

УДК 669.162.262.5:669.162.215

**М. Г. Іванча**<sup>1</sup>, с.н.с., ORCID 0000-0002-5366-9328**В. І. Вишняков**<sup>1</sup>, н.с., ORCID 0000-0002-5538-6962**І. Г. Муравйова**<sup>1,\*</sup>, д.т.н., п.н.с., ORCID 0000-0001-5926-7787**Л. І. Гармаш**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-6873-6685**В. Р. Щербачов**<sup>1</sup>, м.н.с., аспірант, ORCID 0000-0002-6734-0451**О. О. Білошапка**<sup>1</sup>, м.н.с., ORCID 0000-0003-3103-0512**К. П. Єрмоліна**<sup>1</sup>, пров. інж., ORCID 0000-0001-6819-9886*<sup>1</sup>Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України**\* Автор для листування [irinaturavyova@gmail.com](mailto:irinaturavyova@gmail.com)*

## МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА КОЛОШНИКУ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ У ТЕХНОЛОГІЧНІЙ ТА ДОСЛІДНИЙ ПРАКТИЦІ

**Анотація.** Підвищення ефективності використання відновлювальної здатності газів у доменній печі, оптимізація процесів шлакоутворення та наведення гарнісажу, формування раціональної конфігурації та розмірів пластичної зони і, як наслідок, покращення техніко-економічних показників плавки в цілому забезпечується, в першу чергу, за рахунок раціонального розподілу шихтових матеріалів на колошнику. Аналіз відомих методів розрахунку та математичних моделей розподілу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі, які використовуються у технологічній та дослідницькій практиці, показав, що математичне моделювання з використанням результатів експериментальних досліджень залишаються основним способом отримання інформації про розподіл шихтових матеріалів. Інструментальних засобів контролю розподілу компонентів шихти на теперішній час не існує. Особливістю відомих математичних моделей є те, що з їх використанням прогнозувався розподіл двох складових шихти – залізородної частини та коксу. Сучасні шихтові умови доменної плавки характеризуються значним розширенням сировинної бази і компонентного складу шихтових матеріалів, що завантажуються в доменну піч. При вивантаженні цих компонентів на поверхню залипає шар суміші, склад якої істотно відрізняється у різних зонах колошника. Відмінність у складах сумішей визначає відповідну відмінність високотемпературних властивостей залізородної частини шихти та властивостей розплавів по поперечному перерізу доменної печі. Аналіз раніше виконаних досліджень в області розробки математичних моделей та методів розрахунку характеристик розподілу показав, що значна частина робіт присвячена розподілу залізородної

© М. Г. Іванча, В. І. Вишняков, І. Г. Муравйова, Л. І. Гармаш, В. Р. Щербачов, О. О. Білошапка, К. П. Єрмоліна, 2026



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

та вуглецевмісної частин шихти в цілому, без оцінки розподілу компонентів, що входять до неї. У зв'язку з цим, особливу актуальність набувають задачі, вирішення яких направлене на створення комплексної математичної моделі завантаження доменної печі, яка включає моделі ряду процесів формування багатокомпонентних порцій шихтових матеріалів, рух їх за трактом завантаження та в робочому просторі доменної печі, а також розподілу на поверхні засипу.

**Ключові слова.** доменна піч, математичні моделі, багатокомпонентна шихта, розподіл компонентів в зонах.

**Посилання для цитування:** Методи розрахунку та математичні моделі розподілу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі, що застосовуються у технологічній та дослідній практиці / М. Г. Іванча, В. І. Вишняков, І. Г. Муравйова, Л. І. Гармаш, В. Р. Щербачов, О. О. Білошапка, К. П. Єрмоліна // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 290-319. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-019>

**Постановка проблеми.** Підвищення ефективності використання відновлювальної здатності газів у доменній печі, оптимізація процесів шлакоутворення та наведення гарнісажу, формування раціональної конфігурації та розмірів пластичної зони і, як наслідок, покращення техніко-економічних показників плавки в цілому забезпечується, в першу чергу, за рахунок раціонального розподілу шихтових матеріалів на колошнику [1]. Разом з інструментальними засобами контролю для оцінки розподілу шихтових матеріалів ШИРОКО використовуються математичні моделі, що пояснюються обмеженими можливостями використовуваних для цього технічних пристроїв. У роботі [2] представлено огляд відомих на момент публікації математичних моделей радіального розподілу шихти у доменних печах. Особливістю цих моделей було те, що з їх використанням прогнозувався розподіл двох складових шихти – залізорудної частини та коксу. Сучасні шихтові умови доменної плавки характеризуються значним розширенням сировинної бази і компонентного складу шихтових матеріалів, що завантажуються в доменну піч. До складу доменної шихти залучені вторинні ресурси, зокрема, що завантажуються у вигляді брикетів цільового призначення і відсіяних фракцій залізівмісних компонентів і коксу. При вивантаженні цих компонентів на поверхню засипу утворюється шар суміші, склад якої істотно відрізняється у різних зонах колошника. Відмінність у складах сумішей визначає відповідну відмінність високотемпературних властивостей залізорудної частини шихти та властивостей розплавів по поперечному перерізу доменної печі. Аналіз раніше виконаних досліджень в області розробки математичних моделей та методів розрахунку характеристик розподілу показав, що значна частина робіт присвячена розподілу залізорудної та вуглецевмісної частин шихти в

цілому, без оцінки розподілу компонентів, що входять до неї. У зв'язку з цим, особливу актуальність набувають задачі, вирішення яких направлене на створення комплексної математичної моделі завантаження доменної печі, яка включає моделі ряду процесів формування багатокомпонентних порцій шихтових матеріалів, рух їх за трактом завантаження та в робочому просторі доменної печі, а також розподілу на поверхні засипу. Така модель забезпечить можливість розрахункового отримання повного складу сумішей компонентів шихти у різних зонах колошника, що дасть можливість обґрунтованого корегування режиму завантаження для підвищення ефективності доменної плавки.

Для оцінки технологічного потенціалу, функціональних можливостей та визначення напрямків подальшого удосконалення виконано ретроспективний аналіз відомих розроблених математичних моделей розподілу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі.

**Мета роботи.** Узагальнення та систематизація результатів аналізу відомих методів розрахунку та математичних моделей розподілу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі.

**Основні результати досліджень.** Розподіл шихти має важливий вплив на теплообмін, масо-перенесення та хімічні реакції в доменних печах [3]. З 1970 - х років минулого століття для обґрунтованого управління ходом доменної печі вчені-металурги вивчають закономірності руху та розподілу шихти у її робочому просторі. З найбільш значущих слід виділити дослідження В. К. Грузинова. В роботі [4] він вперше системно проаналізував особливості формування шарів шихти на поверхні засипу, уточнив методику розрахунку траєкторій руху шихтових матеріалів після сходу з великого конусу. Результати наступних досліджень під керівництвом В. К. Грузинова представлені в роботах [5, 6].

До найбільш вагомих слід також віднести результати досліджень, виконаних М. М. Бабарікінім [7], В. М. Клемпертом, А. О. Гришковою [8], А. М. Похвісєвим, І. П. Куруновим, В. О. Доброскоком [9], В. І. Логіновим [10], В. П. Тарасовим [11].

Слід зазначити, що до останнього часу в математичних моделях процесів завантаження і розподілу шихтових матеріалів у доменній печі взагалі не розглядалися завантаження і розподіл будь-якого конкретного компонента, завантажуваного у складі залізородної або коксової частин подачі. Крім цього, з усього комплексу процесів формування порцій (подач) шихтових матеріалів (доставки їх на колошник, завантаження порцій у завантажувальний пристрій і вивантаження з нього, руху трактом завантажувального пристрою, зокрема, лотком, що обертається, вільного падіння потоку шихти в

колошниковому просторі до поверхні засипу, його взаємодії з наявним профілем і формування нового) у переважній більшості відомих моделей розглядали рух шихтових матеріалів трактом завантажувального пристрою, рух шихти у колошниковому просторі та формування поверхні засипу після вивантаження чергової порції (подачі). Відповідно, можливості цих моделей обмежувалися розрахунком траєкторій руху шихти в колошниковому просторі, визначенням геометричних характеристик профілю засипу та розрахунком розподілу мас паливної й сировинної складових у цілому за радіусом колошника з подальшим визначенням їх співвідношень (рудних навантажень) в умовно виділених кільцевих зонах колошника. До таких моделей можна віднести розроблену фахівцями «Nippon Kokkan Corporation» [12], де описані процеси низхідного руху шихти всередині чаші під час опускання великого конусу, зсипання шихтових матеріалів з чаші та подальше падіння в периферійну область на поверхню засипу, а також рух від периферії до центру печі з формуванням укусу та зміна форми поверхні при сході шихтових матеріалів. Імітаційна модель розподілу шихти на колошнику доменної печі, розроблена також дослідниками Японії [13], враховує додаткові фактори: утворення змішаного шару в центрі печі при вивантаженні руди на шар коксу, зменшення кута укусу під впливом газового потоку, зміну кута укусу за рахунок різниці швидкостей опускання шихти вздовж радіусу печі. Автори вважають, що на розподіл рудного навантаження найбільше впливає утворення змішаного шару.

В окремих напрямках досліджень розподілу матеріалів на колошнику доменної печі слід виділити математичні моделі, розроблені у Фінляндії з використанням нейронних мереж. В опублікованих роботах [14 - 16] представлена розроблена модель формування шару шихти у доменній печі, початковою інформацією якої є товщина шарів, що визначається за даними радіолокаційних вимірювань рівня шихти в печі. За результатами тестування моделі було зроблено висновки про можливість її використання у якості інструмента для оцінки зміни показників розподілу шихти - паливної частини шихти та рудного навантаження - у діючих печах. Розподіл окремих компонентів – складових, як рудної, так і паливної частин шихти, взагалі не розглядався.

Встановлення на доменних печах безконусних завантажувальних пристроїв (БЗП) з лотковим розподільником шихти (з середини сімдесятих років минулого століття) та необхідність вибору та обґрунтування режимів їх роботи для управління технологічними параметрами печі ініціювали початок активних досліджень, направлених на розробку математичних моделей руху шихтових

матеріалів по тракту завантажувального пристрою.

