

УДК 669.162.2

В. В. Бочка¹, д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-4935-0779**К. Г. Нізяєв**¹, д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-9260-0964**М. В. Ягольник**^{1,*}, к.т.н., доц., ORCID 0000-0003-2686-8601**К. В. Шмат**¹, асистент**М. М. Олексієнко**¹, аспірант**О. І. Бабенко**¹, студент¹ *Український державний університет науки і технологій** *Автор для листування: m.v.yaholnyk@ust.edu.ua*

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РУХУ ШИХТИ В БЕЗКОНУСНОМУ ЗАВАНТАЖУВАЛЬНОМУ ПРИСТРОЇ ЛОТКОВОГО ТИПУ

Анотація. У статті розглянуто особливості руху шихтових матеріалів у безконусному завантажувальному пристрої (БЗП) лоткового типу доменної печі та їх вплив на формування розподілу матеріалів у колошнику. Актуальність роботи зумовлена недостатньою вивченістю закономірностей руху частинок як по лотку, так і після їх сходу в об'ємі печі, що істотно впливає на ефективність доменного процесу. Для вирішення поставленої задачі використано удосконалену математичну модель, яка описує траєкторію руху окремої частинки з урахуванням дії гравітаційних сил, тертя, кутової швидкості обертання лотка та інших факторів. Розв'язання системи диференціальних рівнянь здійснювалося чисельним методом Рунге–Кутта, що дозволило отримати достовірні залежності переміщення частинок у часі та просторі. На основі проведених розрахунків досліджено вплив основних технологічних і конструктивних параметрів, зокрема кута нахилу та швидкості обертання лотка, гранулометричного складу матеріалів, початкової швидкості частинок, місця їх падіння на лоток, а також швидкості газового потоку в колошнику. Показано, що визначальним фактором радіального розподілу шихти є кут нахилу лотка, зміна якого призводить до значного переміщення гребеня матеріалів від стін до центру печі. Вплив швидкості обертання лотка виявився менш суттєвим і залежить від значення кута нахилу. Встановлено, що тип матеріалу і його гранулометричний склад лише незначною мірою впливають на положення гребеня, що дозволяє використовувати узагальнені залежності для різних компонентів шихти. Особливу увагу приділено аналізу неосьового падіння матеріалів на лоток, яке призводить до виникнення радіальної асиметрії та окружної нерівномірності розподілу шихти. Показано, що цей фактор може суттєво змінювати положення гребеня та умови завантаження печі.

© В. В. Бочка, К. Г. Нізяєв, М. В. Ягольник, К. В. Шмат, М. М. Олексієнко, О. І. Бабенко, 2026

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

Встановлено також, що вплив підйомної сили газового потоку при роботі БЗП є незначним і може не враховуватися в інженерних розрахунках. Досліджено вплив конструктивних особливостей підвіски лотка, зокрема зміни його активної довжини та радіуса обертання, на траєкторії руху частинок і характер розподілу матеріалів у колошнику. У результаті проведених досліджень підтверджено адекватність запропонованої математичної моделі та обґрунтовано можливість її використання для оптимізації режимів роботи безконусних завантажувальних пристроїв. Отримані залежності дозволяють більш обґрунтовано підходити до вибору параметрів завантаження, підвищувати рівномірність розподілу матеріалів у доменній печі та ефективність процесу виплавки чавуну.

Ключові слова: доменна піч, безконусний завантажувальний пристрій, лотковий розподільник, математична модель, розподіл шихти, траєкторія руху.

Посилання для цитування: Дослідження особливостей руху шихти в безконусному завантажувальному пристрої лоткового типу / В. В. Бочка, К. Г. Нізяєв, М. В. Ягольник, К. В. Шмат, М. М. Олексієнко, О. І. Бабенко // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 332-348. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-021>

Вступ

Ефективність сучасної доменної плавки, її продуктивність та питома витрата коксу значною мірою визначаються характером розподілу газового потоку по перерізу печі. Основним важелем керування цим процесом є раціональне розміщення шихтових матеріалів на колошнику. Впровадження безконусних завантажувальних пристроїв (БЗП) лоткового типу відкрило широкі можливості для гнучкого формування топографії поверхні засипу. Проте, оптимізація режимів завантаження потребує глибокого розуміння закономірностей руху компонентів шихти як безпосередньо по розподільчому лотку, так і в об'ємі колошника після їх сходження.

Питанням дослідження кінематики шихтових матеріалів у завантажувальних пристроях доменних печей присвячено велику кількість фундаментальних робіт. Значний внесок у розвиток теорії і практики розподілу матеріалів безконусними апаратами зробили науковці Інституту чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України (ІЧМ) та Українського державного університету науки і технологій (раніше НМетАУ).

Зокрема, фундаментальні дослідження динаміки сходження шихти з лотка та формування гребеня на колошнику відображені у працях В. І. Большакова [1]. Розроблені під його керівництвом методики дозволили формалізувати математичні моделі руху елементарних частинок шихти з урахуванням геометричних параметрів лотка. Питаннями моделювання та експериментального дослідження

поведінки матеріалів безпосередньо на фізичних моделях БЗП активно займалися співробітники кафедри металургії чавуну ДМетІ [2].

Велику увагу оцінці ефективності регулюючих впливів (кута нахилу лотка, швидкості його обертання та порційності) приділяли у своїх роботах А. К. Тараканов та колеги [3], довівши, що зміна кута нахилу є найбільш дієвим фактором впливу на радіальний розподіл рудного навантаження. Закордонний досвід експлуатації та проектування систем типу Paul Wurth детально узагальнено в аналітичних оглядах С. М. Кутнера [4].

