

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.092

**МЕТОДОЛОГІЧНІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ЗАСАДИ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО УПРАВЛІННЯ РЕЖИМОМ ЗАВАНТАЖЕННЯ
ШИХТИ ТА РОЗПОДІЛОМ ДУТТЯ ПО ФУРМАХ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ**

Семенов Ю.С. [ORCID]

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ),

к.т.н., с.н.с, Україна

Анотація Представлені методологічні та інформаційні засади систем підтримки прийняття рішень (СППР) щодо управління режимом завантаження шихти та розподілом дуття по фурмах доменної печі. Створення представлених СППР складається з наступних етапів: розробка інформаційно-моделюючого модулю розподілу шихтових матеріалів при завантаженні доменних печей безконусним або конусним завантажувальним пристроєм; 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 доменної печі з відповідними техніко-економічними показниками доменної плавки, параметрами режиму завантаження та інформацією засобів контролю; використання методів прямої та ітераційної оптимізації; розробка методів та критеріїв, які дозволяють забезпечити синергетичну взаємодію функціонування СППР. Важливим етапом розробки СППР є апробація їх окремих складових та рекомендацій по управлінню доменною плавкою в реальних умовах виробництва.

Ключові слова. доменна піч, система підтримки прийняття рішень, режим завантаження, температури газового потоку, розподіл дуття, оптимізація

Вступ. Сучасні принципи автоматизації доменних печей у світовій практиці спираються на комплексне використання засобів автоматизованого контролю та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (СППР). Останні функціонують на основі математичних моделей і накопиченого експертного досвіду, забезпечуючи високу якість інформаційного супроводу виробництва з формуванням обґрунтованих рекомендацій. Методологічні засади СППР базуються 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 полягають у створенні такої сукупності та структури інформації СППР, яка сприяє найбільш ефективній взаємодії між системою та користувачем для досягнення ефективного результату. Аналіз літературних джерел показує певну кількість розробок в доменному виробництві як математичних моделей, модельних систем та систем моніторингу, так і СППР [1–6]. При цьому, як у вітчизняній практиці, так і у світовій, відсутні дані про розробку та впровадження СППР, які спрямовані на управління режимом завантаження шихтовими матеріалами та розподілом дуття по окружності ДП. В останні роки в ІЧМ розробляються методологічні та інформаційні засади двох СППР та методи, які дозволяють забезпечити синергетичну взаємодію функціонування цих СППР. Окремі модулі СППР вже впроваджені на виробництві або пройшли дослідну апробацію.

Основний матеріал. СППР щодо управління режимом завантаження ДП заснована на інформації про зміну температури газового потоку над поверхнею шихти у доменній печі у зв'язку із режимами завантаження та техніко-економічними показниками доменної плавки. Ця інформація безперервно реєструється чотирма стаціонарними термозондами у восьми контрольованих точках за радіусом ДП (засіб контролю для умов українських підприємств) [7]. Методологічний апарат даної СППР ґрунтується на поглибленні теоретичних положень про вплив параметрів завантаження на температурний газорозподіл в ДП, включно з набором апробованих емпіричних залежностей. Концепція розробки даної СППР передбачає створення репрезентативної бази даних (БД), що акумулює відомості про різні режими завантаження, техніко-економічні показники доменної плавки та відповідні їм температури газового потоку. Методологія управління СППР реалізується через синтез методів прямої та ітераційної оптимізації, спрямованих на вдосконалення режиму завантаження ДП [8].

СППР щодо управління режимом завантаження шихти включає три основних модуля:

1. Інформаційно-моделюючий модуль (ІММ) для ДП з безконусним [4] або конусним [5] завантажувальним пристроєм. ІММ містить необхідну для оцінки відповідних змін при застосуванні різних режимів завантаження ДП інформацію про структуру шарів шихти та розподіл шихтових матеріалів на колошнику ДП, визначення та візуалізацію показників розподілу по радіусу колошника, зокрема, рудних навантажень в рівних за площею кільцевих зонах колошника. Реалізація ІММ в АСУ ДП, навіть окремо від СППР [4, 5], дозволяє обмежити можливі варіанти вибору раціональних режимів завантаження ДП, обладнаної різними завантажувальними пристроями.