Крім ІЧМ, про що буде сказано нижче, дослідження процесу завантаження доменних печей, оснащених БЗП з лотковим розподільником, спрямовані на вивчення розподілу шихтових матеріалів, у тому числі, дослідження з використанням математичного моделювання, виконувалися у Дніпропетровському металургійному інституті під керівництвом В. М. Ковшова [17], А.К. Тараканова, Н. Ш. Грінштейна і В. В. Бочки [18, 19]. У роботі [17] В. М. Ковшовим представлено результати розроблення математичного опису руху шихти похилими поверхнями розподільних пристроїв - конуса, лотка, у колошниковому просторі та на поверхні засипу. Розроблена в НМетАУ математична модель завантаження печі лотковим завантажувальним пристроєм дозволяє отримувати кількісні характеристики розподілу залізорудної та коксової складових шихти по перетину печі [18, 19]. В якості вхідних параметрів моделі використовуються: вид матеріалів, що завантажуються; маса коксових та залізорудних порцій; насипна маса і кути укусу матеріалів; робочі кутові положення лотка; рівень засипу; швидкість опускання шихтових матеріалів по радіусу печі; число та розміри кільцевих зон, для яких визначаються кількісні характеристики розподілу шихти; число і послідовність порцій шихти в циклі; час завантаження порцій в піч; розміри колошника печі; основні розміри і характеристика режиму роботи завантажувального пристрою. Вихідними параметрами моделі є: значення рудних навантажень шихти в кільцевих зонах перетину колошника, профіль поверхні засипу матеріалів після завантаження циклу порцій, епіюра товщини шарів коксу і залізорудних матеріалів у вертикальному перетині печі для циклу порцій шихти.

Активні дослідження з розроблення математичних моделей руху шихтових матеріалів трактом БЗП виконували в Німеччині наприкінці минулого століття. Інтерес представляє робота Л. Кройца і Б. Бергмана [20], в якій наведено модель, що передбачає математичний опис руху частинок шихтових матеріалів лотковим розподільником і сходу матеріалів з кінця лотка, розрахунок траєкторій їхнього руху в колошниковому просторі, формування поверхні засипу, зокрема за бокових обмежень, що імітують стінку колошника печі. Низку вхідних параметрів моделі визначали на фізичній моделі колошника доменної печі з БЗП. Представлені результати експериментальних досліджень і розрахунків містять дані про формування потоку шихтових матеріалів на лотку та особливості укладання матеріалів на поверхні засипу. Л. Кройц, Х. В. Гуденау і Н. Штандіш досліджували асиметричність розподілу матеріалів на колошнику печі, викликану конструктивними особливостями БЗП з лотковим розподільником [21]. Досліджено різні

модифікації лоткового розподільника і запропоновано конструктивні рекомендації та технологічні заходи, що сприяють поліпшенню розподілу шихтових матеріалів.

На початку поточного століття роботи зі створення математичних моделей руху шихтових матеріалів трактом БЗП і в колошниковому просторі печі активізувалися в КНР [22 - 24, 26, 27]. У [22] показано важливість достовірного визначення траєкторії руху шихтових матеріалів після сходу з лотка і, відповідно, точки його падіння на поверхню засипу для подальшого розрахунку профілю, що формується. З метою уточнення алгоритму розрахунку траєкторій руху шихти в колошниковому просторі авторами виконано експериментальні дослідження на моделі доменної печі об'ємом 2500 м<sup>3</sup>, виконаної у масштабі 1:15. У [23] представлено математичну модель руху шихти після її сходу з лоткового розподільника з урахуванням сили Коріоліса та сили опору газу. За допомогою розробленої моделі було отримано та проаналізовано координати точок падіння шихти на поверхню засипу та ширину її потоку. Значення швидкостей частинок на розвантажувальному кінці лотка порівнювалися з урахуванням і без урахування сили Коріоліса. За допомогою розробленої моделі виконано також дослідження зі встановлення впливу довжини та крутного моменту лотка на дальність польоту частинки шихти в колошниковому просторі. Результати моделювання підтверджено вимірюваннями, виконаними на доменній печі з використанням лазерного далекоміра.

У роботі [24] за допомогою математичного моделювання розглядається вплив різної за перерізом печі швидкості опускання шихти на її розподіл на колошнику. Вплив швидкості опускання шихти в різних зонах колошника на формування шарів шихтових матеріалів на поверхні засипу за допомогою математичної моделі досліджувався також вченими Республіки Корея [25]. Огляд сучасних методів моделювання та контролю розподілу шихти на колошнику доменної печі наведено в роботі [26], де розглянуто особливості вивантаження шихтових матеріалів з паралельно встановлених бункерів БЗП, а також наведені рівняння руху частинок шихти лотковим розподільником і подальшого формування шарів на поверхні засипу з урахуванням витіснення коксу. У [27] розглянуто умови руху по лотках прямокутного і напівкруглого перерізу, показані сили, що діють на частинку, яка рухається лотком, та наведені рівняння її руху. Визначено траєкторії руху після сходження з лотка й отримано залежності для розрахунку координат точок зустрічі їх із поверхнею засипу. Достовірність моделі підтверджено результатами перед-пускових досліджень на доменній печі, під час яких виконано вимірювання цих координат за допомогою лазерних інструментів.

У роботах [28 - 39] також розглянуто розрахункові рівняння руху шихти лотковим розподільником, траєкторій її падіння в колошниковому просторі та характеристик шару, що формується на поверхні засипу. Модель, представлена в [29], містить рівняння траєкторії руху шихти після її сходу з лотка і залежності, що описують формування поверхні залежності з урахуванням фактичних значень кутів укосу матеріалів. У [30] розглянуто модель, що забезпечує можливість розрахунку траєкторій падіння шихти до падіння на поверхню засипу, оцінювання профілю поверхні, що формується, і розподілу рудних навантажень за радіусом колошника. Модель функціонує з використанням даних радіолокаційних вимірювачів, які контролюють рівень шихти в різних точках поверхні засипу, що підвищує точність розрахунків.

Підтвердження результатів моделювання формування шарів шихти може бути отримано шляхом вимірювання профілю поверхні засипу на діючій печі 3D-сканером, як це зроблено авторами роботи [31], в якій описано математичну модель розподілу шихти в доменній печі з БЗП. Призначення моделі - використання її в реальному часі для оперативного вибору програм завантаження шихти. Розрахункові можливості моделі, як і раніше розглянутих у [20 - 30], щодо характеристик розподілу шихти обмежуються визначенням розподілу рудних навантажень за радіусом печі.

Особливостями моделі, створеної з використанням методу кінцевих елементів і Visual Basic [33], є об'єднання двох розрахункових блоків, один з яких дає змогу визначити параметри траєкторій падіння шихти з урахуванням виду й маси порцій, коефіцієнта тертя шихти по лотку, швидкості обертання та кута нахилу лотка, а інший - призначений для розрахунку характеристик розподілу рудних навантажень за радіусом колошника. Значення коефіцієнтів рівнянь руху шихти були уточнені за результатами модельного експерименту. Модель формування поверхні засипу шихти, описана в роботі [34], відрізняється розробленням нових рівнянь утворення внутрішнього і зовнішнього укосів з урахуванням впливу вертикальної та горизонтальної швидкостей потоку шихти під час формування вершини шару на поверхні засипу. Підтвердження достовірності розрахунків сформованої поверхні за допомогою моделі також забезпечувалося шляхом порівняння розрахункових результатів з експериментальними даними.

Огляд досліджень закономірностей руху і розподілу шихти на колошнику доменної печі, виконаних вченими-металургами, починаючи з 1970-х років, наведено в [35]. Як правило, перші дослідження в цій області зводилися до експериментальних вимірювань координат точок траєкторій падіння шихти в колошниковому просторі

і характеристик профілю засипу, що утворюється. Визначення зазначених характеристик у низці випадків здійснювалося з використанням лазерних або радіолокаційних пристроїв. У роботі А. Ейджрвела [37] за допомогою розробленої математичної моделі виконано дослідження з узагальненням результатів у вигляді геометричних характеристик шарів і розподілу рудних навантажень по радіусу колошника доменної печі в умовах змінного вмісту окатишів у шихті, що впливає на хід доменної плавки. У низці публікацій, наприклад [38, 39], показано можливості розроблених математичних моделей завантаження шихти в частині досліджень процесів вибивання коксу, його перерозподілу під час вивантаження залізородного матеріалу на шар коксу та формування змішаних шарів цих матеріалів на поверхні засипу, а також вибору раціональних параметрів осьових порцій коксу та технологічних прийомів їхнього завантаження.

Серед оглядових публікацій можна виділити також роботу [40], в якій розглянуто тенденції розвитку моделювання, контролю та управління розподілом шихти в доменній печі. У цьому огляді розглянуто методи визначення розподілу рудного навантаження на колошнику доменної печі, що включають експериментальні дослідження за допомогою фізичних моделей, а також математичне моделювання з використанням методу дискретних елементів (DEM) і без застосування цього методу. Стрімкий розвиток комп'ютерних технологій забезпечив прогрес чисельного моделювання, зокрема, з використанням DEM, у розробленні моделей, які забезпечують розрахунок розподілу рудних навантажень і характеристик шарів шихтових матеріалів, що формуються на колошнику доменної печі.

Останніми роками на основі DEM активно виконуються дослідження, пов'язані з моделюванням явищ і взаємодій у сипучому середовищі, які чинять значний вплив на розподіл рудного навантаження на колошнику доменної печі під час завантаження шихтових матеріалів і розподіл характеристик газопроникності шарів шихтових матеріалів, що формуються. Докладний аналіз досліджень розподілу шихти в доменній печі за допомогою моделей, що базуються на застосуванні DEM, наведено в огляді [41]. На думку авторів, застосування DEM забезпечує кількісне визначення сил, що діють на кожен частинку, і, отже, можливість прогнозу просторово - часової еволюції зернистого потоку. Переваги DEM полягають у тому, що за його допомогою можна аналізувати, як параметри потоку сипучого матеріалу загалом, так і поведінку окремих частинок, що робить перспективним застосування цього методу не тільки для вивчення розподілу рудного навантаження, а й для дослідження характеристик газопроникності шару та його окремих зон. Початковими параметрами

моделей, створених на основі DEM, є морфологічні характеристики матеріалу (розподіл частинок за розмірами і формою), його міцнісні властивості (коефіцієнт Пуассона і модуль Юнга), параметри, що характеризують взаємодію частинок шихти (коефіцієнти відновлення і тертя, показники форми частинок і шорсткості їхньої поверхні). Отримання достовірних результатів за допомогою цієї моделі, що відображають фактичну поведінку матеріалу, спостережувану в експериментах, зумовлюється рівнем достовірності значень перерахованих вище вхідних параметрів, визначення яких у реальних умовах викликає великі труднощі.