У міжнародній практиці математичне моделювання руху шихти в БЗП лоткового типу розвивалося паралельно. Класичні дискретні моделі та підходи до опису руху сипких матеріалів у безконусних апаратах представлені у дослідженнях європейських авторів, зокрема В. Кошек та Л. Брож [5]. Останніми роками для моделювання цих процесів за кордоном активно застосовується метод дискретних елементів (Discrete Element Method — DEM). Так, дослідження таких авторів, як Zhou, Kuang та Yu [6], а також роботи Mio, Komatsu і Shiraiishi [7] присвячені тривимірному DEM-моделюванню траєкторії потоку шихти через розподільчий лоток, що дозволяє враховувати міжчастинкове тертя та реальну форму кусків матеріалу. Проте, складність аналітичного врахування впливу зустрічного газового потоку високої швидкості на дрібні фракції шихти та комплексний профіль поверхні засипу залишає низку питань дискусійними.

Попри наявність значної кількості теоретичних моделей, більшість із них базується на певних спрощеннях (наприклад, представленні частинок у вигляді ідеальних куль або нехтуванні локальною зміною швидкості газів у пристінній зоні). Зокрема, залишається недостатньо вивченим ступінь сумісного впливу швидкості обертання лотка та гранулометричного складу сучасних сировинних матеріалів (модифікованого коксу, високоміцного агломерату й обкотишів) на зміщення гребеня матеріалів відносно осі колошника за умов інтенсивного ходу печі.

Метою даної роботи є дослідження особливостей поведінки та кінематичних закономірностей руху елементарних частинок доменної шихти в безконусному завантажувальному пристрої лоткового типу та в об'ємі колошника за допомогою вдосконаленої математичної моделі, з оцінкою реального впливу газодинамічних сил, геометричних та технологічних чинників.

Методика дослідження

Розподіл матеріалів по перерізу доменної печі при їх завантаженні безконусним завантажувальним пристроєм лоткового типу (БЗП) значною мірою визначається, насамперед, закономірностями руху цих

матеріалів по лотку та після нього – в об'ємі колошника. Як вже відзначалося, попри велику кількість проведених досліджень [1-4] ці закономірності остаточно не вивчені.

З огляду на це були проведені дослідження особливостей поведінки матеріалів у безконусному завантажувальному пристрої при їх завантаженні на колошник печі. Ці дослідження проводили за допомогою математичної моделі, розробленої в [5].

Ця модель описує рух елементарної частинки по нахиленому лотку і далі по поверхні шихтових матеріалів на колошнику доменної печі за умов зустрічного потоку газів. Модель дозволяє визначити вплив різних факторів на положення гребеня щодо осі колошника (γ) при різній висоті зсипання матеріалів (h).

У той же час слід підкреслити, що при описі руху частинок по лотку моделі були прийняті два обмеження, які істотно знижують можливості її застосування для теоретичного аналізу. Наведені у моделі рівняння справедливі тільки для випадків падіння частинок на лоток строго по осі колошника, а також, коли частка при русі по нахиленому лотку незначно відхиляється від його поздовжньої вісі, що має місце при малих швидкостях обертання лотка. За реальних параметрів роботи БЗП похибка визначення функції $\gamma = f(h)$ різко зростає.

Для усунення зазначених недоліків наведеної математичної моделі рівняння руху частинок по лотку були представлені у загальному вигляді. У системі координат лотка напівкруглого перерізу, що наведено на рис. 1, ці рівняння руху мають такий вигляд:

$$d^2x/dt^2 = g \cdot \sin\alpha - 2 \cdot \omega \cdot (dz/dt) \cdot \cos\alpha + \omega^2 \cdot x \cdot \cos\alpha - \\ - \omega^2 \cdot (-R + \sqrt{R^2 - z^2}) \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha - ((dx/dt)/|dp/dt|) \cdot \eta \cdot n \cdot \bar{F}, \quad (1)$$

$$y = -R + \sqrt{R^2 - z^2}, \quad (2)$$

$$d^2z/dt^2 = 2 \cdot \omega \cdot (dz/dt) \cdot (z/\sqrt{R^2 - z^2}) \cdot \sin\alpha + 2 \cdot \omega \cdot (dx/dt) \cdot \cos\alpha + \\ + \omega^2 \cdot z - n_z \cdot \bar{F} - ((dx/dt)/|dp/dt|) \cdot \eta \cdot n \cdot \bar{F}, \quad (3)$$

$$\bar{F} = (g \cdot \cos\alpha + 2\omega \cdot (dz/dt) \cdot \sin\alpha - \omega^2 \cdot x \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha + \\ + \omega^2 \cdot (-R + \sqrt{R^2 - z^2}) \cdot \sin^2\alpha) \cdot \sqrt{1 - (z/R)^2} + \\ + (2\omega \cdot (dz/dt) \cdot z/\sqrt{R^2 - z^2} \cdot \sin\alpha + 2\omega \cdot (dx/dt) \cdot \cos\alpha + \omega^2 \cdot z) \cdot z/R, \quad (4)$$

$$n_z = z/R, \quad (5)$$

$$|dp/dt| = \sqrt{((dx/dt)^2 + (dz/dt)^2 \cdot R^2/(R^2 - z^2))}, \quad (6)$$

де α – кут нахилу лотка до горизонтальної площини, град.; ω – кутова швидкість обертання лотка, с⁻¹; R – радіус лотка, м; η – коефіцієнт тертя;

p – вектор положення частки у системі координат лотка (x, y, z); t – час, с; t_0 – початковий час перебування частки на лотку, с; t_y – час проходження часткою гирла лотка, с; x_y – активна довжина лотка (відстань гирла лотка від точки O), м.

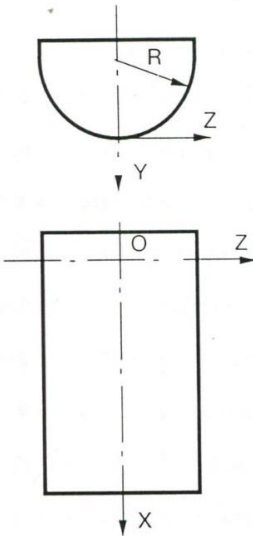


Рисунок 1 – Схема системи координат лотка.