2. Експертний модуль (ЕМ) температур газового потоку. Аналіз інформації про зміну температур газового потоку над поверхнею шихти здійснюється шляхом безперервного визначення чотирьох температурних показників. Температурні показники розподілу газового потоку ($K_{1...4}$) визначаються за співвідношеннями температур в різних зонах перерізу ДП, та характеризують чотири основні характеристики температури газового потоку над поверхнею шихти – газопроникність периферійної, проміжної, центральної зон та осьової віддушини [8–10]. Зміна температурних показників має нестационарний характер, залежить від різноманітних технологічних факторів, тому з застосуванням методів статистичного аналізу техніко-економічних показників доменної плавки здійснюється визначення їх оптимальних діапазонів [8–10]. ЕМ включає розрахунок і відображення у вигляді графіків зміни $K_{1...4}$ та рекомендації щодо коригування режиму завантаження в режимі реального часу при стійкому виході одного або декількох показників розподілу з оптимального діапазону. Після чого здійснюється вибір скоригованої програми завантаження ДП з використанням ІММ.

3. Модуль генерації управляючих дій. Функціонування цього модулю має наступну алгоритмічну архітектуру. На першому етапі здійснюється формування еталонної БД, що включає технологічні параметри та показники плавки, режими завантаження ДП та відповідні їм температури газового потоку над поверхнею шихти. Для всієї сукупності режимів завантаження, які використовуються на ДП, визначається набір розподілів температур за

контрольованими радіусами колошника, ці температури повинні відповідати мінімальній витраті коксу та максимальній продуктивності ДП. Далі визначаються критерії впливу параметрів режиму завантаження ДП на форму кривих розподілу температур над поверхнею шихти. На наступному етапі здійснюється порівняння фактичних даних роботи ДП з еталонною БД та визначення відхилень розподілу температур газів над поверхнею шихти. Пошук рішень для наближення відхилень до еталонної БД здійснюється з використанням методів прямої та ітераційної оптимізації. Метод прямої оптимізації передбачає ідентифікацію в БД найкращих параметрів завантаження ДП, що відповідають еталонному розподілу температур. Метод ітераційної оптимізації полягає у циклічному варіюванні одного або декількох параметрів завантаження ДП, що дозволяє максимально наблизити розподіл температур до еталонного [8]. Рекомендації, згенеровані на основі методів оптимізації проходять етап узгодження з рекомендаціями ЕМ на основі динаміки зміни температурних показників. Модуль генерації управляючих дій включає також: динамічну актуалізацію СППР статистичною інформацією про роботу ДП, включаючи техніко-економічні показники та інформацію всієї наявної на ДП вимірювальної апаратури; відомі положення теорії та практики завантаження ДП про вплив параметрів завантаження на енергоефективність плавки та продуктивність ДП.

СППР щодо управління розподілом дуття по фурмах ДП заснована на інформації про зміну витрат дуття у часі для кожної окремої повітряної фурми ДП. Установа з вдування пилувугільного палива (ПВП) на металургійному виробництві ПрАТ «Камет-сталь» є єдиною в Україні (станом на 2014 р.), 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 [1, 11–13]. Основним показником, що характеризує окружний розподіл дуттєвих параметрів є теоретична температура горіння (у закордонній літературі прийнята назва RAFT – Raceway adiabatic flame temperature) у фурменому осередку на кожній окремо взятій повітряній фурмі. 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 (в даний час ручним способом) на водоохолоджуваних елементах (соплах) фурмених приладів [11]. В останні роки доведено, що в ролі калориметра можуть виступати водоохолоджувані фланці підвішених (рухомих) колін, оскільки сопла фурмених приладів в сучасних умовах не мають охолодження. При виконанні попередніх досліджень [11, 12] була доведена ефективність методу управління розподілу дуття по повітряних фурмах при проведенні ручним способом вимірювань теплових навантажень на фланцях підвішених колін фурмених приладів ДП ПрАТ «Камет-сталь».

Для впровадження комплексу системи управління автоматизованого розподілу дуття та відповідної СППР необхідна установка на кожен фурмений прилад витратоміра води, що надходить на фланці підвішеного коліна фурменого приладу та термопари на ділянці зливного трубопроводу після охолодження. СППР щодо управління розподілом дуття по повітряних фурмах, яка є інтелектуальною складовою системи управління автоматизованого розподілу дуття повинна містити як необхідний набір інформації для прийняття рішень щодо здійснення коригуючих дій, так і комплекс рекомендацій, що генерується при функціонуванні СППР.

Інформація 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 теоретичної температури горіння; сигналізацію щодо наявності т.зв. «зашлакованості» фурм; рекомендації щодо зміни діаметрів повітряних фурм.