У [42] наведено результати моделювання на основі DEM, де показано вплив швидкості руху частинок шихти на її розподіл на поверхні засипу і процес сегрегації за крупністю. Результати моделювання підтверджено експериментальними дослідженнями, під час яких встановлено, що розподіл кутової швидкості частинок у поперечному перерізі жолоба має U-подібний характер, тоді як розподіл швидкості поступального руху має вигляд опуклої кривої. У міру наближення до розвантажувального кінця лотка розподіл обох швидкостей стає більш рівномірним. Визначалися також ширина потоку і розподіл маси матеріалу в потоці. Результати досліджень дали змогу уточнити особливості формування шару шихти, що вивантажується на поверхню засипу, і розподіл крупності частинок у ньому.

В Японії за допомогою моделі, розробленої із застосуванням DEM, досліджено окружну нерівномірність шихти, що виникає під час вивантаження її з БЗП з двома паралельно встановленими бункерами, і показано її негативний вплив на стабільність роботи доменної печі [43]. Модель описує рух потоку частинок шихти в клапанному вузлі, центральній трубі та на лотковому розподільнику, що обертається, за різних кутів його нахилу. Моделювання показало, що причиною окружної нерівномірності є зміщення частинок шихти до стінок у центральній трубі, а ступінь окружної нерівномірності залежить від кута нахилу лотка. За допомогою моделі для зменшення окружної нерівномірності було розроблено рекомендації, щодо встановлення кінцевого вертикального жолоба.

На відміну від попередніх досліджень з використанням DEM, у яких здебільшого моделювали поведінку шихти з частинками сферичної форми, у [44] розглянуто шихту з несферичними частинками, що характерно для реальних шихтових матеріалів. Авторами виконано порівняльне дослідження впливу різної форми частинок на розподіл шихти в доменній печі.

Таким чином, аналіз раніше виконаних досліджень в області

розроблення математичних моделей і методів розрахунку характеристик розподілу шихтових матеріалів показав, що переважна більшість робіт [12 - 44] була присвячена розподілу залізорудної та вуглецевмісної частин шихти загалом, без оцінки розподілу компонентів, які до них входять.

Стійка тенденція підвищення вартості сировини і палива зумовлює роботу доменних печей у шихтових умовах, що безперервно змінюються і характеризуються використанням матеріалів зниженої якості, застосуванням багатокомпонентної шихти з одночасним використанням двох і більше видів кожного з основних компонентів (агломерату, окатишів і коксу), введенням до складу шихти некондиційних (відсіяних) фракцій шихтових матеріалів, а також використанням різних паливно-відновлювальних, гарнісажеутворюючих і промивних добавок [45, 46]. У доменному виробництві значного поширення набули технологічні прийоми введення різних нетрадиційних залізовмісних матеріалів (у тому числі, фракцій агломерату й окатишів, які відсіваються), паливних і вуглецевмісних добавок до складу шихти, які активно розроблялися В. І. Большаковим [1], В.О. Доброскоком, Й. Бухвальдером Е. Лонарді, С. Кьолером [47, 48], Л. Д. Нікітіним, С. Ф. Бугаєвим [49], Е. А. Шепетовським [50], С. Л. Ярошевським, В. О. Ноздрачовим, О. В. Кузіним [51, 52] та іншими. Як показано у вказаних роботах, удосконалення технології завантаження доменних печей шляхом пошуку й впровадження раціональних параметрів формування та режимів завантаження порцій багатокомпонентної шихти є перспективним напрямком скорочення споживання дефіцитних енергоносіїв і забезпечення необхідного рівня енергоефективності доменної плавки. Наприклад, практичний досвід введення окатишів у доменну шихту і результати численних досліджень, виконаних під керівництвом В.І. Большакова [1], засвідчили переваги завантаження їх в суміші з агломератом у вигляді змішаних порцій із заданою структурою, а також негативні наслідки роздільного завантаження цих компонентів. Результати раніше виконаних досліджень і досвід промислового випробування різних технологічних прийомів завантаження багатокомпонентної шихти показали, що змішування залізорудних шихтових матеріалів і коксу перед завантаженням у доменну піч, введення до складу шихти добавок потрібного призначення з утворенням на колошнику доменної печі змішаного шару шихтових матеріалів, а також введення відсіяних фракцій шихтових матеріалів до доменної шихти та завантаження їх у складі багатокомпонентних змішаних порцій є одним з найефективніших шляхів зменшення енергоємності доменної плавки та зниження

собівартості чавуну, за умови обґрунтованого вибору параметрів формування змішаних порцій шихти та режиму їх завантаження [1, 45 - 47].

Розподіл компонентів на поверхні засипу є результатом взаємодії низки процесів, що протікають на всіх стадіях формування порцій шихтових матеріалів, доставки їх на колошник і вивантаження в піч [46]. Залежно від способу доставки шихти на колошник формування порцій шихтових матеріалів здійснюється шляхом вивантаження компонентів шихти на конвеєр або в скіпи у визначеній послідовності та із заданим розподілом мас компонентів на підставі технологічних вимог до структури порції. У процесі формування багатокомпонентних порцій і їхнього завантаження в доменну піч унаслідок неодноразових перевантажень розташування компонентів в об'ємі порції істотно змінюється, компоненти змішуються, утворюються масиви незмішаних матеріалів і сумішей з різним складом. Внаслідок перерозподілу компонентів в об'ємі порції послідовність вивантаження компонентів з бункера БЗП істотно відрізняється від послідовності їхнього завантаження до бункера, тому поточний компонентний склад вихідного потоку шихти, яка надходить з бункера на розподільчий лоток, не визначено, що істотно знижує інформативність і технологічну цінність розрахунків розподілу шихтових матеріалів у доменній печі. У зв'язку з цим, на певному етапі ефективність використання багатокомпонентної шихти стримувалася відсутністю технічних засобів контролю та розрахункових інструментів оцінки розподілу компонентів у доменній печі, що зумовило актуальність розроблення математичних моделей, які б описували процеси завантаження багатокомпонентних порцій шихтових матеріалів до бункерів БЗП та вивантаження з них з можливістю визначення компонентного складу вихідного потоку впродовж усього часу вивантаження порції. У поєднанні з математичними моделями формування порцій, руху шихти трактом БЗП та по розподільчому лотку після виходу з бункера, польоту в колошниковому просторі та формування поверхні засипу, наявність таких даних забезпечує можливість подальшого розрахунку характеристик розподілу кожного компонента шихти на поверхні засипу, прогнозування складу сумішей шихтових матеріалів у різних зонах доменної печі та властивостей розплавів, які з них утворюються. Відповідно, з'являється можливість реалізації технологічних вимог до розподілу компонентів шихти, що забезпечують найраціональніші тепловий і газодинамічний режими, а також режими відновлення і шлакоутворення, що відповідають складу сумішей шихтових матеріалів у різних зонах доменної печі. Інформація про розподіл компонентів доменної шихти за періодом печі важлива не тільки для вибору або

оперативного корегування параметрів режимів роботи доменної печі, вона необхідна також для проведення аналітичних досліджень фізико-механічних і фізико-хімічних процесів, що протікають у ній. Для розв'язання зазначених завдань необхідне розроблення комплексної математичної моделі завантаження доменної печі, яку може бути створено як результат синтезу низки математичних моделей, що максимально можливо мірою враховують особливості руху багатокомпонентних порцій шихтових трактом «шихтоподача - поверхня засипу», і насамперед переміщення та перемішування масивів шихтових матеріалів у процесі формування порцій на головному конвеєрі, у скіпах, під час шлюзування їх у бункері БЗП і розподілення на поверхні засипу. Таким чином, комплексна математична модель має містити в собі окремі математичні моделі, що описують поведінку шихтових матеріалів:

- модель формування багатокомпонентних порцій шихти в системах завантаження з конвеєрною та зі скіповою доставкою шихти на колошник;

- модель завантаження багатокомпонентних порцій шихти в бункер БЗП, яка для систем зі скіповою доставкою шихти на колошник враховує, у тому числі, перерозподіл компонентів в об'ємі скіпа при повороті його в розвантажувальних кривих;

- модель розвантаження багатокомпонентних порцій шихти з бункера БЗП, що забезпечує розрахункове визначення змісту кожного компонента у вихідному потоці;

- модель руху шихтових матеріалів по тракту БЗП (у клапанному вузлі, центральній трубі та по лотковому розподільнику) та колошниковому простору;

- модель падіння багатокомпонентної шихти на поверхню засипу та розподілу на ній у вигляді формування шарів, що забезпечує розрахункове визначення компонентного складу шихти у заданій зоні колошника.

З перелічених моделей на поточний час нам не відомі моделі завантаження багатокомпонентних порцій шихти в бункер БЗП, що описують перерозподіл компонентів в об'ємі скіпа при повороті його в розвантажувальних кривих.

Відносно моделей розвантаження багатокомпонентних порцій шихти з бункера БЗП, слід зазначити, що до останнього часу існували лише одиночні приклади моделей, що забезпечували розрахункове визначення змісту кожного компонента у вихідному потоці. До них відносяться дослідження розподілу дрібного коксу, завантаженого у складі залізорудних порцій [53, 54], а також робота І. Мацуї, А. Сато, Т. Ояма, Т. Мацуо [55], яку слід зазначити, як таку, що містить вельми

цікаві, з погляду практики, результати. У ній наведені результати досліджень на масштабних фізичних моделях, що показують зміну вмісту окатишів, завантажених у складі залізорудної порції спільно з агломератом, у вихідному потоці з бункера і за радіусом колошника залежно від розташування дози окатишів у порції.

Обмежена кількість результатів досліджень розподілу окремих (виділених) компонентів шихти, пов'язана насамперед з тим, що математичний опис руху сипучих матеріалів, якими є шихтові матеріали доменного виробництва, завжди зустрічав значні труднощі. Це пояснюється специфічними властивостями сипучих матеріалів, що являють собою дискретне середовище з твердих частинок, поведінка якого в процесі руху в деяких проявах за певних умов може бути схожою з поведінкою рідин, але в більшості випадків підкоряється специфічним закономірностям, властивим лише сипучим середовищам.

Сучасні уявлення про закономірності витікання сипучих матеріалів сформувався на базі досліджень цього процесу протягом останніх 100 років. Незважаючи на великий обсяг виконаних до теперішнього моменту теоретичних і експериментальних досліджень, універсальна теорія процесу витікання сипучих матеріалів, що включає формалізований опис їхнього руху в бункерах, яка могла б знайти застосування до широкого класу сипучих матеріалів, не створена. Більш того, визначення предмета досліджень - сипучого матеріалу - формулюється різними дослідниками з істотними варіаціями щодо їхніх основних властивостей і ознак, що зумовлено відмінністю прикладних завдань, які стояли перед авторами досліджень.

