

**МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ДРОБЛЕНОЇ РУДИ ВЗДОВЖ КОНВЕЄРНОЇ СТРІЧКИ ПРИ РОЗВАНТАЖЕННІ БУНКЕРІВ**

**Вступ.** В чорній металургії України більшу частину сировини отримують збагаченням бідних залізних руд, де їх подрібнення є найбільш витратним технологічним процесом, що здійснюється в барабанних млинах. Непідтримання необхідних режимів роботи млина в певних технологічних умовах завдає значних економічних збитків, що не відповідає положенням Державної науково-технічної програми «Ресурсозберігаючі технології нового покоління в гірничо-металургійному комплексі». Враховуючи те, що вихідна руда сильно впливає на стан технологічного агрегату і точнісні характеристики конвеєрних вагів, дослідження розподілу дробленої руди вздовж конвеєрної стрічки, яка живить кульовий млин, є актуальним. На актуальність розв'язання цих задач звертається увага в роботі [1], де сказано, що зниження енергоємності процесів подрібнення та підвищення технологічної ефективності подрібнення необхідно розглядати як найбільш важливу складову на шляху ідентифікації рудопідготовки. Одним з основних напрямів є критичний аналіз переваг і недоліків існуючого технологічного обладнання з метою виявлення можливостей подальшого покращення його показників, у тому числі завдяки оптимізації конструкції та технологічних схем, удосконалення режимів подрібнення та автоматичного управління [2]. Зокрема, ефективність запропонованого пристрою автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням [3] значно зменшується завдяки невизначеному впливу вхідного рудного потоку, який формується в процесі розвантаження бункерів, як на конвеєрні ваги, так і на кульовий млин.

Проблему розвантаження бункерів з сипким матеріалом розв'язують давно, досягнуті вагомні результати. Увага приділяється статичі і динаміці сипких середовищ, вільному витіканню сипких тіл, фізико-механічним властивостям матеріалу, ймовірності утворення склепіння при витіканні сипкого матеріалу, розрахунки полів напруг в нерухомому шарі сипкого матеріалу, розподілу тиску матеріалу на підпірну стінку та ін. Здійснюються спроби покращення запропонованих раніше залежностей [4, 5, 6]. Удосконалюються наближені методи [7, 8] визначення розподілу тиску сипкого матеріалу в бункерах. Сама сучасна математична модель витікання сипкого матеріалу [9] передбачає, що у верхній циліндричній частині бункера швидкість і об'ємна густина матеріалу залишаються незмінними і змінюються лише на конічній ділянці в зоні розвантаження. Удосконалена математична модель [10] має обґрунтовану конструкцію конічної частини бункера. Теорія даної моделі та раніше розроблених і експериментально перевірених теоретичних положень стосуються добре сипучої речовини – це сипкий матеріал, який має невелику вологість і малий вміст тонких фракцій. Почали досліджуватись процеси витікання сипких однорідних матеріалів, наприклад, вапна, цементу, піску, гіпсу [11]. В той же час дослідженню витікання з бункерів сипкого фракційного матеріалу зі значним вмістом дрібних класів, до якого відносяться дроблені руди, уваги практично не приділялось.

Метою даної роботи є дослідження витікання з бункера сипкого матеріалу зі значним вмістом дрібних класів та розподілу його вздовж конвеєрної стрічки шляхом математичного моделювання процесу за умов різних характеристик крупності.

**Викладення основного матеріалу досліджень.** Живлення кульових млинів дробленою рудою здійснюють відповідно технологічному ланцюгу – бункер, живильник, стрічковий конвеєр, конвеєрні ваги, кульовий млин. У бункери подають дроблену руду, яка є кінцевим продуктом дробильної фабрики. В залежності від стану дробильного обладнання, властивостей руди цей продукт відрізняється за крупністю. Його звичайно подають як складений з окремих класів крупності з середнім розміром шматків руди з такими значеннями: 0,025; 0,04; 0,05; 0,07; 0,16; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 15; 20 мм. Конкретний матеріал відрізняється вмістом окремих класів крупності. Крупність і міцність матеріалу визначають продуктивність кульового млина по руді. Для сучасного обладнання її середнє значення може дорівнювати 50 кг/с (180 т/год). Дану продуктивність забезпечує живильник, який подає з бункера дроблений матеріал на стрічку конвеєра. Для дозування шматкового матеріалу використовують ряд конструкцій живильників. На залізорудних збагачувальних фабриках розповсюдження отримали телескопічні (труба в трубі) та віброживильники. Вони рівномірно розвантажують матеріал, не спотворюючи характеристику крупності. Тому можливо стверджувати, що характер розподілу дробленої руди вздовж конвеєрної стрічки цілком визначається особливістю її витікання з бункера. З таким розподілом він поступає на конвеєрні ваги і в кульовий млин.

