doi.org/10.3103/S0967091221040094>.
13. Tovarovskii I.G. (2015). *Poznanie protsessov i razvitiye tekhnologii domennoi plavki [Understanding and Development of Blast Furnace Smelting Technology]*. Dnepropetrovsk: Zhurfond, 2015. 912 p. [In Russian].
14. Ivko V.V., Krupii V.G., Rudenko Yu.R. et al. (2009). Analiz effektivnosti primeneniya promyvochnykh materialov dlya bor'by s zagromozhdeniyami gornov domennykh pechey [Analysis of the effectiveness of flushing materials for fight against cluttering the hearth of blast furnaces]. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost [Metallurgical and mining industry]*, 2009, 3, 17-19. [In Russian].
15. Kurunov I.F., Bol'shakova O.G. (2007). Briquets for washing blast furnaces. *Metallurgist*, 2007, Vol. 51, 5-6, 253-261. <https://doi.org/10.1007/s11015-007-0048-7>.
16. Kurunov I.F., Shcheglov E.M., Emel'yanov V.L., Titov V.N., Bol'shakova O.G. (2007). Washing the hearth of blast furnaces with briquets made from scale. *Metallurgist*, 2007, Vol. 51, 5-6, 306-311. <https://doi.org/10.1007/s11015-007-0057-6>.
17. Semenov Yu.S., Horupakha V.V., Shumelchik Ye.I. (2020). Measures for Preventing Disruption in the Blast Furnace Operation under Use of Pulverized Coal. *Steel in Translation*, 2020, Vol. 50, 2, 100-106. <https://doi.org/10.3103/S0967091220020096>.
18. Semenov Yu.S., Horupakha V.V., Vashchenko S.V., Khudyakov O.Yu., Shumelchik Ye.I. (2021). Realyzatsyya kompleksa promyvok domennykh pechey pry vduvanyy PUT y yspolzovanyy shyktovykh materiyalov peremennoho kachestva [Accomplishment of complex of ablation of blast furnaces at PC injection and usage of charge materials of variable quality]. *Chernaya metallurhiya. Byul. NTY [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information]*, 2021, Vol. 77, 12, 1239-1252. [In Russian]. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-12-1239-1252>.

19. Semenov Yu.S., Podkorytov O.L., Horupakha V.V. et al. (2020). Novi naukovi i prykladni rezultaty doslidzhen efektyvnosti vykorystannya pylovuhilnoho palyva pry vyrobnytstvi chavunu i vypali vapnyaku [New scientific and applied results of studies efficiency use of pulverized coal in the production of cast iron and lime burning]. *Metal ta lyttya Ukrayiny [Metal and casting of Ukraine]*, 2020, 2, 15-26. <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.02.015>. [In Ukrainian].
20. Semenov Yu.S., Horupakha V.V., Semion I.Yu. et al. (2019). Effektivnost' realizatsii okruzhnoy neravnomernosti raspredeleniya PUT po vozdushnym furmam domennoy pechi [Effectiveness of implementation of the circumferential uneven pulverized coal distribution on the blast furnace air tuyeres]. *Chernye Metally [Ferrous metals]*, 2019, 10, 11-16. [In Russian].
21. 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 (p.p. 184-192). <https://doi.org/10.33313/382/018>.
22. Semenov Yu.S., Gorupakha V.V., Kuznetsov A.M. et al. (2020). Experience of Using Manganese-Containing Materials in Blast-Furnace Charge. *Metallurgist*, 2020, Vol. 63, 9-10, 1013-1023. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00920-1>.
23. Kanaev V.V., Kobeza I.I., Buzoverya M.T. et al. (1995). Kontrol' raspredeleniya dut'ya po vozdushnym furmam domennoy pechi [Control of blast distribution on air blast furnace tuyeres]. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost' [Metallurgical and mining industry]*, 1995, 2, 69-71. [In Russian].
24. 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*, 1999, Vol. 29, 12, 1-5.
25. 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*, 1997, Vol. 41, 12, 389-390.
26. Bolshakov V.I., Semenov Yu.S., Kuznetsov A.M. (2013). The Experience of the Implementation of Modern Blast Furnace Equipped with Bell-Less Top Charging Device under Conditions of Changing Quality of Charge Materials. *Metallurgical and Mining Industry*, 2013, Vol. 5, 2, 56-64.
27. Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Horupakha V.V. et al. (2017). Using Thermal Probes to Regulate the Batch Distribution in a Blast Furnace with Pulverized-Coal Injection. *Steel in Translation*, 2017, Vol. 47, 6, 389-393. <https://doi.org/10.3103/S0967091217060092>.
28. Semenov Yu.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*, 2018, Vol. 61, 11–12, 950-958. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0591-4>.
29. Semenov Yu.S. (2017). Temperature Distribution of the Gas Flux in Blast Furnaces. *Steel in Translation*, 2017, Vol. 47, 7, 473-477. <https://doi.org/10.3103/S0967091217070117>.
30. Shumelchik Ye., Semenov Yu., Horupakha V. et al. (2021). Model-Based Decision

Support System for the Blast Furnace Charge of Burden Materials. *Applied Condition Monitoring*, 2021, 340-351. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82110-4_18.