Для опису процесу руху шихтових матеріалів у бункерах можуть бути використані три підходи, на базі яких на теперішній момент створено математичні моделі для конкретних об'єктів і отри-мано результати, прийнятні для практичного використання.

Перший базується на описі закономірностей витікання шихтового матеріалу у вигляді геометричних залежностей, що визначають об'єм зони активного руху матеріалу («фігури випуску»), форму якої визначають експериментально, та об'єми масивів сипучого матеріалу, які послідовно надходять надалі до зони активного руху матеріалу, а потім рухаються вертикально до випускного отвору бункера. При цьому однією з обов'язкових умов є рівність об'єму матеріалу, що надходить за одиницю часу в зону активного руху, і об'ємної витрати матеріалу, що вивантажується. Для врахування розпушення матеріалу всередині масиву в бункері під час витікання і надходження деякої кількості матеріалу в зону активного руху з бічної поверхні, що обмежує цю зону, окремими авторами вводиться емпірична постійна величина [56 - 61].

Вміст компонентів у вихідному потоці шихтових матеріалів з

бункера БЗП може бути визначений за допомогою математичних моделей, розроблених К. Накано, І. Ісеї, К. Сунахара [62, 63] у співпраці з колегами, які ґрунтуються на розподілі всього об'єму шихти в бункері на масиви, для яких задається певна послідовність виходу цих масивів з бункера, багаторазово підтверджена експериментально.

Водночас слід зазначити, що розглянуті математичні моделі [53 - 63] не охоплюють увесь комплекс процесів переміщення масивів компонентів шихти та їхнього змішування на тракті системи завантаження «шихтоподача - колошник», зокрема, в них не враховується вплив перемішування компонентів під час вивантаження зі скіпів у бункер БЗП.

Другий підхід являє собою спробу врахування кінематичних закономірностей руху частинок сипучого матеріалу в зоні активного руху в початковій фазі витікання в поєднанні з визначенням об'ємів масивів сипучого, що надходять надалі в зону активного руху матеріалу, у вигляді геометричних залежностей [64].

Для опису закономірностей руху сипучого матеріалу в зоні активного руху, яку автори кінематичної моделі називають зоною течії, що сходиться, використовують залежності швидкості частинок від їхніх початкових і поточних координат [65], що дає можливість аналітичного обґрунтування та визначення форми «фігури випуску».

$$v = \frac{Q}{\sqrt{4\pi B y^*}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4B y^*}}, \quad (1)$$

$$u = \frac{Q}{\sqrt{4\pi B y^*}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4B y^*}} \cdot \frac{x}{2y^*}, \quad (2)$$

де  $u$  – горизонтальна швидкість руху частинки, м/с;  $v$  – вертикальна швидкість руху частинки, м/с;  $Q$  – умовна об'ємна витрата на одиницю товщини бункера, м<sup>2</sup>/с;  $x$ ,  $y$  – відповідно, горизонтальна та вертикальна координати частинок, м;  $B$  – кінематична постійна, м;  $y^*$  – відстань від частинки до точки гіпотетичного стоку по вертикалі (вертикальна координата частинки), м.

Відповідно до виконаної нами оцінки, запропоновані авторами залежності дають змогу отримати задовільну збіжність із даними експериментальних досліджень ІЧМ на промислових об'єктах, тільки в зоні течії, що сходиться (похибка визначення часу виходу окремих частинок не перевищує 9%), однак, для решти зон сипучого матеріалу отримано менш надійні результати. Попередній аналіз залежностей кінематичної моделі витікання сипучих матеріалів показав, що в разі застосування цих залежностей для тривимірного моделювання процесу, зона активного руху матеріалу буде являти собою параболоїд

обертання. Як зазначалося вище, на підставі залежностей кінематичної моделі витікання визначається тільки вид кривої, що обмежує зону активного руху, а математичний опис подальших стадій процесу, як і під час застосування першого підходу, зводиться до визначення відповідних об'ємів сипучого матеріалу, які послідовно надходять до зони активного руху з поверхні воронки, що утворилася.

Третій підхід ґрунтується на DEM, математичні моделі на основі якого вимагають завдання низки вхідних даних, отримання котрих викликає труднощі у визначенні, або даних, надійність котрих не має достатнього підтвердження.

У роботі [66] моделювання із застосуванням DEM використано для кількісної оцінки сегрегації шихтових матеріалів за крупністю під час завантаження бункера БЗП і зміни вмісту окремих фракцій у потоці шихтового матеріалу, що вивантажується з бункера. За допомогою цього методу Р. Кумаром, Ч. М. Петелем, А. К. Яна [76], Д. К. Чібве [68] і низкою інших дослідників на теперішній час розроблено алгоритми, що забезпечують можливість визначення послідовності виходу окремих компонентів із бункера та їхнього масового співвідношення в потоці. У комплексі з математичними моделями руху шихтових матеріалів лотком БЗУ, у колошниковому просторі та розподілу їх на поверхні засипу в печі моделі цього класу можуть забезпечити отримання розрахункових характеристик розподілу компонентів шихти за радіусом колошника.

ІЧМ впродовж тривалого часу проводить багатопланові аналітичні та експериментальні дослідження процесу завантаження шихтових матеріалів та їхнього розподілу в робочому просторі доменної печі. Під керівництвом академіка НАН України В.І. Большакова розроблено методику передпускових досліджень на доменних печах з БЗП [1, 69]. Дослідження передбачали визначення основних параметрів потоку шихтових матеріалів під час його руху трактом БЗП і в колошниковому просторі, а також характеристик розподілу шихтових матеріалів на поверхні засипу. Набутий у процесі освоєння БЗП, що встановлюються на доменних печах, практичний досвід став основою для розроблення низки методик розрахунку та математичних моделей, зокрема: руху шихти робочими поверхнями клапанного вузла і лоткового розподільника, розрахунку траєкторій руху шихтових матеріалів у колошниковому просторі, визначення точок зустрічі потоку матеріалу з поверхнею засипу та розрахунку розподілу рудних навантажень по радіусу колошника печі [1, 70 - 78].

Аналітичні та експериментальні дослідження останнього десятиліття, виконані в ІЧМ, дали змогу ввести уточнення в розроблені раніше математичні моделі та виконати низку розробок зі створення

комплексної математичної моделі завантаження доменної печі, що якнайповніше описує процеси формування багатокомпонентних порцій шихтових матеріалів на шихтоподачі, доставки цих порцій на колошник, завантаження їх у бункери БЗП та вивантаження з них, руху шихтових матеріалів лотком, що обертається, і в колошниковому просторі, падіння їх на поверхню засипу та розподілу на цій поверхні. Основною метою розроблення такої моделі було забезпечення можливості визначення характеристик розподілу кожного з компонентів шихти за радіусом колошника і, відповідно, складів сумішей шихтових матеріалів, що утворюються в різних зонах доменної печі.

### **Висновки**

За результатами виконаного аналізу сучасного стану розробок математичних моделей та розрахункових методів розподілу шихтових матеріалів в доменній печі можна зробити наступні висновки.

1. Аналіз відомих методів розрахунку та математичних моделей розподілу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі, які використовуються у технологічній та дослідницькій практиці, показав, що математичне моделювання з використанням результатів експериментальних досліджень залишаються основним способом отримання інформації про розподіл шихтових матеріалів. Інструментальних засобів контролю розподілу компонентів шихти на теперішній час не існує.

2. У сучасних шихтових умовах доменної плавки, які характеризуються значним розширенням сировинної бази і компонентного складу шихтових матеріалів, використання відомих математичних моделей радіального розподілу шихти у доменних печах не дозволяє розраховувати розподіл компонентів шихти у різних зонах печі. Особливістю цих моделей є те, що з їх використанням прогнозується розподіл двох складових шихти – залізорудної частини та коксу

3. Показано, що розподіл компонентів на поверхні засипу є результатом взаємодії низки процесів, що протікають на всіх стадіях формування порцій шихтових матеріалів, доставки їх на колошник і вивантаження в піч. У процесі формування багатокомпонентних порцій і їхнього завантаження в доменну піч унаслідок неодноразових перевантажень розташування компонентів в об'ємі порції істотно змінюється, компоненти змішуються, утворюються масиви незмішаних матеріалів і сумішей з різним складом. Внаслідок перерозподілу компонентів в об'ємі порції послідовність вивантаження компонентів з бункера БЗП істотно відрізняється від послідовності їхнього завантаження до бункера. На поточний час не відомі моделі завантаження багатокомпонентних порцій шихти в бункер БЗП, що

описують перерозподіл компонентів в об'ємі скіпа при повороті його в розвантажувальних кривих. Відносно моделей розвантаження багатокомпонентних порцій шихти з бункера БЗП, слід зазначити, що до останнього часу існували лише одиночні приклади моделей, що забезпечували розрахункове визначення змісту кожного компонента у вихідному потоці.

4. Виділено три підходи до моделювання одного з найскладніших процесів, які відбуваються на тракті системи завантаження, - вивантаження багатокомпонентних порцій із бункера БЗП. Перший - у вигляді геометричних залежностей визначає об'єм зони активного руху матеріалу, форму якої визначають експериментально, та об'єми масивів сипучого матеріалу, які у заданій послідовності надходять надалі до зони активного руху матеріалу, а потім рухаються вертикально до випускного отвору бункера. Другий підхід являє собою спробу врахування кінематичних закономірностей руху сипучого матеріалу в зоні активного руху у поєднанні з положеннями першого підходу для опису поведінки сипучого за межами активної зони. Третій підхід ґрунтується на DEM, математичні моделі на основі якого вимагають вхідних даних, отримання котрих викликає труднощі у визначенні, або їх надійність має достатнього підтвердження.

5. У зв'язку з багатокомпонентністю шихти, що характерно для сучасного доменного процесу, особу актуальність набуває розробка математичної моделі процесу завантаження в бункер БЗП та вивантаження з нього багатокомпонентних порцій шихтових матеріалів. У сукупності з моделями руху шихти трактом завантажувального пристрою математична модель завантаження та вивантаження з бункера дозволить розрахунковим шляхом визначати розподіл компонентів у дискретних зонах колошника доменної печі і, тим самим, підвищить точність розрахунку показників розподілу шихти.