Додаткова система рівнянь дозволяє визначати характер залежності $p = f(t)$ для частки, яка під час t_0 знаходиться в будь-якому місці напівкруглої площини лотка та виконує умову $nF > 0$. Якщо частка при русі залишає лоток через його гирло, а не через бічну стінку, час t_y є найменшим рішенням рівняння $x(t) = x_y$, при котрій виконується умова $t_y > t_0$.

Рішення системи диференціальних рівнянь здійснювалося шляхом Рунге – Кутта.

Вихідні дані та результати дослідження

За допомогою даної математичної моделі було вивчено вплив виду матеріалів та їх гранулометричного складу, швидкості обертання та кута нахилу лотка, початкової швидкості руху шматків на лотку та місця їх падіння на нього щодо осі обертання, швидкості газів, конструктивних особливостей підвіски лотка та ін. на характер зміни функцій $z = f(x)$ по лотку та відстань частинки від осі печі при її падінні з різної висоти в об'ємі колошника.

Розрахунки виконувались стосовно умов роботи доменної печі $V_k - 1260 \text{ м}^3$. Як вихідні дані використовували характеристики реальних шихтових матеріалів, конструктивні розміри та параметри роботи

безконусних завантажувальних пристроїв різних конструкцій. Адекватність моделі оцінювали шляхом порівняння розрахункових величин з фактичною відстанню гребеня від осі колошника прототипа БЗП лоткового типу.

На рисунку 2 наведені розрахункові залежності $\gamma = f(h)$ для коксу, агломерату і окатишів при їх завантаженні в піч лотковим розподільником з кутами нахилу лотка 42, 48 і 63 град, і швидкістю його обертання 8 об/хв. Видно, що мінімальна різниця між розрахунковими величинами отримана у окатишів незалежно від кута нахилу лотка. Це свідчить про те, що їхній рух найбільшою мірою відповідає ідеалізованому руху матеріалів, прийнятому в математичній моделі.

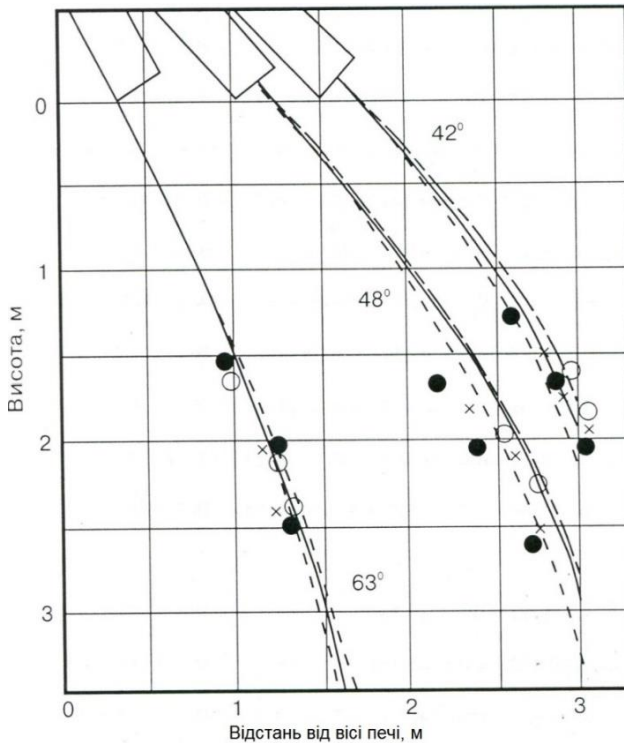


Рисунок 2 – Порівняння результатів розрахунків та вимірювань на фізичній моделі БЗП: ---, ● - кокс; ---, x - агломерат; -○-, ○ - окатиші. Цифри у кривих (тут і на рис. 3, 5 та 6) – кут нахилу лотка, град

Високий ступінь збігу розрахункових та вимірених величин має місце у коксу та агломерату при куті нахилу лотка 63 град. При

зменшенні кута нахилу лотка до 48 і 42 град, зазначена різниця для цих матеріалів дещо зростає, що пояснюється насамперед похибками виміру віддаленості гребеня від осі моделі колошника. Справа в тому, що місце розташування видимого гребеня матеріалів у моделі колошника визначається не тільки місцем падіння частинок, а й профілем засипу, віддаленістю від стін печі, швидкістю та енергією падаючих частинок у місці падіння, властивостями сипких матеріалів та ін. Тому точно виміряти положення гребеня коксу та агломерату при кутах нахилу лотка 48 і 42 град, дуже складно. Проте аналіз даних, наведених на малюнку, показує, що математична модель загалом задовільно описує процес руху матеріалів з лотка БЗП на поверхню засипу, і її використання може бути корисним при оцінці та виборі необхідних параметрів завантаження компонентів шихти в доменну піч.

Для вивчення впливу виду матеріалу на вигляд функції $g = f(h)$ були обрані частинки агломерату крупністю 10-25 мм, коксу 25-55 мм і окатишів 10-15 мм. Розрахунки показали, що вид матеріалу та його гранулометричний склад впливають на положення частинок щодо осі колошника порівняно слабо. Причому цей вплив залежить від кута нахилу лотка, швидкості обертання, рівня засипу і т.п.

Збільшення крупності матеріалів у зазначених межах при рівнях засипу 1,5-2,0 м сприяє переміщенню гребеня до стінки колошника на 1-3 см (великі значення відповідають мінімальному куту нахилу лотка, менші – максимальному куту нахилу лотка). При цьому слід підкреслити, що при цих параметрах завантаження різниця між положенням гребеня рудних матеріалів також становила незначну величину і у коксу була мінімальною (< 3 см) при кутові нахилу - 63 град., збільшуючись до 10 см при куту нахилу - 42 град, і найбільшому розмірі шматка. Важливим є те, що гребінь коксу був завжди дещо ближчим до центру печі. Таким чином, наведені розрахунки свідчать про можливість представлення руху різних компонентів доменної шихти об'ємом колошника однією функцією $g = f(h)$.