Дроблений матеріал, що подається у бункери збагачувальних фабрик, характеризують насипною масою, коефіцієнтом розпушування, кутом природного схилу. Крім того, він володіє властивістю сегрегації, яка полягає в тому, що більш крупні шматки скочуються в процесі руху на периферію, а дрібні залишаються в зоні завантаження. При транспортуванні руди на стрічкових конвеєрних більш дрібні фракції розташовуються ближче до поверхні стрічки, а крупні знаходяться на поверхні потоку. Оцінюючи особливості сипкого матеріалу доцільно виділити дрібні фракції, що не відрізняються великою рухливістю. До них необхідно віднести всі малорозмірні, включаючи 3 мм. При завантаженні вони в основному заповнюють центральну частину бункера. В процесі завантаження бункера діаметром  $D_b$  сипким матеріалом створюється по його осі конус, як це показано на рис. 1,а. Матеріал розташовується під кутом природного схилу  $\alpha_{ps}$ . Більш-менш ідеалізований процес сегрегації частинок однакової крупності у різних класах формує у нормальному поперечному перерізі циліндричного бункера концентричні кільця, складені з матеріалу різної крупності, яка від найбільшого значення біля стінки зменшується до центральної частини. Границею цих кільцевих елементів виступають вказані на рис. 1,а значення діаметрів –  $D_b$ ,  $D_5$ ,  $D_{10}$ ,  $D_{15}$  відповідно дрібного матеріалу та руди крупністю 5, 10 і 15 мм. Розміри вказаних діаметрів кілець визначаються вмістом різних класів крупності у складі руди. В умовах гірничо-збагачувальних комбінатів вміст класів крупності у дробленому матеріалі не однаковий, тому значення перерахованих діаметрів є випадковою величиною. Моделюванням встановлено, що для одного з типів руди, що має осереднені характеристики і переробляється магнітозбагачувальною фабрикою, середня частина перерізу, який є характерним для усієї висоти бункера, являє собою круг діаметром  $D_d = 2,76$  м з дрібним матеріалом – 0,074 мм...3,0 мм. За цим кругом розташоване кільце з більшим діаметром  $D_5$  шириною 0,52 м з матеріалу 5 мм, потім кільце шириною 0,22 м і середнім розміром шматків 10 мм. Біля стінки розташовується матеріал шириною 0,1 м з розміром шматків 20 мм. Між двома останніми кільцями розташовується кільцевий елемент шириною 0,18 м, складений з матеріалу крупністю 15 мм.

Розвантаження бункера 1 (рис. 1,б) від матеріалу 2 полягає у витіканні дробленої руди через живильник на конвеєрну стрічку. При цьому матеріал залишає здебільшого середню (осьову) частину бункера. У початковій фазі в основному видаляється дрібний матеріал в межах вершини конуса 3, який пунктиром показано на рис. 1,б. Потім слідують більш крупні фракції поки не створиться конічна воронка 4. Початкова фаза розвантаження проходить без будь-яких ускладнень, оскільки матеріал не ущільнений і володіє достатньою рухливістю. Після створення конічної воронки 4 матеріал припиняє рух, створюється пустота циліндричної форми 6 з діаметром  $d_y$ , що наближено визначається розміром випускного отвору бункера (рис. 1,б). Рух матеріалу в зоні конуса 4 припиняється тому, що  $d_y < D_d$ . Дрібний матеріал володіє меншою рухливістю і здатний ущільнюватись, що сприяє створенню циліндричного склепіння. Рахують, що матеріал руйнується лише тоді, коли степінь ентропії його частинок на межі твердої і сипкої фази перевищить певний поріг руйнування структури, який приймає значення від 0 до 1 в залежності від виду матеріалу, умов зберігання, кількості переданої йому енергії. При цьому враховують сили тертя й сили тяжіння між фрагментами частинок, а також відносне переміщення під дією ваги шарів матеріалу, що розташовані вище. Крім того, мають на увазі, що для забезпечення неперервного витoku сипкого матеріалу необхідне багаторазове збільшення розмірів розвантажувального отвору порівняно з розміром частинок [11].