### **Перелік посилань**

1. Большаков В. И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. Киев : Наук. думка, 2007. 412 с.
2. Математические модели радиального распределения шихты в доменных печах / Большаков В.И., Муравьева И.Г., Белошапка Е.А., Варивода И.Е. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*, 2004. Вып. 8. С. 86–102.
3. Товаровский И. Г. Доменная плавка: монография. 2-е издание. Днепропетровск: Пороги, 2009. 768 с.
3. Грузинов В. К. Управление газовым потоком в доменной печи программой загрузки. Свердловск : Металлургиздат, 1960. 216 с.
4. К вопросу оценки характера падения материалов с большого конуса / Э. И. Николай, Б. Г. Пластинин, В. К. Грузинов, Н. Л. Осинцева. *Труды химико-металлургического института*. Академия наук Казахской ССР, 1972. Т. XIII,

С. 74–79.

5. Осинцева Н. Л., Грузинов В. К., Озолина З. М. Движение материалов доменной шихты при ссыпании с конусов засыпных устройств. *Труды химико-металлургического института*. Академия наук Казахской ССР, 1974. Т. 26, С. 32–40.

6. Бабарыкин Н. Н. Основные закономерности распределения материалов на колошнике доменной печи. Сб. Доменный процесс по новейшим исследованиям. М.: Metallurgizdat, 1963. С. 84–102.

7. Клемперт В. М., Френкель М. М., Гришкова А. А. Контроль и управление газораспределением доменной печи. М.: Metallurgia, 1993. 142 с.

8. Большаков В. И. Управление загрузкой, распределением шихты и газов в доменной печи. Познание процессов доменной плавки. Днепропетровск : Пороги, 2006. С. 87–109.

9. Логинов В. И., Глущенко И. М., Бехтер Е. И. Повышение эффективности использования кокса в народном хозяйстве. М.: Metallurgia, 1986. 160 с.

10. Тарасов В. П. Газодинамика доменного процесса. М.: Metallurgia, 1990. 216 с.

11. Экспериментальное и теоретическое исследование ссыпания материалов с большого конуса и изменения угла их откоса в шахте доменной печи. Перевод ВЦП №Е-08999. 24.05.93.

12. Kajiwara Y., Jimbo T., Sakai T. Development of a Simulation Model for Burden Distribution at Blast Furnace Top. *Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1983. Vol. 23, Iss. 12. P. 1045–1052. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.23.1045>

13. Hinnelä J., Saxén H. Hybrid model of burden distribution in the blast furnace. Ironmaking conference proceedings, 2001. P. 49–56.

14. Hinnelä J., Saxén H., Pettersson F. Modeling of the Blast Furnace Burden Distribution by Evolving Neural Networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2003. Vol. 42, Iss. 11. P. 2314–2323. <https://doi.org/10.1021/ie0203779>

15. Pettersson F., Hinnelä J., Saxén H. Evolutionary Neural Network Modeling of Blast Furnace Burden Distribution. *Materials and Manufacturing Processes*. 2003. Vol. 18, Iss. 3. P. 385–399. <http://dx.doi.org/10.1081/AMP-120022017>

16. Ковшов В. Н. Формирование поверхности засыпи доменной печи современными загрузочными устройствами. *Сообщение 1. Известия Вузов. Черная металлургия*. 1982. № 12. С. 8–12.

17. Автоматизированный выбор режима загрузки доменной печи с загрузочным устройством лоткового типа / А. К. Тараканов, Н. Ш. Гринштейн, М. Н. Байрака и др. *Сталь*. 1986. № 5. С. 11–16.

18. Согласованное управление распределением шихтовых материалов на колошнике и газового потока в горне доменной печи / А. К. Тараканов, В. П. Лялюк, Д. А. Кассим и др. *Сталь*. 2018. № 6. С. 2–5.

19. Кройц Л., Бергман Б. Распределение материалов в доменной печи, работающей с бесконусным засыпным аппаратом. *Черные металлы*. 1988. № 19. С. 3–19.

20. Кройц Л., Гуденау Х. В., Шгандиш Н. Влияние на симметрию распределения материалов в доменной печи при применении засыпного аппарата с вращающимся желобом. *Черные металлы*. 1991. № 3. С. 26–32.

21. Yu Y. W., Bai C. G., Zhang Z. R., Wang F., Lv D. G., Pan C. Theoretical Calculation and Validation of Burden Trajectory in Bell-Less Top Blast Furnace. *Ironmaking and Steelmaking*. 2009. Vol. 36, Iss. 7. P. 505–508. <https://doi.org/10.1179/174328109X445705>
22. Zhao-jie TENG, Shu-sen Cheng, Peng-yu Du, Xi-bin GUO. Mathematical model of burden distribution for the bell-less top of a blast furnace. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*. 2013. Vol. 20, № 7. P. 620–626. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s12613-013-0775-7>
23. Dong Fu, Yan Chen, Chenn Q.Zhou. Mathematical modeling of blast furnace burden distribution with non-uniform descending speed. *Applied Mathematical Modelling*. 2015. Vol. 39, Iss. 23. P. 7554–7567 <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.02.054>.
24. Jong-In Park, Ui-Hyun Baek, Kyoung-Soo Jang, Han-Sang Oh, Jeong-Whan Han. Development of the Burden Distribution and Gas Flow Model in the Blast Furnace Shaft. *ISIJ International*. 2011. Vol. 51, № 10. P. 1617–1623. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1617>
25. Yang Y., Yin Y., Wunsch D., Zhang S., Chen X., Li X., Cheng S., Wu M., Liu Kang-Zhi. Development of Blast Furnace Burden Distribution Process Modeling and Control. *ISIJ International*. 2017. Vol. 57, № 8. P. 1350–1363. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-002>
26. Zhao G., Cheng S., Xu W., Li C. Comprehensive Mathematical Model for Particle Flow and Circumferential Burden Distribution in Charging Process of Bell-less Top Blast Furnace with Parallel Hoppers. *ISIJ International*. 2015. Vol. 55, № 12. P. 2566–2575. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-342>
27. Gupta P. K., Rao A. S., Sekhar V. R., Ranjan M., Naha T. K. Burden distribution control and its optimization under high pellet operation. *Ironmaking & Steelmaking*. 2010. Vol. 37, Iss. 3. P. 235–239. <http://dx.doi.org/10.1179/174328109X422566>
28. Fojtik D., Tuma J., Faruzel P. Computer modelling of burden distribution in the blast furnace equipped by a bell-less top charging system. *Ironmaking & Steelmaking*. 2021. Vol. 48. P. 1226–1238. <https://doi.org/10.1080/03019233.2021.1952829>.
29. Li M., Wei H., Ge Y., Xiao G., Yu Y. A Mathematical Model Combined with Radar Data for Bell-Less Charging of a Blast Furnace. *Processes*. 2020. Vol. 8, № 2. P. 239. <https://doi.org/10.3390/pr8020239>.
30. Saxen H., Helle M., Li H. (2019). Mathematical model of burden distribution in the blast furnace. In F. Kongoli, P. Assis, M. C. Gomez-Marroquin, S. Kitayama, H. Konishi, A. Murao, S. Nomura, H. Ono, H. Saxen, K. Seto, J. I. Tani Eds.), *Sustainable Industrial Processing Summit (SIPS)*, 2019, Vol. 8: Usui Intl. Symp. / *Advanced Sustainable Iron and Steel Making* (P. 243–248). Montreal, Canada.
31. Hinnela J., Saxen H., Pettersson F. A. Modeling of the Blast Furnace Burden Distribution by Evolving Neural Networks. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2003. Vol. 42, № 11. P. 2314–2323. <https://doi.org/10.1021/ie0203779>
32. Park J. I., Jung J. H., Jo M. K., Oh H. S., Han J. W. Mathematical modeling of the burden distribution in the blast furnace shaft. *Metals and Materials International*. 2011. Vol. 17, Iss. 3, P. 485–496. <https://doi.org/10.1007/s12540-011-0629-7>

33. Shi P. Y., Zhou P., Fu D., Zhou C. Q. Mathematical model for burden distribution in blast furnace. *Ironmaking & Steelmaking*. 2016. Vol. 43, Iss. 1, P. 74–81. <https://doi.org/10.1179/1743281215Y.0000000052>
34. Chen J., Zuo H., Xue Q., Wang J. A review of burden distribution models of blast furnace. *Powder Technology*. 2021. Vol. 398. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117055>
35. Nag S., Gupta A., Paul S., Gavel D. J., Aich B. Prediction of Heap Shape in Blast Furnace Burden Distribution. *ISIJ International*. 2014. Vol. 54, Iss. 7. P. 1517–1520. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.1517>
36. Agrawal A. Blast Furnace Performance Under Varying Pellet Proportion. *Trans. Indian Inst. Met.* 2019. Vol. 72. P. 777–787. <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1530-6>.
37. Mitra T. Modeling of Burden Distribution in the Blast Furnace: Doctor of Technology Thesis / Thermal and Flow Engineering Laboratory Faculty of Science and Engineering Ebo Akademi University. Turku / Abo, Finland, 2016. 89 p. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-12-3420-0>
38. Li Z., Kuang S., Liu S., Gan J., Yu A., Li Y., Mao X. Numerical investigation of burden distribution in ironmaking blast furnace. *Powder Technol.* 2019. Vol. 353. P. 385–397. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.047>.
39. Chen J., Zuo H., Xue Q., Wang J. A review of burden distribution models of blast furnace. *Powder Technology*. 2022. Vol. 398. 117055. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117055>
40. Roepal R., Pang Y., Adema A., Stel J., Schott D. Modelling of phenomena affecting blast furnace burden permeability using the Discrete Element Method (DEM) – A review. *Powder Technology*. 2023. Vol. 415. 118161. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118161>
41. Yu Y. W., Saxén H. Analysis of Rapid Flow of Particles in and from an Inclined Chute Using Small-Scale Experiments and Discrete Element Simulation. *Ironmaking and Steelmaking*. 2011. Vol. 38, Iss. 6. P. 432–442. <http://dx.doi.org/10.1179/1743281211Y.0000000015>
42. Narita Y., Orimoto T., Mio H., Nomura S. DEM Analysis of Particle Trajectory in Circumferential Direction at Bell-less Top. *ISIJ International*. 2017. Vol. 57, № 3. P. 429–434. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-560>
43. Ma H., Xia X., Zhou L., Xu C. A Comparative Study of the Performance of Different Particle Models in Simulating Particle Charging and Burden Distribution in a Blast Furnace within the DEM Framework. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 9. P. 3890. <https://doi.org/10.3390/en16093890>
44. Иванча Н. Г., Муравьева И. Г., Вишняков В. И., Щербачев В. Р., Ермолина К. П. Повышение энергоэффективности доменной плавки за счет выбора рациональных параметров режима загрузки многокомпонентной шихты. *Problems of the Regional Energetics. Молдавия*, 2022. Вып. 2(54). P. 53–62. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.05>
45. Большаков В. И., Иванча Н. Г., Муравьева И. Г., Вишняков В. И. Технологическое обоснование эффективности загрузки многокомпонентных смешанных порций шихтовых материалов в доменную печь. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2012. Вып. 25. С. 103–122.
46. Доброскок В. А. Специальные системы загрузки доменных. *Черные*

металлы. 2007. № 9. С. 13–21.