На рисунку 3 наведено вплив кута нахилу лотка (43-46 град.) та швидкості його обертання (0-8 об/хв) на характер руху частинок матеріалів по лотку (а) та після відриву від нього до зустрічі з поверхнею засипу на колошнику доменної печі (б). Розрахунки виконували за умови падіння частки на лоток строго по вісі колошника (координати точки падіння в системі координат лотка $x=0$; $z=0$). Видно, що зі зміною кута нахилу лотка та швидкості його обертання суттєво змінюються умови руху частинок як у площині лотка (криві $z = f(x)$), так і в обсязі колошника (криві $g = f(x)$). Так, після початку руху з точки О частка деякий час переміщається у бік гирла лотка, що обертається, строго по осі Ох ($z = 0$). Відстань, пройдена часткою за цей час,

становить $(0,1 - 0,25)t_y$, причому вона тим більша, чим більший кут нахилу лотка і менше швидкість обертання лотка. При подальшому русі частинка починає відхилятися від осі O_x у бік осі O_z . Мінімальна величина цього відхилення відповідає 63 град. Слабкий вплив швидкості обертання у даному випадку пояснюється малим часом перебування частинки на лотку, невеликою величиною t_y і високою швидкістю руху частинок. Зі зменшенням або збільшенням швидкості обертання до 8 об/хв відхилення частки від вісі O_x істотно зростає.

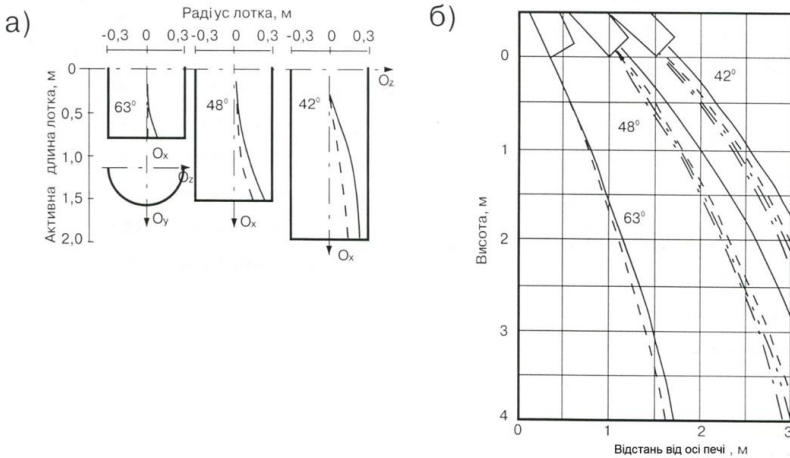


Рисунок 3 – Взаємозв'язок кута нахилу лотка та швидкості обертання з характером руху частинок по лотку (а) та положенням гребеня (б) на колошнику: ----- 8 об/хв; — 4 об/хв; - - - 2 об/хв; - · - 0 об/хв

У той самий час слід відзначити різний характер зміни кривої $z = f(x)$ для кутів 48 і 42 град. Якщо при $\alpha_{л}$ - 48 град, зі збільшенням часу перебування частки на лотку аж до ту величина z істотно зростає, то для $\alpha_{л}$ - 42 град, аналогічне зростання z спостерігається тільки при проходженні відстані, що дорівнює $(0,65 - 0,75)t_y$. Потім це зростання припиняється. В результаті цього напрямку векторів швидкості руху частинок в момент їх сходу з лотка для $\alpha_{л}$ - 48 і 42 град значно відрізняються. Максимальний кут між вектором швидкості та віссю O_x відповідає $\alpha_{л}$ - 48 град. Для $\alpha_{л}$ - 42 град вектор швидкості спрямований практично паралельно осі O_x на деякій відстані (z) від неї.

Різна орієнтація вектора швидкості частинок в гирлі лотка помітно впливає на характер укладання матеріалів в обсязі колошника, що підтверджується видом кривих $\gamma = f(x)$ на рисунку 3 б. Видно, що збільшення $\alpha_{л}$ з 42 до 63 град, при незмінній швидкості обертання, призводить до значного переміщення гребеня матеріалів від стін до

центру колошника. Так, при $h = 2$ м. це переміщення склало більше 1,5 м. Збільшення швидкості обертання від 0 до 8 об/хв при постійному $\alpha_{\text{л}}$ призводить до дуже обмеженого зміщення гребеня до стінок печі. Однак ефективність впливу збільшення цієї швидкості на положення гребеня ще залежить від кута нахилу лотка, а також від абсолютного значення цієї швидкості. Найбільший вплив збільшення швидкості обертання лотка на положення гребеня щодо осі проявляється при $\alpha_{\text{л}} - 48$ град. Так, наприклад, при $h = 2$ м збільшення швидкості обертання лотка з 4 до 8 об/хв призводить до переміщення гребеня матеріалів у бік стінки колошника при $\alpha_{\text{л}} - 48$ град, на 0,35 м, в той час як при $\alpha_{\text{л}} - 42$ град. - Тільки на 0,3 м. При швидкостях обертання менше 4 об/хв вплив цієї швидкості на положення гребеня істотно слабшає.

Несуттєвий вплив швидкості обертання, незалежно від її величини, при куті нахилу лотка 63 град. Аналіз наведених даних показує, що найбільш ефективним способом переміщення гребеня радіусом колошника при використанні БЗП є зміна кута нахилу лотка. При цьому швидкість обертання необхідно підтримувати постійною та по можливості максимальною, що сприяє досягненню високого рівня рівномірності окружного розподілу матеріалів.