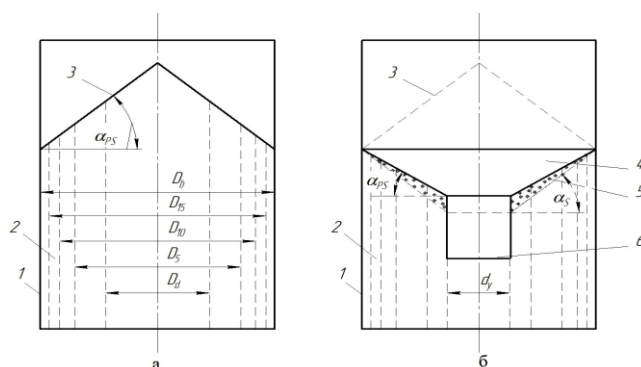


Рисунок 1 – Матеріал в бункері на кінцевому етапі завантаження (а) і початковому етапі розвантаження (б): 1 – бункер; 2 – сипкий матеріал; 3 – конус; 4 – конічна воронка; 5 – фрагмент крупного матеріалу, що долає опір дрібних фракцій; 6 – пустота, що формується при розвантаженні матеріалу;  $D_b$  – діаметр бункера;  $D_5$ ,  $D_{10}$ ,  $D_{15}$  – відповідно діаметри кільцевих елементів, де закінчується матеріал певної крупності;  $d_y$  – умовний діаметр випускного каналу

Створена пустота 6 (рис. 1,б) при зростанні кута сходження  $\alpha_s$  спричиняє виникнення зовнішньої сили. Такою силою тут є фактор дії маси більш крупного матеріалу в кільцевих елементах. У дрібному ма-

теріалі також формується сила зсуву, оскільки  $\alpha_S > \alpha_{PS}$ . Для цього пустота 6 повинна поглибитись на певну величину. Під тиском розташованих вище крупних фракцій опір дрібного матеріалу долається і він пересувається у незайнятий простір 6 (рис. 1,б). Зверху над дрібним розміщується матеріал більш крупних фракцій, які скочуються по інерції. Весь цей розпушений матеріал видаляється через канал діаметром  $d_y$  до утворення нової конічної воронки 4. Далі дані цикли повторюються і висота дробленого матеріалу в бункері поступово зменшується.

Особливості формування маси матеріалу, що спричиняє руйнування утвореного циліндричного склепіння видно з рис. 2. Перш за все знаходимо об'єм сипкого матеріалу, який сходить у окремому циклі. Сипкий матеріал, що сходить в окремому циклі, у поздовжньому осьовому перерізі бункера представлений фігурами  $ACE$  і  $BDF$ . Об'єм такого матеріалу дорівнює об'єму тіла як фігури обертання  $ACE$  або  $BDF$  навколо осі бункера. Об'єм матеріалу, що сходить в окремому циклі, можливо визначити як різницю об'ємів конуса, поданого в перерізі трикутником  $ABO_4$ , і конусів, переріз яких дає трикутники  $ABO_2$ ,  $EFO_4$ , циліндра з перерізом  $CDFE$ , збільшену на об'єм конуса з перерізом  $CDO_2$ . Висоти конусів дорівнюють:  $OO_2=R_b \cdot tg\alpha_{PS}$ ;  $OO_1=(R_b-r_y)tg\alpha_{PS}$ ;  $O_1O_2=r_y \cdot tg\alpha_{PS}$ ;  $OO_4=R_b \cdot tg\alpha_S$ ;  $O_3O_4=r_y \cdot tg\alpha_S$ . Висота циліндра  $O_1O_3=OO_4-O_3O_4=OO_1=(R_b-r_y)(tg\alpha_S - tg\alpha_{PS})$ . Об'єми відповідно конусів і циліндра дорівнюють:  $V_1=\pi R_b^3 tg\alpha_S/3$ ;  $V_2=\pi R_b^3 tg\alpha_{PS}/3$ ;  $V_3=\pi r_y^3 tg\alpha_S/3$ ;  $V_4=\pi r_y^2 (R_b-r_y)(tg\alpha_S - tg\alpha_{PS})$ ;  $V_5=\pi r_y^3 tg\alpha_{PS}/3$ . З врахуванням знайдених об'ємів  $V_1, \dots, V_5$  після відповідних перетворень отримуємо залежність для визначення об'єму сипкого матеріалу, який сходить у окремому циклі розвантаження бункера

$$V_{MC} = \frac{\pi}{3} \left[ (R_b^3 - r_y^3) - 3r_y^2 (R_b - r_y) \right] (tg\alpha_S - tg\alpha_{PS}). \quad (1)$$