47. Bukhval'der J., Dobroskok V. A., Lonardi E., Goffin R., Tillen G., Kyoler S. Sovremennye tekhnologii zagruzki domennykh pechey [Modern blast furnace loading systems]. *Chyornye metally - Steel and iron*. 2008. № 9. P. 21–25. (In Russian).

48. Nikitin L. D., Dolinskiy V. A., Bugayov S. F., Mar'yasov M. F., Denisov Yu. M., Chudnova N. T., Fyodorov I. P. Formirovaniye racional'noy struktury stolba shihtovykh materialov v domennoy pechi [Formation of a rational structure of a column of charged materials in a blast furnace]. *Metallurg – Metallurgist*. 2004. № 2. P. 26–28. (In Russian).

49. Shepetovskiy E. A. Ratsional'noe formirovaniye stolba shikhty v domennoy pechi [Rational formation of charge column in a blast furnace]. *Stal' – Steel*. 2003. № 5. P. 11–15. (In Russian).

50. Yaroshevskiy S. L., Nozdrachev V. A., Chebotareyov A. P., Rudenko V. A., Feshchenko S. A., Kuznetsov A. M., Padalka V. P., Hlaponin N. S., Kuzin A. V. Effektivnost' ispol'zovaniya koksа fraktsii menee 40 mm v domennoy plavki [Efficiency of using coke fraction less than 40 mm in blast-furnace smelting]. *Metallurg – Metallurgist*. 2000. № 12. P. 32–35.

51. Litvinov L. F., Yaroshevskiy S. L., Kuznetsov A. M., Padalka V. P., Hlaponin N. S., Kuzin A. V. Effektivnost' tekhnologii domennoy plavki pri zagruzke v pech' koksovogo oreshka v smesi s zhelezorudnoy shihtoy [Efficiency of using coke fraction less than 40 mm in blast-furnace smelting]. *Metall i lit'yo Ukrainy - Metal and casting of Ukraine*. 2004. № 12. P. 5–9.

52. Yu X., Shen Y. Model study of central coke charging on ironmaking blast furnace performance: Effects of charring pattern and nut coke. *Powder Technol.* 2020. Vol. 361, P. 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.012>

53. Kashihara Y., Iwai Y., Ishiwata N., Oyama N., Matsuno H., Horikoshi H., Yamamoto K., Kuwabara M. Development of New Charging Technique for Mixing Coke in Ore Layer at Blast Furnace with Center Feed Type Bell-less Top. *ISIJ International*. 2017. Vol. 57, № 4. P. 665–672. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-613>

54. Matsui Y., Sato A., Oyama T., Matsuo T. All Pellets Operation in Kobe No. 3 Blast Furnace under Intensive Coal Injection. *ISIJ International*. 2003. Vol. 43(2). P. 166–174. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.166>

55. Калинин А. П., Загайнов С. А., Ярошенко Ю. Г. Математическая модель оценки качественных характеристик потока при их циклической загрузке и выгрузке из бункера. *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*. 1985. № 8. С. 95–98.

56. Калинин А. П. Математические модели движения шихты и ее распределения на колоснике доменной печи. Институт «Черметинформация». Обзorn. Информ. Серия «Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна». М., 1990. Вып. 4. С. 1–32.

57. Малахов Г. М. Выпуск руды из обрушенных блоков. М.: Металлургиздат, 1952. 288 с.

58. Квапил Р. Движение сыпучих материалов в бункерах. М.: Госгортехиздат, 1961. 81 с.

59. Панич Ю. В., Пайкин М. З. Математическая модель загрузки и истечения сыпучих материалов из накопительных емкостей с целью усреднения

руд. *Обогащение руд*. 1977. № 3. С. 6–10.

60. Куликов В. В. Выпуск руды. М.: Недра, 1982. 262 с.

61. Nakano K., Isei Y., Natsui T., Watanabe K., Kishino T. Technical Report Tracking Technique of Burden Materials for Blast Furnace with Bell-less Top by Using RFID. *Nippon Steel technical report*. March 2020. № 123. P. 83–89. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/pdf/123-13.pdf>

62. Nakano K., Sunahara K., Inada T. Advanced Supporting System for Burden Distribution Control at Blast Furnace Top. *ISIJ International*. 2010. Vol. 50, №. 7, P. 994–999. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.994>

63. Kajiwara Y., Jimbo T., Joko T., Aminaga Y., Inada T. Development of a Simulation Model for Burden Distribution in Bell-less Charging Based on Full Scale Model Experiments. *Transaction ISIJ*. 1985. Vol. 71, № 2. P. 175–182. [http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.71.2\\_175](http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.71.2_175)

64. Тюзюн У., Неддерман Р. Экспериментальное доказательство кинематического моделирования течений гранулированных сред в отсутствие сопротивления воздуха. *Механика гранулированных сред: Теория быстрых движений*: Сб. ст. Сер. Механика, М.: Мир, 1985. С. 193–209.

65. Mio H., Kadowaki M., Matsuzaki S., Kunitomo K. Development of particle flow simulator in the charging process of blast furnace by discrete element method. *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 33. P. 27–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.01.002>

66. Kumar R., Patel C. M., Jana A. K., Gopireddy S. R. Prediction of hopper discharge rate using combined discrete element method and artificial neural network. *Advanced Powder Technology*. 2018. Vol. 29(11). P. 2822–2834. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.08/002>

67. Chibwe D. K. Optimized burden delivery for blast furnace operations. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the Degree of doctor of philosophy. Faculty of Engineering and Built Environment at The University of Newcastle. Newcastle, Australia, 2019. 295 p.

68. Большаков В. И. Теория и практика загрузки доменных печей. М.: Металлургия, 1990. 256 с.

69. Исследование параметров потока шихтовых материалов и их распределения на колошнике современной доменной печи / В. И. Большаков, Ю. С. Семенов, Н. Г. Иванча, В. И. Вишняков, Е. И. Шумельчик и др. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 3. С. 87–92.

70. Большаков В. И., Богачев Ю. А., Вишняков В. И., Иванча Н. Г., Шулико С. Т. Предпусковые исследования загрузки и распределения шихты в доменной печи большого объема. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2008. № 6(1302). С. 39–44.

71. Большаков В. И., Варивода И. Е., Рослик Н. А., Шутылев Ф. М. Влияние движения шихты по трактам загрузочного устройства на окружное распределение в доменной печи. *Сб. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Киев : Наукова думка, 1995. С. 57–68.

72. Большаков В. И., Зарембо А. Ю. Исследование движения материалов в шихтовых трактах бесконусных загрузочных устройств. Институт «Черметинформация». Обзорная информация. Сер. «Подготовка сырьевых материалов к металлург. переделу и пр-во чугуна». 1990. Вып. 2. С. 1–9.

73. Большаков В. И., Зарембо А. Ю. Траектории движения шихты в колошниковом пространстве современной доменной печи. Бюллетень ЦНИИЧМ. Черная металлургия. 1985. Вып. 20. С. 35–37.

74. Большаков В. И., Зарембо А. Ю., Сало А. С. Методика расчета параметров схода шихты с распределительного лотка. Сб. МЧМ : Вопросы производства чугуна в доменных печах. М.: Металлургия, 1984. С. 60–64.

75. Большаков В. И., Зарембо А. Ю., Иванча Н. Г. Движение шихты в колошниковом пространстве доменной печи при загрузке лотковым распределителем. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. № 4. С. 75–79.

76. Большаков В. И., Семенов Ю. С., Лебедь В. В., Шумельчик Е. И., Вишняков В. И. Модель радиального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи, оборудованной БЗУ. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2011. Вып. 23. С. 52–62.

77. 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, No. 9–10. P. 652–657. «Scopus». (Russian Original *Металлург*. 2012. № 9–10. С. 36–40). <https://doi.org/10.1007/s11015-013-9630-3>

## References

1. Bolshakov, V. I. (2007). *Tehnologiya vysokoeffektivnoj energosberegayushej domennoj plavki*. Nauk. dumka.
2. Bolshakov, V. I., Muraveva, I. G., Beloshapka, E. A., & Varivoda, I. E. (2004). Matematicheskie modeli radialnogo raspredeleniya shihty v domennyh pechah. *Sbornik nauchnyh trudov IChM «Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii»* (No. 8, pp. 86–102). Dnepropetrovsk.
3. Tovarovskij, I. G. (2009). *Domennaya plavka: Monografiya* (2nd ed.). Porogi.
4. Gruzinov, V. K. (1960). *Upravlenie gazovym potokom v domennoj pechi programnoj zagruzkoj*. Metallurgizdat.
5. Nikolaj, E. I., Plastinin, B. G., Gruzinov, V. K., & Osinceva, N. L. (1972). K voprosu ocenki haraktera padeniya materialov s bol'shogo konusa. *Trudy khimiko-metallurgicheskogo instituta. Akademiya nauk Kazakhskoj SSR*, 13, 74–79.
6. Osinceva, N. L., Gruzinov, V. K., & Ozolina, Z. M. (1974). Dvizhenie materialov domennoj shihty pri ssypanii s konusov zaspyhnyh ustrojstv. *Trudy khimiko-metallurgicheskogo instituta. Akademiya nauk Kazakhskoj SSR*, 26, 32–40.
7. Babarykin, N. N. (1963). Osnovnye zakonomernosti raspredeleniya materialov na koloshnike domennoj pechi. *Sb. Domennyj process po novejsim issledovaniyam* (pp. 84–102). Metallurgizdat.
8. Klempert, V. M., Frenkel', M. M., & Grishkova, A. A. (1993). *Kontrol' i upravlenie gazoraspredeleniem domennoj pechi*. Metallurgiya.
9. Bolshakov, V. I. (2006). Upravlenie zagruzkoj, raspredeleniem shihty i gazov v domennoj pechi. *Poznanie processov domennoj plavki* (pp. 87–109). Porogi.
10. Loginov, V. I., Glushenko, I. M., & Bekhter, E. I. (1986). *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya koksa v narodnom khozyajstve*. Metallurgiya.
11. Tarasov, V. P. (1990). *Gazodinamika domennogo processa*. Metallurgiya.
12. *Ekspperimental'noe i teoreticheskoe issledovanie ssypaniya materialov s*

*bol'shogo konusa i izmeneniya ugla ikh otskoka v shakhte domennoj pechi* [Translation VCP No. E-08999]. (1993, May 24).