Розробка цієї СППР також передбачає 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) двох 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 [13].

Висновки. Представлені методологічні та інформаційні засади розробки систем підтримки прийняття рішень щодо управління режимом завантаження шихти та розподілом дуття по фурмах доменної печі. Показано, що для створення систем підтримки прийняття рішень необхідні: розробка інформаційно-моделюючого модулю розподілу шихтових матеріалів в доменній печі; використання інформації сучасних засобів автоматизованого контролю з встановленням статистичних залежностей нових показників, створених 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; використання методів прямої та ітераційної оптимізації; розробка методів та критеріїв, які дозволяють забезпечити синергетичну взаємодію функціонування систем; апробація, як окремих складових систем підтримки прийняття рішень, так і комплексу рекомендацій по управлінню доменною плавкою в реальних умовах виробництва.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Y.S. Semenov, Y.I. Shumelchuk, V.V. Horupakha, 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>.
2. A.L. Chaika, V.V. Lebed, B.V. Kornilov, et al. (2021). Implementation of a Set of Long-Term and Energy-Saving Cast Iron Production Models in Blast Furnaces in Ukraine. Steel Transl., 51 (3), 201–204. <https://doi.org/10.3103/S0967091221030025>.

3. Yu.S. Semenov, A.L. Podkorytov, E.I. Shumelchik, et al. (2021). Decision Support System for Controlling Thermal State of Blast Furnace Smelting. *Steel Transl.*, 51 (4), 261–266. <https://doi.org/10.3103/S0967091221040094>.
4. Yu.S. Semenov, E.I. Shumelchik, V.I. Vishnyakov, 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>.
5. S. Vashchenko, Yu. Semenov, O. Khudyakov, 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/metal/2025095>.
6. Yu.S. Semenov, E.I. Shumelchik, V.V. Horupakha (2017). Blast Furnace Shaft Thermal State Monitoring System. *Steel Transl.*, 47 (11), 728–731. <https://doi.org/10.3103/S0967091217110092>.
7. Yu.S. Semenov. (2017). Temperature Distribution of the Gas Flux in Blast Furnaces. *Steel Transl.*, 47 (7), 473–477. <https://doi.org/10.3103/S0967091217070117>.
8. Yu. Semenov, Ie. Shumelchik, S. Vashchenko, 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>.
9. Y. Shumelchik, Y. Semenov, V. Horupakha, et al. (2022). Model-Based Decision Support System for the Blast Furnace Charge of Burden Materials. *Applied Condition Monitoring*, 18, 340–351 https://doi.org/10.1007/978-3-030-82110-4_18.
10. Yu.S. Semenov, E.I. Shumelchik, V.V. Horupakha. (2018). Expert Module of the Thermal Probes System for Blast Furnace Charging Control. *Steel Transl.*, 48 (12), 802–806 <https://doi.org/10.3103/S0967091218120136>.
11. Yu.S. Semenov, V.V. Horupakha, E.I. Shumelchik, M.A. Alter. (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>.
12. Yu.S. Semenov, A.L. Podkorytov, V.V. Horupakha, 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>.
13. V.V. Horupakha, Yu.S. Semenov, O.Yu. Khudyakov, 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>.

**METHODOLOGICAL AND INFORMATIONAL PRINCIPLES OF DECISION
SUPPORT SYSTEMS FOR CONTROLLING THE CHARGING MODE AND THE
BLOW DISTRIBUTION ACROSS THE BLAST FURNACE TUYERES**

Yu.S. Semenov

Abstract. *The methodological and informational principles of decision support systems (DSS) for controlling the charging mode and the blow distribution over the blast furnace tuyeres are presented. The creation of the presented DSS's consists of the following stages: development of an information modeling module for the distribution of charge materials when charging blast furnaces with a bell-less or bell-type charging device; use of information from modern automated control tools with the establishment of statistical dependencies of this information with blast furnace smelting indicators; creation of a representative database containing various blast furnace operating modes with the corresponding technical and economic indicators of blast furnace smelting, charging mode parameters and information from control tools; use of direct and iterative optimization methods; development of methods and criteria that allow ensuring synergistic interaction of the DSS's functioning. An important stage of DSS's development is the testing of their individual components and recommendations for blast furnace smelting management in real production conditions.*

Keywords: *blast furnace, decision support system, charging mode, gas flow temperatures, blast distribution, optimization*