Подавши  $(R_b^3 - r_y^3) = (R_b - r_y)(R_b^2 + R_b r_y + r_y^2)$ , отримуємо

$$V_{MC} = \frac{\pi}{3} (R_b - r_y) (R_b^2 + R_b r_y - 2r_y^2) (tg\alpha_S - tg\alpha_{PS}). \quad (2)$$

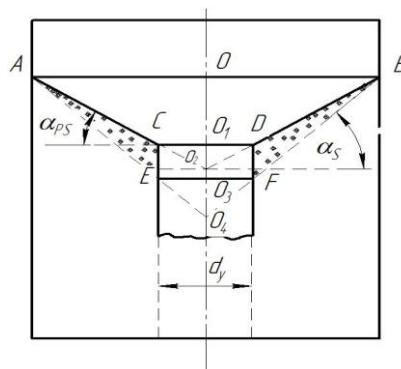


Рисунок 2 – Поздовжній осьовий переріз бункера з елементом маси, що сходить в окремому циклі

У рівнянні (2) всі параметри незмінні, крім кута  $\alpha_S$ , який залежить від технологічних особливостей процесу. Тому  $V_{MC}$  є величиною випадковою. Випадковим є і формування фракцій матеріалу у самому циклі розвантаження.

Об'єм дрібного матеріалу  $V_{dM}$ , що сходить у окремому циклі розвантаження бункера, на рис. 3 представлений фігурою  $O_2O_1O_2O_3$  обертання навколо осі бункера. Його можливо визначити як об'єм кільцевого циліндричного тіла з прямокутником  $O_1O_1'O_3O_3$  у перерізі, зменшений на об'єми кільцевих елементів з трикутниками  $O_2O_1O_1'$  і  $O_3O_2O_3'$  у перерізі.

Відповідно рис. 3 довжина середньої лінії фігур обертання дорівнює  $l_c = \pi(R_d - r_y)$ . Площа трикутника  $O_3O_2O_3'$   $S_{T1} = (R_d - r_y)^2 tg\alpha_S/2$ . Тоді об'єм фігури обертання з трикутником  $O_3O_2O_3'$  у перерізі дорівнює

$$V_{T1} = \frac{\pi}{2} (R_d + r_y) (R_d - r_y)^2 tg\alpha_S. \quad (3)$$

Відрізок  $O_1O_2 = (R_d - r_y) tg\alpha_{PS}$ . З врахуванням цього площа трикутника  $O_2O_1O_1'$  дорівнює  $S_{T2} = (R_d - r_y)^2 tg\alpha_{PS}/2$ . Тоді об'єм фігури обертання з трикутником  $O_2O_1O_1'$  у перерізі становить

$$V_{T2} = \frac{\pi}{2} (R_d + r_y) (R_d - r_y)^2 \operatorname{tg} \alpha_{PS} \cdot \quad (4)$$

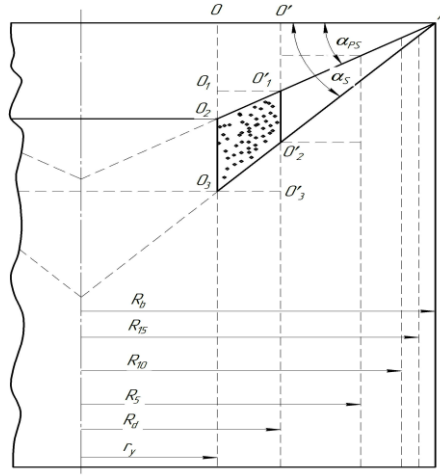


Рисунок 3 – Поздовжній осьовий переріз бункера з відокремленим фрагментом поперечного перерізу дрібного матеріалу

Довжина відрізка  $O_2O_3 = OO_3 - OO_2 = (R_b - r_y)(\operatorname{tg} \alpha_S - \operatorname{tg} \alpha_{PS})$ . З врахуванням значення  $O_1O_2$  висота кільцевого циліндричного тіла прийме значення  $O_1O_3 = h_{CT} = (R_b - r_y)\operatorname{tg} \alpha_S - (R_b - R_d)\operatorname{tg} \alpha_{PS}$ , а площа прямокутника  $O_1O'1O'3O_3$   $S_{T3} = (R_d - r_y)h_{CT}$ . Тоді об'єм фігури обертання з прямокутником  $O_1O'1O'3O_3$  у перерізі складає

$$V_{T3} = \pi (R_d^2 - r_y^2) \left[ (R_b - r_y) \operatorname{tg} \alpha_S - (R_b - R_d) \operatorname{tg} \alpha_{PS} \right]. \quad (5)$$