13. Kajiwara, Y., Jimbo, T., & Sakai, T. (1983). Development of a simulation model for burden distribution at blast furnace top. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 23(12), 1045–1052. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.23.1045>

14. Hinnela, J., & Saxén, H. (2001). Hybrid model of burden distribution in the blast furnace. *Ironmaking Conference Proceedings*, 49–56.

15. Hinnela, J., Saxén, H., & Pettersson, F. (2003). Modeling of the blast furnace burden distribution by evolving neural networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(11), 2314–2323. <https://doi.org/10.1021/ie0203779>

16. Pettersson, F., Hinnela, J., & Saxén, H. (2003). Evolutionary neural network modeling of blast furnace burden distribution. *Materials and Manufacturing Processes*, 18(3), 385–399. <http://dx.doi.org/10.1081/AMP-120022017>

17. Kovshov, V. N. (1982). Formirovanie poverkhnosti zasypki domennoj pechi sovremennymi zagruzochnymi ustrojstvami. *Soobshchenie I* [Izvestiya vuzov. Chernaia metallurgiya, (12), 8–12.

18. Tarakanov, A. K., Grinshtejn, N. Sh., Bajraka, M. N., et al. (1986). Avtomatizirovannyj vybor rezhima zagruzki domennoj pechi s zagruzochnym ustrojstvom lotkovogo tipa. *Stal'*, (5), 11–16.

19. Tarakanov, A. K., Lyalyuk, V. P., Kassim, D. A., et al. (2018). Soglasovannoe upravlenie raspredeleniem shikhtovykh materialov na koloshnike i gazovogo potoka v gorné domennoj pechi. *Stal'*, (6), 2–5.

20. Kröjc, L., & Bergman, B. (1988). Raspredelenie materialov v domennoj pechi, rabotayushchej s beskonusnym zasypnym apparatom. *Chernye Metally*, (19), 3–19.

21. Kröjc, L., Gudenau, H. V., & Shtandish, N. (1991). Vliyanie na simmetriyu raspredeleniya materialov v domennoj pechi pri primenenii zasypnogo apparata s vrashchayushchimsya zhelobom. *Chernye Metally*, (3), 26–32.

22. Yu, Y. W., Bai, C. G., Zhang, Z. R., Wang, F., Lv, D. G., & Pan, C. (2009). Theoretical calculation and validation of burden trajectory in bell-less top blast furnace. *Ironmaking & Steelmaking*, 36(7), 505–508. <https://doi.org/10.1179/174328109X445705>

23. Teng, Z.-J., Cheng, S.-S., Du, P.-Y., & Guo, X.-B. (2013). Mathematical model of burden distribution for the bell-less top of a blast furnace. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 20(7), 620–626. <https://doi.org/10.1007/s12613-013-0775-7>

24. Fu, D., Chen, Y., & Zhou, C. Q. (2015). Mathematical modeling of blast furnace burden distribution with non-uniform descending speed. *Applied Mathematical Modelling*, 39(23), 7554–7567. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.02.054>

25. Park, J.-I., Baek, U.-H., Jang, K.-S., Oh, H.-S., & Han, J.-W. (2011). Development of the burden distribution and gas flow model in the blast furnace shaft. *ISIJ International*, 51(10), 1617–1623. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1617>

26. Yang, Y., Yin, Y., Wunsch, D., Zhang, S., Chen, X., Li, X., Cheng, S., Wu, M., & Liu, K.-Z. (2017). Development of blast furnace burden distribution process modeling and control. *ISIJ International*, 57(8), 1350–1363.

<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-002>

27. Zhao, G., Cheng, S., Xu, W., & Li, C. (2015). Comprehensive mathematical model for particle flow and circumferential burden distribution in charging process of bell-less top blast furnace with parallel hoppers. *ISIJ International*, 55(12), 2566–2575. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-342>

28. Gupta, P. K., Rao, A. S., Sekhar, V. R., Ranjan, M., & Naha, T. K. (2010). Burden distribution control and its optimization under high pellet operation. *Ironmaking & Steelmaking*, 37(3), 235–239. <http://dx.doi.org/10.1179/174328109X422566>

29. Fojtík, D., Tuma, J., & Faruzel, P. (2021). Computer modelling of burden distribution in the blast furnace equipped by a bell-less top charging system. *Ironmaking & Steelmaking*, 48, 1226–1238. <https://doi.org/10.1080/03019233.2021.1952829>

30. Li, M., Wei, H., Ge, Y., Xiao, G., & Yu, Y. (2020). A mathematical model combined with radar data for bell-less charging of a blast furnace. *Processes*, 8(2), Article 239. <https://doi.org/10.3390/pr8020239>

31. Saxén, H., Helle, M., & Li, H. (2019). Mathematical model of burden distribution in the blast furnace. In F. Kongoli, P. Assis, M. C. Gomez-Marroquin, S. Kitayama, H. Konishi, A. Murao, S. Nomura, H. Ono, H. Saxén, K. Seto, & J. I. Tani (Eds.), *Sustainable industrial processing summit (SIPS) 2019, Vol. 8: Usui international symposium/advanced sustainable iron and steel making* (pp. 243–248). Montreal, Canada.

32. Hinnela, J., Saxén, H., & Pettersson, F. A. (2003). Modeling of the blast furnace burden distribution by evolving neural networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(11), 2314–2323. <https://doi.org/10.1021/ie0203779>

33. Park, J. I., Jung, J. H., Jo, M. K., Oh, H. S., & Han, J. W. (2011). Mathematical modeling of the burden distribution in the blast furnace shaft. *Metals and Materials International*, 17(3), 485–496. <https://doi.org/10.1007/s12540-011-0629-7>

34. Shi, P. Y., Zhou, P., Fu, D., & Zhou, C. Q. (2016). Mathematical model for burden distribution in blast furnace. *Ironmaking & Steelmaking*, 43(1), 74–81. <https://doi.org/10.1179/1743281215Y.0000000052>

35. Chen, J., Zuo, H., Xue, Q., & Wang, J. (2021). A review of burden distribution models of blast furnace. *Powder Technology*, 398, Article 117055. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117055>

36. Nag, S., Gupta, A., Paul, S., Gavel, D. J., & Aich, B. (2014). Prediction of heap shape in blast furnace burden distribution. *ISIJ International*, 54(7), 1517–1520. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.1517>

37. Agrawal, A. (2019). Blast furnace performance under varying pellet proportion. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 72, 777–787. <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1530-6>

38. Mitra, T. (2016). *Modeling of burden distribution in the blast furnace* [Doctoral dissertation, Åbo Akademi University]. Thermal and Flow Engineering Laboratory, Faculty of Science and Engineering. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-12-3420-0>

39. Li, Z., Kuang, S., Liu, S., Gan, J., Yu, A., Li, Y., & Mao, X. (2019). Numerical investigation of burden distribution in ironmaking blast furnace. *Powder Technology*, 353, 385–397. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.047>

40. Chen, J., Zuo, H., Xue, Q., & Wang, J. (2022). A review of burden distribution models of blast furnace. *Powder Technology*, 398, Article 117055. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117055>
41. Roepal, R., Pang, Y., Adema, A., Stel, J., & Schott, D. (2023). Modelling of phenomena affecting blast furnace burden permeability using the Discrete Element Method (DEM) – A review. *Powder Technology*, 415, Article 118161. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118161>
42. Yu, Y. W., & Saxén, H. (2011). Analysis of rapid flow of particles in and from an inclined chute using small-scale experiments and discrete element simulation. *Ironmaking & Steelmaking*, 38(6), 432–442. <http://dx.doi.org/10.1179/1743281211Y.0000000015>
43. Narita, Y., Orimoto, T., Mio, H., & Nomura, S. (2017). DEM analysis of particle trajectory in circumferential direction at bell-less top. *ISIJ International*, 57(3), 429–434. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-560>
44. Ma, H., Xia, X., Zhou, L., & Xu, C. (2023). A comparative study of the performance of different particle models in simulating particle charging and burden distribution in a blast furnace within the DEM framework. *Energies*, 16(9), Article 3890. <https://doi.org/10.3390/en16093890>
45. Ivancha, N. G., Muraveva, I. G., Vishnyakov, V. I., Sherbachev, V. R., & Ermolina, K. P. (2022). Povyshenie energoeffektivnosti domennoj plavki za schet vybora racional'nykh parametrov rezhima zagruzki mnogokomponentnoj shihty. *Problems of the Regional Energetics*, (2(54)), 53–62. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.05>
46. Bolshakov, V. I., Ivancha, N. G., Muraveva, I. G., & Vishnyakov, V. I. (2012). Tekhnologicheskoe obosnovanie effektivnosti zagruzki mnogokomponentnykh smeshannykh porcij shikhtovykh materialov v domennuyu pech'. In *Sb. nauchn. tr. IChM «Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoy metallurgii»* (No. 25, pp. 103–122).
47. Dobroskok, V. A. (2007). Spetsial'nye sistemy zagruzki domennykh. *Chernye Metally*, (9), 13–21.
48. Bukhval'der, J., Dobroskok, V. A., Lonardi, E., Goffin, R., Tillen, G., & Kyoler, S. (2008). Sovremennye tekhnologii zagruzki domennykh pechej [Modern blast furnace loading systems]. *Chyornye metally*, (9), 21–25. [In Russian]
49. Nikitin, L. D., Dolinskij, V. A., Bugajov, S. F., Mar'jasov, M. F., Denisov, Yu. M., Chudnova, N. T., & Fyodorov, I. P. (2004). Formirovanie racional'noj struktury stolba shikhtovykh materialov v domennoj pechi [Formation of a rational structure of a column of charged materials in a blast furnace]. *Metallurgist*, (2), 26–28.
50. Shepetovskij, E. A. (2003). Racional'noe formirovanie stolba shikhty v domennoj pechi [Rational formation of charge column in a blast furnace]. *Steel*, (5), 11–15. [In Russian]
51. Yaroshevskij, S. L., Nozdrachev, V. A., Chebotarev, A. P., Rudenko, V. A., Feshchenko, S. A., Kuznetsov, A. M., Padalka, V. P., Hlaponin, N. S., & Kuzin, A. V. (2000). Effektivnost' ispol'zovaniya koksa fraktsii men'she 40 mm v domennoj plavke [Efficiency of using coke fraction less than 40 mm in blast-furnace smelting]. *Metallurgist*, (12), 32–35. [In Russian]
52. Litvinov, L. F., Yaroshevskij, S. L., Kuznetsov, A. M., Padalka, V. P.,

Hlaponin, N. S., & Kuzin, A. V. (2004). Effektivnost' tekhnologii domennoj plavki pri zagruzke v pech' koksovogo oreshka v smesi s zhelezorudnoj shikhtoj [Efficiency of using coke fraction less than 40 mm in blast-furnace smelting]. *Metal and Casting of Ukraine*, (12), 5–9. [In Russian]

53. Yu, X., & Shen, Y. (2020). Model study of central coke charging on ironmaking blast furnace performance: Effects of charring pattern and nut coke. *Powder Technology*, 361, 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.012>

54. Kashihara, Y., Iwai, Y., Ishiwata, N., Oyama, N., Matsuno, H., Horikoshi, H., Yamamoto, K., & Kuwabara, M. (2017). Development of new charging technique for mixing coke in ore layer at blast furnace with center feed type bell-less top. *ISIJ International*, 57(4), 665–672. <https://doi.org/10.2355/isijinternational>. ISIJINT-2016-613

55. Matsui, Y., Sato, A., Oyama, T., & Matsuo, T. (2003). All pellets operation in Kobe No. 3 blast furnace under intensive coal injection. *ISIJ International*, 43(2), 166–174. <https://doi.org/10.2355/isijinternational>.43.166

56. Kalinin, A. P., Zagainov, S. A., & Yaroshenko, Yu. G. (1985). Matematicheskaya model' otsenki kachestvennykh kharakteristik potoka pri ikh tsiklicheskoj zagruzke i vygruzke iz bunkera. *Izvestiya VUZov. Chernaia metallurgiya*, (8), 95–98.