31. Semenov Yu.S. (2020). Razrabotka i realizatsiya novykh podkhodov k diagnostike i upravleniyu domennoy plavkoy [Elaboration and realization of new approaches to diagnostic and control of blast furnace heat]. *Chernaya metallurgiya. Byul. NTI [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information]*, 2020, Vol. 76, 2, 123-131. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-2-123-131>. [In Russian].
32. Semenov Yu.S. (2018). Ispol'zovaniye informatsii termozondov dlya upravleniya zagruzkoy domennoy pechi [Using of thermal probes information to control blast furnace charging]. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost [Metallurgical and mining industry]*, 2018, 7, 208-215. [In Russian].

Yu. S. Semenov, Ph.D., Senior Researcher, Head of Technological Equipment and Control Systems Department, ORCID: 0000-0003-2299-5742

E. I. Shumelchik, Ph.D., Ph.D. VTOSU, ORCID: 0000-0001-5350-6425

V. V. Horupakha, Researcher of Blast Furnace Ironmaking Department, ORCID: 0000-0003-0531-1871

S. V. Vashchenko, Ph.D., Senior Researcher of Technological Equipment and Control Systems Department, ORCID: 0000-0001-8344-961X

O. Yu. Khudyakov, Ph.D., Senior Researcher of Technological Equipment and Control Systems Department, ORCID: 0000-0002-6507-1120

K. P. Ermolina, Leading Engineer of Technological Equipment and Control Systems Department

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

I. Yu. Semion, Director of Technology and Quality

I. V. Chychov, Senior production Master in Technology

Metallurgical production of PrJSC "Dniprovskiy Coke Plant", Kamianske, Ukraine

INTRODUCTION OF DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR BLAST SMELTING CONTROL IN THE CONDITIONS OF METALLURGICAL PRODUCTION OF PRJSC "DNIPROVSKYI COKE PLANT"

Summery. The aim of the work is to increase the level of automation of blast furnace production through the development and implementation of new systems to support decision-making on the management of blast furnace smelting in changing technological and fuel conditions. The article presents a description of three decision support systems (DSS) in the mode of an adviser to the technological personnel of blast furnaces, which were implemented by the Iron and Steel Institute or underwent pilot testing as part of the automated control system of the blast furnace shop of the metallurgical production of

PrJSC "Dniprovskiy Coke Plant" (Kamianske). The first DSS for managing the thermal state was implemented in 2021, it includes the entire list of information necessary for personnel in a convenient and compact form, generates recommendations in case of technology deviations and, in case of incorrect actions of the personnel, signals the need for correct actions. The main recommendations of the system are to correct the raceway adiabatic flame temperature, coke consumption when its characteristics and ore load change. Using the system allows both reducing the specific coke consumption and preventing unplanned downtime. The second DSS for controlling the distribution of fuel additives over air tuyeres is based on information on thermal loads determined on water-cooled elements of tuyere tools. The main recommendations of the system are to adjust the amount of injected pulverized coal fuel on individual tuyeres in order to ensure a uniform distribution of the raceway adiabatic flame temperature around the circumference of the blast furnace and, as a result, the energy efficiency of blast furnace smelting. The third DSS for adjusting the parameters of the charging mode is based on information from the means of controlling the temperatures of the gas flow above the surface of the charge in the blast furnace. The functioning of this system is based on determining the reference curves for the distribution of the gas flow along the furnace radii, corresponding to the minimum consumption of coke and maximum productivity, and on the search for solutions by direct and iterative optimization methods, which allow, by adjusting the loading parameters, to ensure a rational distribution of charge materials and gas flow in the furnace.

Keywords: blast furnace, decision support systems, blast furnace control, thermal state, pulverized coal fuel, blast distribution, thermal probe, blast furnace charging system.

For citation: *Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Horupakha V.V., Vashchenko S.V., Khudyakov O.Yu., Ermolina K.P., Semion I.Yu., Chychoy I.V. Vprovadzhennya system pidtrymky pryynyattya rishen shchodo upravlinnya domennoyu plavkoyu v umovakh metalurhiynoho vyrobnytstva PrAT "DKHZ" [Introduction of decision support systems for blast smelting control in the conditions of metallurgical production of PrJSC "Dniprovskiy Coke Plant"]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]*, 2021, 35, 78-94. (In Ukrainian DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-78-94*

*Стаття надійшла до редакції збірника 01.12.2021 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування.
(Протокол засідання редакційної колегії
збірника № 4 від 22 грудня 2021 р.)*