Враховуючи (3), (4) і (5) і виконавши відповідні перетворення, отримуємо залежність для визначення об'єму дрібного сипкого матеріалу у окремому циклі розвантаження бункера

$$V_{dM} = \frac{\pi}{2} (R_d^2 - r_y^2) (2R_b - R_d - r_y) (\operatorname{tg} \alpha_S - \operatorname{tg} \alpha_{PS}). \quad (6)$$

Об'єм крупних фракцій сипкого матеріалу  $V_{KM}$  у окремому циклі розвантаження бункера можливо визначити як різницю об'ємів  $V_{MC} - V_{dM}$ . Знайшовши різницю цих об'ємів і виконавши перетворення, отримуємо

$$V_{KM} = \frac{\pi}{6} \left[ 2R_b^3 + 3R_d^3 + r_y^3 + 3R_d r_y (R_d - r_y) - 6R_d^2 R_b \right] (\operatorname{tg} \alpha_S - \operatorname{tg} \alpha_{PS}). \quad (7)$$

Аналогічно виведенню рівняння (6) з побудови іншого прямокутника на рис. 3 можливо отримати залежність для визначення об'єму сипкого матеріалу крупністю 5 мм.

$$V_{M5} = \frac{\pi}{2} (R_5^2 - R_d^2) (2R_b - R_5 - R_d) (\operatorname{tg} \alpha_S - \operatorname{tg} \alpha_{PS}). \quad (8)$$

Залежність (8) аналогічна рівнянню (6), тому для інших класів крупності рівності можливо записувати по аналогії. Вони будуть мати наступний вигляд

$$V_{M10} = \frac{\pi}{2} (R_{10}^2 - R_5^2) (2R_b - R_{10} - R_5) (\operatorname{tg} \alpha_S - \operatorname{tg} \alpha_{PS}), \quad (9)$$

$$V_{M15} = \frac{\pi}{2} (R_{15}^2 - R_{10}^2) (2R_b - R_{15} - R_{10}) (\operatorname{tg} \alpha_S - \operatorname{tg} \alpha_{PS}), \quad (10)$$

$$V_{M20} = \frac{\pi}{2} (R_{20}^2 - R_{15}^2) (2R_b - R_{20} - R_{15}) (\operatorname{tg} \alpha_S - \operatorname{tg} \alpha_{PS}). \quad (11)$$

Враховуючи, що в (11)  $R_{20}=R_b$ , отримаємо

$$V_{M20} = \frac{\pi}{2} (R_b^2 - R_{15}^2) (R_b - R_{15}) (tg\alpha_S - tg\alpha_{PS}) . \quad (12)$$

В приведених залежностях параметри  $R_b, R_5, R_{10}, R_{15}$  визначаються вмістом фракцій у вихідній руді, тобто мають випадковий характер. Змінною і залежною від технологічних особливостей процесу величиною є і кут  $\alpha_S$ . Тому розглянуті об'єми є випадковими величинами. Випадковістю відзначається і процес перемішування окремих класів крупності сипкого матеріалу.

У конкретній технологічній ситуації визначені за формулами (6)–(12) величини випадковими не будуть, їх значення при різних кутах сходження  $\alpha_S$  приведені в табл. 1.

З даних табл. 1 видно, що значення об'ємів дробленої руди, які сходять в окремих циклах розвантаження бункера, дуже залежать від кута  $\alpha_S$ . При куті  $\alpha_S=60^\circ$  об'єм матеріалу у 8,32 рази більший порівняно з показником, що належить куту  $45^\circ$ . Найбільша частка матеріалу у об'ємі, що сходить в окремому циклі, належить фракції 0...3 мм. Вона складає майже 67 %. Частка найбільш крупного матеріалу розміром 20 мм становить 0,44 %, а фракції 15 мм – 2,84 %. Малий вміст двох самих крупних фракцій матеріалу, розташованих на периферії, не дозволяє їм окремо сходити в процесі розвантаження. Оскільки фракції крупністю 15 і 20 мм відрізняються найбільшою рухливістю і розташовані безпосередньо біля стінки бункера, вони змішуються з матеріалом 10 мм і частково з більш дрібним, створюючи суміш 10...20 мм.