57. Kalinin, A. P. (1990). Matematicheskie modeli dvizheniya shikhty i ee raspredeleniya na koloshnike domennoj pechi. *Obzornaya informatsiya. Seriya «Podgotovka syrevykh materialov k metallurgicheskomu pererabotke i proizvodstvu chuguna»* (No. 4, pp. 1–32). Institut «Chermetinformatsiya».

58. Malakhov, G. M. (1952). *Vypusk rudy iz obrushennykh blokov*. Metallurgizdat.

59. Kvapil, R. (1961). *Dvizhenie sypuchikh materialov v bunkerakh*. Gosgorteorizdat.

60. Panich, Yu. V., & Pajkin, M. Z. (1977). Matematicheskaya model' zagruzki i istecheniya sypuchikh materialov iz nakopitel'nykh emkostej s tsel'yu usredneniya rud. *Obogashchenie Rud*, (3), 6–10.

61. Kulikov, V. V. (1982). *Vypusk rudy*. Nedra.

62. Nakano, K., Isei, Y., Natsui, T., Watanabe, K., & Kishino, T. (2020, March). Technical report tracking technique of burden materials for blast furnace with bell-less top by using RFID. *Nippon Steel Technical Report*, (123), 83–89. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/pdf/123-13.pdf>

63. Nakano, K., Sunahara, K., & Inada, T. (2010). Advanced supporting system for burden distribution control at blast furnace top. *ISIJ International*, 50(7), 994–999. <https://doi.org/10.2355/isijinternational>.50.994

64. Kajiwara, Y., Jimbo, T., Joko, T., Aminaga, Y., & Inada, T. (1985). Development of a simulation model for burden distribution in bell-less charging based on full scale model experiments. *Transactions of ISIJ*, 71(2), 175–182. [http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.71.2\\_175](http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.71.2_175)

65. Tyuzyun, U., & Nedderman, R. (1985). Eksperimental'noe dokazatel'stvo kinematicheskogo modelirovaniya techenij granulirovannykh sred v otsutstvie soprotivleniya vozdukh. In *Mekhanika granulirovannykh sred: Teoriya bystrykh dvizhenij: Sb. st. Ser. Mekhanika* (pp. 193–209). Mir.

66. Mio, H., Kadowaki, M., Matsuzaki, S., & Kunitomo, K. (2012). Development

of particle flow simulator in the charging process of blast furnace by discrete element method. *Minerals Engineering*, 33, 27–33.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.01.002>

67. Kumar, R., Patel, C. M., Jana, A. K., & Gopireddy, S. R. (2018). Prediction of hopper discharge rate using combined discrete element method and artificial neural network. *Advanced Powder Technology*, 29(11), 2822–2834.  
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.08.002>

68. Chibwe, D. K. (2019). *Optimized burden delivery for blast furnace operations* [Doctoral dissertation, The University of Newcastle]. Faculty of Engineering and Built Environment.

69. Bolshakov, V. I. (1990). *Teoriya i praktika zagruzki domennykh pechej*. Metallurgiya.

70. Bolshakov, V. I., Semenov, Yu. S., Ivancha, N. G., Vishnyakov, V. I., Shumelchik, E. I., et al. (2012). Issledovanie parametrov potoka shikhtovykh materialov i ikh raspredeleniya na koloshnike sovremennoj domennoj pechi. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, (3), 87–92.

71. Bolshakov, V. I., Bogachev, Yu. A., Vishnyakov, V. I., Ivancha, N. G., & Shuliko, S. T. (2008). Predpuskovye issledovaniya zagruzki i raspredeleniya shikhty v domennoj pechi bol'shogo ob'ema. *Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii. Chernaya metallurgiya*, (6(1302)), 39–44.

72. Bolshakov, V. I., Varivoda, I. E., Roslik, N. A., & Shutylev, F. M. (1995). Vliyanie dvizheniya shikhty po traktam zagruzochnogo ustrojstva na okruzhnoye raspredeleniye v domennoj pechi. In *Sb. Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii* (pp. 57–68). Naukova Dumka.

73. Bolshakov, V. I., & Zarembo, A. Yu. (1990). Issledovanie dvizheniya materialov v shikhtovykh traktakh beskonusnykh zagruzochnykh ustrojstv. *Obzornaya informatsiya. Ser. «Podgotovka syrevykh materialov k metallurgicheskomu pererabotke i proizvodstvu chuguna»* (No. 2, pp. 1–9). Institut «Chermetinformatsiya».

74. Bolshakov, V. I., & Zarembo, A. Yu. (1985). Traektorii dvizheniya shikhty v koloshnikovom prostranstve sovremennoj domennoj pechi. *Byulleten' CNIChM. Chernaya metallurgiya*, (20), 35–37.

75. Bolshakov, V. I., Zarembo, A. Yu., & Salo, A. S. (1984). Metodika rascheta parametrov shoda shikhty s raspredelitel'nogo lotka. In *Sb. MChM: Voprosy proizvodstva chuguna v domennykh pechakh* (pp. 60–64). Metallurgiya.

76. Bolshakov, V. I., Zarembo, A. Yu., & Ivancha, N. G. (2007). Dvizhenie shikhty v koloshnikovom prostranstve domennoj pechi pri zagruzke lotkovym raspredelitelem. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, (4), 75–79.

77. Bolshakov, V. I., Semenov, Yu. S., Lebed', V. V., Shumelchik, E. I., & Vishnyakov, V. I. (2011). Model' radial'nogo raspredeleniya shikhtovykh materialov na koloshnike domennoj pechi, oborudovannoj BZU. *iSb. nauchn. tr. IChM «Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii»* (No. 23, pp. 52–62).

78. Semenov, Yu. S., Shumelchik, E. I., Vishnyakov, V. I., Nasledov, A. V., Semen, 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*, 56(9–10), 652–657. <https://doi.org/10.1007/s11015-013-9630-3>

**M. H. Ivancha**<sup>1</sup>, Senior Researcher, ORCID 0000-0002-5366-9328

**V. I. Vishnyakov**<sup>1</sup>, Researcher, ORCID 0000-0002-5538-6962

**I. H. Muravyova**<sup>1,\*</sup>, D. Sc. (Tech.), Leading Researcher, ORCID 0000-0001-5926-7787

**L. I. Garmash**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-6873-6685

**V. R. Shcherbachov**<sup>1</sup>, Junior Researcher, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-6734-0451

**O. O. Biloshapka**<sup>1</sup>, Junior Researcher, ORCID 0000-0003-3103-0512

**K. P. Yermolina**<sup>1</sup>, Leading Engineer, ORCID 0000-0001-6819-9886

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

\* *Corresponding author: irinamuravyova@gmail.com*

### **CALCULATION METHODS AND MATHEMATICAL MODELS OF THE DISTRIBUTION OF CHARGE MATERIALS ON THE TOP OF A BLAST FURNACE, USED IN TECHNOLOGICAL AND RESEARCH PRACTICE**

**Abstract.** Increasing the efficiency of using the reducing capacity of gases in a blast furnace, optimizing the processes of slag formation and lining, forming a rational configuration and dimensions of the cohesive zone and, as a result, improving the technical and economic indicators of smelting as a whole is ensured, first of all, by rational distribution of charge materials on the top. Analysis of known calculation methods and mathematical models of the distribution of charge materials on the top of a blast furnace, which are used in technological and research practice, showed that mathematical modeling using the results of experimental studies remains the main way to obtain information about the distribution of charge materials. Instrumental means of controlling the distribution of charge components do not currently exist. A feature of known mathematical models is that with their use the distribution of two charge components was predicted - the iron ore part and coke. Modern blast furnace charge conditions are characterized by a significant expansion of the raw material base and the component composition of charge materials loaded into the blast furnace. When these components are unloaded onto the surface of the backfill, a mixture layer is formed, the composition of which differs significantly in different zones of the top. The difference in the composition of the mixtures determines the corresponding difference in the high-temperature properties of the iron ore part of the charge and the properties of the melts along the cross-section of the blast furnace. Analysis of previously performed research in the field of developing mathematical models and methods for calculating distribution characteristics showed that a significant part of the work is devoted to the distribution of the iron ore and carbon-containing parts of the charge as a whole, without assessing the distribution of the components included in it. In this regard, problems are becoming particularly relevant, the solution of which is aimed at creating a complex mathematical model of blast furnace loading, which includes models of a number of processes of forming multicomponent portions of charge materials, their movement along the loading path and in the working space of the blast furnace, as well as their distribution on the surface of the backfill.

**Key words:** blast furnace, mathematical models, multicomponent charge, component

distribution in zones.

**For citation:** Ivancha, M. H., Vishnyakov, V. I., Muravyova, I. H., Garmash, L. I., Shcherbachov, V. R., Biloshapka, O. O., & Yermolina, K. P. (2026). Calculation methods and mathematical models of the distribution of charge materials on the top of a blast furnace, used in technological and research practice. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40, 290-319. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-019>

*Рукопис надійшов до редакції / Received 22.10.2025*

*Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026*

*Опубліковано / Published 30.05.2026*