На рисунку 4 наведено вплив швидкості газу на характер падіння частинок коксу та агломерату різної крупності після їхнього відриву від лотка. Видно, що вплив підйомної сили газу на положення частинок в об'ємі колошника суттєво проявляється тільки у частинок агломерату $d < 0,001$ м і швидкості газу 8 м/с і більше, і частинок коксу крупністю $< 0,001$ м при швидкості газу 4,0 м/с. Слід зазначити, що швидкість газу на колошнику доменних сучасних печей становить 1,5-2 м/с. При завантаженні шихти в піч з конуса, внаслідок перекриття потоком шихти шляху руху газів, при проходженні через намет, що утворився з шихтового потоку, швидкість газу зростає до 8-10 м/с. При зсіпанні шихти з лотка переріз потоку шихти зневажливо мало порівняно з перерізом колошника. Тому суттєвого збільшення швидкості газів в обсязі колошника відбутися не може. За цих умов вплив підйомної сили газів на характер падіння шихти в печі дуже незначний. Отримані результати показують, що на відміну від конусного апарату, при завантаженні шихти в піч БЗУ впливом швидкості газу на положення гребеня можна знехтувати.

Початкова швидкість матеріалів на лотку визначається насамперед розмірами БЗП, ступенем відкриття шихтового затвора та кутом нахилу лотка. Для досліджуваного апарату вплив початкової швидкості вивчали під час розвантаження коксу крупністю 0,040 м.

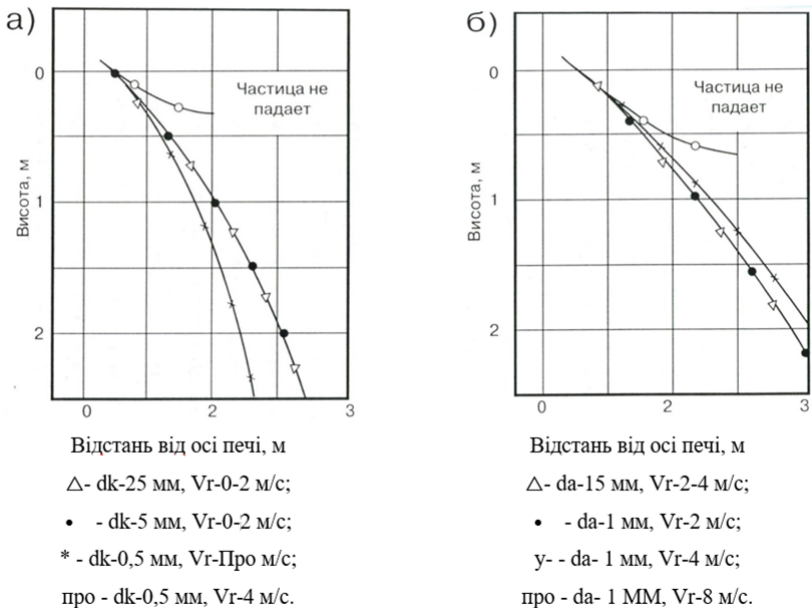


Рисунок 4 – Вплив швидкості газу на падіння частинок коксу (а) та агломерату (б) різної крупності в об'ємі колошника (кут нахилу лотка 42 град.): dk і da - діаметр шматків коксу та агломерату, мм; Vr - швидкість газу.

Початкову швидкість коксу розраховували при величинах відкриття шихтового затвора 0,330 і 0,400 м. У цих умовах ця швидкість складала при $\alpha_{л}$ - 42 град, приблизно 3,90 і 4,90 м/с, ал - 48 град. - 4,38 та 5,42 м/с, при $\alpha_{л}$ - 83 град. - 8,00 та 7,00 м/с. Розрахунки показали, що збільшення початкової швидкості в зазначених межах при $\alpha_{л}$ - const призводить до деякого зміщення положення гребеня до стінки печі. Однак величина цього усунення - дуже невелика і залежить від кута нахилу лотка. Так, при рівнях засипу < 2,0 м максимальне зміщення гребеня не перевищувало 0,1 м, та й то лише за $\alpha_{л}$ - 42 град.

Зі збільшенням кута нахилу лотка величина цього усунення суттєво знижується. Дослідження, виконані на ДП-9 меткомбінату «Криворіжсталь», свідчать про те, що при випорожненні бункера через шихтовий затвор з незмінним кутом його відкриття швидкість закінчення матеріалів змінюється в значно вужчих межах. Тому вплив даного фактору на рух матеріалів по лотку з незмінним кутом нахилу і далі в печі незначний, і його можна не брати до уваги при виборі режиму роботи БЗП. Збільшення кута нахилу лотка при постійному ступені відкриття затвора (а, отже, і швидкості закінчення) призводить до

значного збільшення початкової швидкості матеріалів на лотку за рахунок збільшення висоти падіння шматків на лоток, що визначається конструкцією механізму підвіски та переміщення лотка при зміні кута нахилу. Така зміна початкової швидкості враховується моделлю і позначається на траєкторії руху шматків по лотку та обсяг колошника.

Шихтові матеріали в БЗП падають на лоток через вертикальну трубу, вісь якої збігається з віссю обертання та доменної печі. Причому рух шматків матеріалів у цій трубі може здійснюватися як по осі, так і на деякій відстані від неї (односторонній рух). Наведені раніше розрахунки було виконано лише для умов осьового падіння шматків на лоток. У той самий час математична модель дозволяє розглядати і неосьове падіння шматків на лоток. Тому, поряд з дослідженнями, в яких приймалося осьове падіння частки на лоток (координати $x = 0$; $z = 0$), були вивчені особливості руху матеріалів на лотку та після сходу з нього при падінні частинок на лоток на деякій відстані від осі обертання.

На рисунку 5, відповідно *a* та *б*, наведено зміну функції $z = f(x)$ і функції $\gamma = f(h)$ для двох варіантів падіння частинок на відстані 0, м від осі колошника.