Таблиця 1 – Значення об'ємів дробленої руди, які сходять в окремому циклі розвантаження бункера при різних кутах сходження  $\alpha_S$ , м<sup>3</sup>

Кут сходження $\alpha_S, ^\circ$	Весь матеріал	Крупні фракції 5...20 мм	Крупність шматків матеріалу, мм				
			0...3	5	10	15	20
45	1,7495	0,5831	1,1664	0,4121	0,1137	0,0496	0,0077
50	5,0982	1,6992	3,3990	1,2009	0,3313	0,1446	0,0224
55	9,2426	3,0838	6,1588	2,1760	0,6003	0,2669	0,0406
60	14,5493	4,8493	9,7000	3,4272	0,9455	0,4126	0,0640

З бункера матеріал розвантажується у послідовності – від самого дрібного до найбільш крупного. Ширина сипкого матеріалу на конвеєрній стрічці може складати 0,4 м, а середнє значення висоти насипання – 0,08 м. Тоді довжина дробленої руди на конвеєрній стрічці, що сходить за один цикл розвантаження бункера, буде залежати від кута сходження  $\alpha_S$  (табл. 2). Як видно з даних табл. 2, довжина матеріалу на конвеєрній стрічці зростає зі збільшенням кута сходження. При певному куті сходження дрібний матеріал займає наближено половину його довжини на конвеєрній стрічці. Друга половина зайнята дробленою рудою з середньою крупністю 5 мм і 10...20 мм. Зростання кута сходження приводить до збільшення в рази протяжності матеріалу на конвеєрній стрічці в межах одного циклу розвантаження бункера.

Таблиця 2 – Довжина матеріалу, розташованого на конвеєрній стрічці з висотою насипання 0,08 м, в залежності від кута сходження дробленої руди в одному циклі розвантаження бункера, м

Кут сходження $\alpha_S, ^\circ$	Крупність шматків матеріалу, мм			
	0...3	5	10...20	0...20
45	36,450	12,878	5,344	54,672
50	106,219	37,528	15,572	159,319
55	192,462	68,0	28,369	288,831
60	303,125	107,1	44,441	454,666

На характер розвантаження матеріалу на конвеєрну стрічку також значно впливає висота його насипання. Як видно з даних табл. 3, довжина розташування дробленої руди при переході з найменшого значення  $h_M=0,06$  м до найбільшого  $h_M=0,10$  м скорочується до 0,6. Те ж саме відбувається стосовно окремих класів крупності дробленої руди. Отже, на довжину потоків дробленої руди, що розташовується на конвеєрній стрічці за один цикл розвантаження бункера, сильно впливають кут сходження матеріалу і висота його насипання.

Таблиця 3 – Довжина матеріалу на конвеєрній стрічці в залежності від висоти насипання при куті сходження  $45^\circ$  в одному циклі розвантаження бункера, м

Висота насипання матеріалу $h_M$ , м	Крупність шматків матеріалу, мм			
	0...3	5	10...20	0...20
0,06	48,60	13,22	5,55	67,37
0,10	29,16	7,93	3,32	40,41

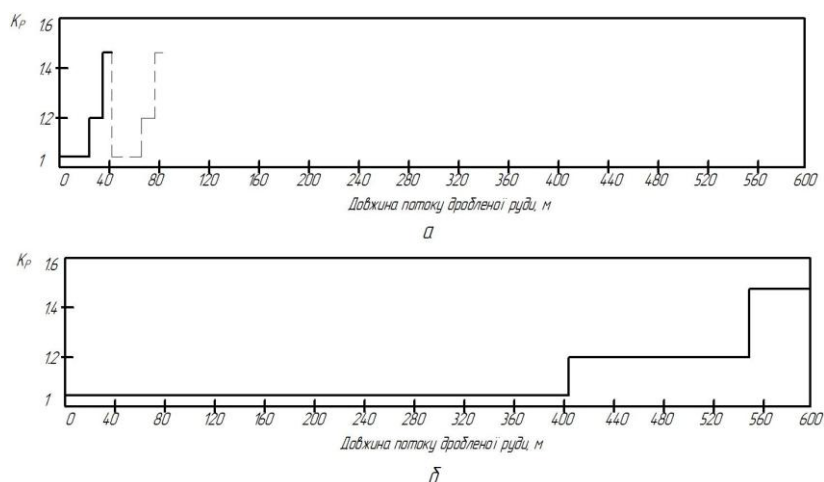


Рисунок 4 – Граничні зміни довжини потоку і коефіцієнта розпушення вихідної руди в залежності від кута сходження і висоти насипання матеріалу в одному циклі розвантаження бункера:  
 а – при  $\alpha_S=45^\circ$ ,  $h_M=0,10$  м; б – при  $\alpha_S=60^\circ$ ,  $h_M=0,06$  м

Найбільш повну і загальну характеристику формування потоків сипкого матеріалу на конвеєрній стрічці в межах одного циклу розвантаження бункера дає розгляд граничних умов, які подані на рис. 4. Ними є, з одного боку, мінімальний кут сходження  $\alpha_S=45^\circ$  і максимальна висота насипання матеріалу 0,1 м, а, з іншого боку, максимальний кут сходження  $\alpha_S=60^\circ$  і мінімальна висота насипання  $h_M=0,06$  м. Вони несуть інформацію про довжину розташування матеріалу на конвеєрній стрічці в циклах розвантаження бункера. Важливими параметрами є і якісні показники матеріалу по його довжині. Найбільш характерними з них рахують крупність дробленого матеріалу та його розпушення, яке оцінюють коефіцієнтом розпушення  $K_P$ , що дорівнює відношенню об'єму розпушеної руди до її об'єму в незруйнованому стані. Коефіцієнт розпушення завжди більший одиниці і залежить від гранулометричного складу дробленої маси, форми та взаємного розташування шматків зруйнованої руди. У бункері, крім того, на його величину впливають зовнішні фактори – тривалість знаходження у розпушеному стані (самоущільнення), тиск, вологість, ємкість і форма споруди. Сипкий матеріал, приведений в рух при розвантаженні бункера, звільняється від впливу зовнішніх факторів. Тому його коефіцієнт розпушення визначається гранулометричним складом, формою та взаємним розташуванням шматків. При подачі сипкого матеріалу на конвеєрну стрічку певним дозатором забезпечується визначене взаємне розташування шматків руди. Оскільки характер і якість розпушення руди визначаються самим процесом, а не її фізичними властивостями, форму створюваних шматків при цьому можливо рахувати цілком визначенню і практично незмінною. Тому коефіцієнт розпушення матеріалу на конвеєрній стрічці в основному залежить від гранулометричного складу, який в першому наближенні можливо оцінювати значенням середньозваженої крупності. Коефіцієнт розпушення зростає при збільшенні середньозваженого розміру шматків руди. Гранулометричний склад дробленого матеріалу розглядають для всього масиву, однак в даному випадку, враховуючи особливості технологічного процесу, він подається у перетвореному вигляді сукупністю класів 0...3 мм, 5 мм, 10...20 мм. При цьому середньозважений розмір шматків руди  $d_{CP}$  необхідно визначати для цих класів крупності. Для прийнятого матеріалу він відповідно становить 1,6 мм, 5 мм і 11,9 мм. Беручи до уваги те, що скельові породи при крупному дробленні характеризуються коефіцієнтом розпушення 1,8...2,5, а більш дрібні матеріали, наприклад пісок, мають  $K_P=1,05...1,2$ , і те, що вихідне живлення кульового млина містить вагому частку дрібного матеріалу та розмір найкрупнішого шматка 20 мм, діапазон зміни зна-

чень коефіцієнта розпушення доцільно прийняти в межах від 1,0 до 1,8. Приймавши лінійну модель зміни коефіцієнта розпушення, що відповідає рівнянню  $K_p=1+0,04 d_{CP}$ , з ростом середньозваженого діаметра шматків руди, для визначених розмірів дробленого матеріалу у класах крупності  $K_p$  відповідно становить 1,06; 1,20; 1,48. Отже, в кожному циклі розвантаження бункера на конвеєрній стрічці формуються ділянки з різними значеннями коефіцієнта розпушення матеріалу, що показано на рис. 4. Як видно з рис. 4,а, при малих кутах сходження матеріалу ці ділянки короткі. Вони набагато довші при найбільшому куті сходження  $\alpha_s=60^\circ$  і найменшій висоті насипання матеріалу  $h_M=0,06$  м, що показано на рис. 4, б. Тут перевищення довжини розташування матеріалу досягає майже 14-кратного значення. Такі ж пропорції зберігаються і в окремих класах крупності. Всі інші реалізації процесів розподілу сипкого матеріалу на конвеєрній стрічці, що відповідають кутам сходження  $45^\circ < \alpha_s < 60^\circ$  і висотам  $0,06 \text{ м} < h_M < 0,1$  м, займають проміжні значення між графіками, наведеними на рис. 4.

Графіки на рис. 4 відповідають ідеалізованому процесу розподілу матеріалу. В реальних умовах переходи між значеннями  $K_p$  будуть більш плавними, оскільки на стиках матеріал змішується. Достатньо велика різниця між значеннями  $K_p$  на окремих ділянках потоку свідчить про те, що на конвеєрні ваги і в кульовий млин сипкий матеріал надходить зі значними циклічними змінами. Такі зміни в рамках циклів розвантаження бункера можуть відбуватися достатньо швидко і занадто повільно, коли довжина порівняно однорідного матеріалу на конвеєрній стрічці досягає до 400 м. Це при  $h_M=const$  потребує зміни руху конвеєрної стрічки в процесі автоматичного завантаження кульового млина.