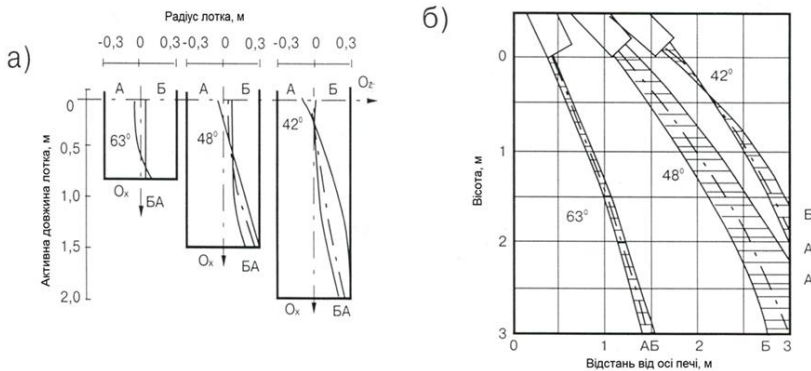


Рисунок 5 – Вплив місця падіння на рух частинок по лотку (а) та положення гребеня щодо осі печі (б): А, Б - місця падіння частинок на лоток.

Розрахунки виконувалися для лотка з радіусом 0,3 м., кутами його нахилу 42, 48 і 63 град, і швидкості обертання 8 об/хв при завантаженні частинки агломерату $d = 0,02$ м. При цьому криві $z = f(x)$, які починалися в точці з $b = 0$ і м. ім криві $\gamma = f(h)$ позначені буквою "А". Літерою "Б" позначені аналогічні криві, які починаються в точці з координатами $z = 0$; $z = 0,06$ м. Для порівняння на цьому малюнку наведені відповідні криві для осьового падіння частинок.

Як видно, місце падіння частинки на лоток, що обертається, істотно впливає на її рух як по самому лотку (а), так і в обсязі колошника (б).

Частинки які падають з одного та іншого боку від осі обертання, починають свій рух по лотку з наближення до осі Ox по кривих, які перетинаються на деякій відстані від точки O . Ця відстань для умов дослідження склала $(0,15 - 0,35)$ x_0 і було тим більше, чим більше α_n .

Надалі форма кривої $z = f(x)$ залежить від координати точки падіння частки.

При зміщенні лінії падіння матеріалів від осі обертання у бік руху лотка ($z = - 0,06$ м) крива $z = f(x)$ має вигляд, близький до осьового попадання частинок на лоток. Однак при цьому має місце значне відхилення цієї частинки від осі Ox у бік осі Oz . Якщо ж точка падіння зміщується в протилежну від осі сторону ($z = 0,06$ м), то крива $z = f(x)$ має більш складний характер з меншим (у порівнянні з осьовим) відхиленням частинки, що рухається по осі Ox у бік осі Oz .

Зазначені особливості руху частки по лотку при різному місці її падіння на нього впливають на характер кривих $\gamma = f(h)$ (рисунком 5б). Причому цей вплив дуже залежить від кута нахилу лотка. Максимальний вплив даного фактору має місце при $\alpha_n - 48$ град. У цьому випадку зміщення точки падіння частинки на лоток у бік його руху призводить до переміщення гребеня у бік стінки при рівнях засипу $1,5-2,0$ м на $0,25-0,35$ м (порівняно з $\gamma = f(h)$ для осьового падіння частинки). Якщо ж частка падає з іншого боку від осі за тих самих умов, то гребінь переміщається стосовно кривої $\gamma = f(h)$ для осьового падіння у бік центру колошника на $0,1-0,15$ м.

Дещо слабше цей вплив проявляється при $\alpha_n - 42$ град., Що пов'язано з причинами, аналогічними впливу швидкості обертання лотка. При куті нахилу лотка 63 град. вплив неосевого падіння частинок на лоток практично не позначається.

При постійному вугіллі нахилу зміщення точки падіння частинок щодо осі обертання тільки по осі Ox ($x = 0,06$ м; $\gamma = 0$) і ($x = - 0,06$ м; $z = 0$) надає аналогічний вплив на характер кривих $\gamma = f(h)$, хоча при цьому рух частинок по лотку практично не відрізняється від їх руху при осі. Вирішальний вплив на положення функції $\gamma = f(h)$ в даному випадку відрізняють активну довжину лотка x_1 і початкової швидкості частинок V_0 . При початку руху частинки з точки з координатами ($x = 0,06$ м і $z = 0$) за рахунок зменшення x_1 і збільшення V_0 вони залишають лоток з більшою швидкістю (порівняно з осьовим), в результаті гребінь матеріалів дещо зсувається до стінки печі.

Якщо ж рух частинок починається з точки за віссю обертання (координати $x = - 0,06$ м і $z = 0$), то збільшується x_1 і зменшується V_0 . В результаті швидкість частинки в гирлі лотка буде нижчою, ніж при осьовому падінні, а, отже, крива $\gamma = f(h)$ переміститься трохи ближче до центру печі. Зазначене явище проявляється тим сильніше, що менше кут

нахилу лотка.

Неосьове падіння матеріалів істотно впливає на час перебування частки на лотку. У розглянутих випадках цей час змінювалося на 0,04 – 0,15 с. В цьому випадку при постійній кутовій швидкості обертання лотка в кожен сектор колошника потраплятиме різна кількість матеріалів.

Сектори, над якими знаходиться лоток, що обертається, з мінімальним часом перебування частинок на ньому, будуть завантажуватися великою кількістю цих частинок. Якщо час перебування частинок на лотку буде максимальним, то в сектори, над якими знаходиться в цей час лоток, потраплятиме мінімальна кількість частинок. В результаті по колу колошника матиме місце певна нерівномірність у розподіл кількості частинок матеріалів. Причому ця нерівномірність буде тим більше, ніж менше кут нахилу та швидкість обертання лотка. Ці дані підтверджуються експериментально [2].

Отже, аналіз наведених даних показує, що неосьове падіння частинок на лоток, що обертається в одному напрямку, сприяє утворенню систематичної асиметрії у розподілі матеріалів за діаметром та нерівномірності у розподілі матеріалів по колу колошника.

Зменшенню негативного впливу цього фактору сприятимуть зміна напрямку обертання лотка та завантаження матеріалів по осі печі, що досягається встановленням бункера осі печі.

Особливість конструкції підвіски лотка, визначальна характер його переміщення обсягом колошника, також впливає вигляд функції $\gamma = f(h)$. Це перш за все різницею у величинах активної довжини лотка. На рисунку 6 наведена залежність активної довжини лотка від кута його нахилу для двох типів підвіски розподільника, що обертається. Суцільна лінія відповідає конструкції БЗП, у якого при зміні кута нахилу лотка його гирло переміщається майже горизонтальною лінією. Пунктирна лінія відноситься до БЗП, у якого гирло лотка при зміні кута його нахилу переміщається дугою. Видно, що активна довжина лотка збігається в обох конструкціях лише за мінімального вугілля нахилу (42 град).

При збільшенні кута нахилу лотка БЗП різних типів збільшується і різниця в радіусі обертання гирла лотка. Так, якщо у I - го типу БЗП радіус обертання становив для α_n - 42, 48, 63 град., відповідно 1,5; 1,0 і 0,35 м, то у II - го типу БЗП він дорівнював 1,5; 1,3 та 0,8 м.

Вплив зазначених особливостей конструкції БЗП на характер руху матеріалів обсягом можна оцінити по кривим $\gamma = f(h)$, розрахованим за допомогою математичної моделі та наведеним на малюнку. Дані залежності практично збігаються тільки для α_n - 42 град.

Для великих кутів нахилу лотка залежності $\gamma = f(h)$ для типів БЗУ, що розглядаються, починають суттєво відрізнятися. У II-го типу БЗП, в

порівнянні з І-м, при $\alpha_n > 42$ град, і тому самому рівні засипу гребінь матеріалів завжди розташовується ближче до стінки печі, що пояснюється зазначеним вище впливом збільшення активної довжини лотка і радіуса обертання його гирла. Тому, як показують розрахунки, для досягнення одного і того ж положення гребеня (рівень засипу - const) у проміжній і центральній зонах колошника завантаження матеріалу за допомогою БЗП II-го типу необхідно проводити з кутами нахилу лотка, що обертається більшими, ніж у БЗП I-го типу. Останнє необхідно враховувати при організації завантаження матеріалів з використанням БЗП лоткового типу різних конструкцій.

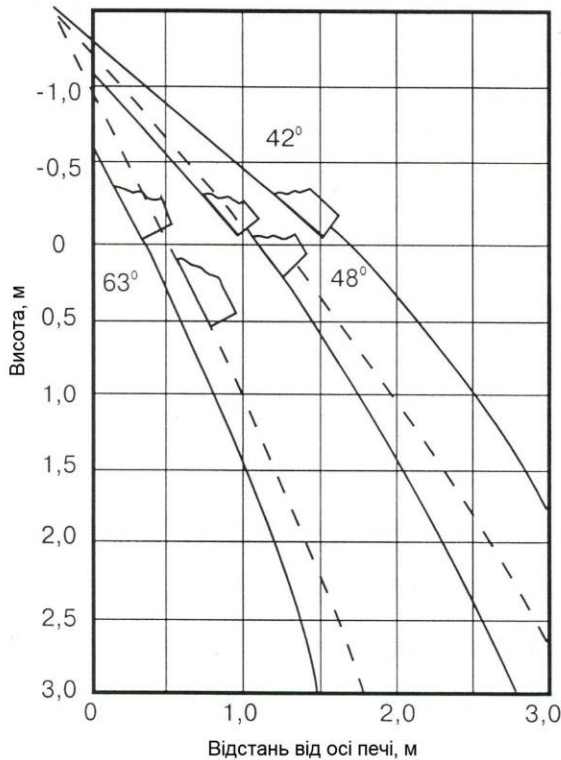


Рисунок 6 – Вплив способу підвіски лотка на величину його активної довжини та рух частинок в обсязі колошника: — лоток конструкції Чеської Республіки; - - лоток фірми P. Wurth.

Висновки

1. Розроблена та вдосконалена математична модель руху шихтових матеріалів у безконусному завантажувальному пристрої забезпечує адекватний опис траєкторій частинок на лотку та в об'ємі колошника і може бути використана для інженерних розрахунків режимів завантаження.

2. Встановлено, що основним керуючим параметром радіального розподілу матеріалів є кут нахилу лотка, зміна якого забезпечує найбільш ефективне регулювання положення гребеня шихти від периферії до центру печі.

3. Показано, що швидкість обертання лотка та фізико-механічні властивості матеріалів у досліджених межах мають обмежений вплив на положення гребеня, однак визначають рівномірність окружного розподілу, що обґрунтовує доцільність підтримання стабільних режимів обертання.

4. Доведено, що неосьове падіння матеріалів на лоток є головною причиною виникнення радіальної асиметрії та окружної нерівномірності розподілу шихти, а зменшення цього ефекту можливе за рахунок організації осьової подачі та реверсивного обертання лотка.

5. Встановлено, що вплив газового потоку та початкової швидкості матеріалів за умов роботи БЗП є незначним, тоді як конструктивні особливості лотка суттєво впливають на параметри розподілу і повинні враховуватися при виборі режимів завантаження доменної печі.

Перелік посилань

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

2. Бочка В. В. Исследование распределения шихтовых материалов в модели бесконусного аппарата. Сообщение 2. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1980. № 6. С. 17–20.

3. Исследование эффективности регулирующих воздействий при управлении распределением шихты в доменной печи с использованием БЗП лоткового типа / А. К. Тараканов, В. В. Федоров, Х. Б. Пятница и др. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1986. № 8. С. 14–17.

4. Кутнер С. М. Эксплуатация доменных печей с бесконусным загрузочным устройством за рубежом. *Обзорная информация института «Черметинформация»*. Сер. 4. Вып. 2. 1979. 25 с.

5. Matematicky model pohybu vsázkorých surovin v bezzvonově sasebně / В. Koček, V. Vočka, L. Brož, I. Mrazek // *Hutnické Listy*. 1982. № 11. S. 765–771.

6. Zhou, Z. Y., Kuang, S. B., & Yu, A. B. (2014). Discrete element simulation of the burden distribution in a blast furnace. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(19), 8267–8277. <https://doi.org/10.1021/ie500473m>

7. Mio, H., Komatsu, N., & Shiraiishi, N. (2009). Numerical analysis of burden particle trajectory in bell-less charging system of blast furnace by discrete element

method. *ISIJ International*, 49(4), 488–496.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.488>

References

1. Bolshakov, V. I., Zaremba, A. Yu., & Salo, A. S. (1984). Metodika rascheta parametrov skhoda shikhty s raspreditel'nogo lotka. In: *Voprosy proizvodstva chuguna v domennykh pechakh* (pp. 60–64). Metallurgiya.
2. Bochka, V. V. (1980). Issledovanie raspredeleniya shikhtovykh materialov v modeli beskonnusnogo apparata. Soobshchenie 2. *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgiya*, 6, 17–20.
3. Tarakanov, A. K., Fedorov, V. V., Pyatnitsa, Kh. B., et al. (1986). Issledovanie effektivnosti reguliruyushchikh vozdeystviy pri upravlenii raspredeleniem shikhty v domennoy pechi s ispolzovaniem BZP lotkovogo tipa. *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgiya*, 8, 14–17.
4. Kutner, S. M. (1979). *Ekspluatatsiya domennykh pechey s beskonnusnym zagruzochnym ustroystvom za rubezhom* (Ser. 4, Issue 2). Chernetinformatsiya.
5. Koček, B., Bočka, V., Brož, L., & Mrazek, I. (1982). Matematicky model pohybu vsázkových surovin v bezzvonové sásce. *Hutnicke Listy*, 11, 765–771.
6. Zhou, Z. Y., Kuang, S. B., & Yu, A. B. (2014). Discrete element simulation of the burden distribution in a blast furnace. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(19), 8267–8277. <https://doi.org/10.1021/ie500473m>
7. Mio, H., Komatsu, N., & Shiraishi, N. (2009). Numerical analysis of burden particle trajectory in bell-less charging system of blast furnace by discrete element method. *ISIJ International*, 49(4), 488–496. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.488>

V. V. Bochka¹, D. Sc. (Tech.), Prof., ORCID 0000-0002-4935-0779

K. H. Niziaiev¹, D. Sc. (Tech.), Prof., ORCID 0000-0002-9260-0964

M. V. Yaholnyk^{1,*}, Ph. D., Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2686-8601

K. V. Shmat¹, Assistant

M. M. Oleksiienko¹, Ph. D. Student

O. I. Babenko¹, Student

¹ *Ukrainian State University of Science and Technologies*

* *Corresponding author: m.v.yaholnyk@ust.edu.ua*

RESEARCH OF THE FEATURES OF THE CHARGING MOVEMENT IN A CONELESS CHARGING DEVICE OF A TRAY-TYPE

Abstract. The article considers the features of the motion of charge materials in a coneless charging device (CCD) of a tray-type blast furnace and their influence on the formation of the distribution of materials in the top. The relevance of the work is due to the insufficient study of the patterns of particle motion both along the tray and after their descent in the volume of the furnace, which significantly affects the efficiency of the blast furnace process. To solve the problem, an improved mathematical model was used that describes the trajectory of motion of an individual particle taking into account the action of gravitational forces, friction,

angular velocity of rotation of the tray and other factors. The solution of the system of differential equations was carried out by the numerical Runge–Kutta method, which allowed obtaining reliable dependences of particle motion in time and space. Based on the calculations, the influence of the main technological and design parameters was investigated, in particular the inclination angle and rotation speed of the tray, the granulometric composition of the materials, the initial velocity of the particles, the place of their fall on the tray, as well as the velocity of the gas flow in the top. It was shown that the determining factor of the radial distribution of the charge is the inclination angle of the tray, the change of which leads to a significant movement of the ridge of materials from the walls to the center of the furnace. The influence of the rotation speed of the tray turned out to be less significant and depends on the value of the inclination angle. It was established that the type of material and its granulometric composition only slightly affect the position of the ridge, which allows the use of generalized dependencies for different components of the charge. Special attention was paid to the analysis of the non-axial fall of materials onto the tray, which leads to the emergence of radial asymmetry and circumferential unevenness of the charge distribution. It was shown that this factor can significantly change the position of the ridge and the conditions of loading the furnace. It was also established that the influence of the lifting force of the gas flow during the operation of the blast furnace is insignificant and may not be taken into account in engineering calculations. The influence of the design features of the tray suspension, in particular changes in its active length and radius of rotation, on the trajectory of particle movement and the nature of the distribution of materials in the furnace was investigated. As a result of the conducted studies, the adequacy of the proposed mathematical model was confirmed and the possibility of its use for optimizing the operating modes of coneless loading devices was substantiated. The obtained dependencies allow a more reasonable approach to the selection of loading parameters, to increase the uniformity of the distribution of materials in the blast furnace and the efficiency of the pig iron smelting process.

Key words: blast furnace, coneless loading device, tray distributor, mathematical model, charge distribution, trajectory of movement.

For citation: Bochka, V. V., Niziaiev, K. H., Yaholnyk, M. V., Shmat, K. V., Oleksienko, M. M., & Babenko, O. I. (2026). Research of the features of the charging movement in a coneless charging device of a tray-type. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40, 332-348. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-021>

Рукопис надійшов до редакції / Received 01.03.2026

Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026

Опубліковано / Published 30.05.2026