Приведені на рис. 4 граничні процеси розподілу матеріалу на конвеєрній стрічці малоймовірні. На практиці більш характерними є осереднені процеси, а це означає, що на конвеєрній стрічці в основному розташовуються ділянки достатньої протяжності з середньою крупністю руди 1,6 мм, 5 мм і 11,9 мм та відповідно коефіцієнтом розпушення 1,06; 1,20; 1,48. Збільшення  $K_p$  означає зменшення маси твердого в зайнятому розпушеним матеріалом об'ємі. Такі ділянки потоку послідовно проходять через конвеєрні ваги, впливаючи на їх опорний ролик [12]. Сила, що діє на опорний ролик, є випадковим процесом, оскільки сипкий матеріал на конвеєрній стрічці розташований нерівномірно. Ця нерівномірність збільшується завдяки тому, що матеріал фактично складається не з однакових частинок руди, поданих  $d_{CP}$  у кожному класі крупності, а з різнорозмірних складових, які змінюються в діапазоні від  $d_{min}$  до  $d_{max}$ . Ділянки потоку з дрібним матеріалом викликають на опорному ролику випадковий процес з малою амплітудою і порівняно великою коливальністю. Для більш крупного матеріалу характерним є зростання амплітуди і зменшення коливальності випадкового процесу. Зміна швидкості руху конвеєрної стрічки на амплітуду випадкового процесу не впливає, а коливальність змінює.

**Висновки.** Розвантаження бункерів на збагачувальних фабриках здійснюється циклічно. В кожному циклі в залежності від кута сходження виділяється різна кількість матеріалу, який живильником подається на конвеєрну стрічку, де спочатку розташовуються дрібні фракції, потім середні, а в кінці самі крупні. Протяжність матеріалу на конвеєрній стрічці за один цикл розвантаження бункера значна і визначається кутом сходження і висотою насипання. Ділянки з трьома класами крупності мають різну довжину і відрізняються коефіцієнтами розпушення. Такий характер розташування матеріалу вздовж конвеєрної стрічки вимагає регулювання її швидкості при автоматичному керуванні завантаженням кульового млина і збуджує змінну складову навантаження опорного ролика конвеєрних вагів у вигляді випадкового процесу з різними на окремих ділянках амплітудами і коливальностями, що викликає додаткову похибку вимірювання.

Перспективою подальших досліджень є удосконалення конвеєрних вагів і системи автоматичного управління завантаженням та розрідженням пульпи у кульових млинах з циркулюючим навантаженням.

### Література

1. Маляров П.В. Основы интенсификации процессов рудоподготовки: [монография] / Маляров П.В.– Ростов-на-Дону: ООО “Ростиздат”, 2004.– 320 с.
2. Измельчение. Энергетика и технология: [учебное пособие для вузов] / [Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И. и др.]– М.: Изд. дом “Руда и металлы”, 2007.– 296 с.

3. Пат. 40465 Україна, МПК В 03 В 11/00, В 02 С 25/00. Пристрій автоматичної стабілізації розрізання пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням / Кондратець В.О., Сербул О.М.; заявник і патентовласник Кіровоградський нац. техн. ун-т.– №U200813005; заявл. 10.11.08; опубл. 10.04.09, Бюл.№7.
4. Каталимов А.В. Дозирование сыпучих и вязких материалов / А.В. Каталимов, В.А. Любартович.– Л.: Химия, 1990.– 240 с.
5. Walters J.K. A Theoretical Analysis of Stresses in Silos with Vertical Walls // Chemical Engineering Science.– 1973.– V.28.– P. 13–21.
6. Бушманова О.П. Исследование задачи Янсена / О.П. Бушманова, А.Ф. Ревуженко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.– 1981.– №3.– С. 3–15.
7. Cowin S.C. The Theory of Static Loads in Bins // Journal of Applied Mechanics.– 1977.– V.44.– №9.– P. 409–412.
8. Takami A., Syoten O. A Theory of the Pressure Distribution in Powder in Equilibrium in a Cylindrical Vessel // Powder Technology.– 1974.– V.10.– P. 295–301.
9. Прошунин Ю.Е. Математическая модель истечения сыпучих материалов / Ю.Е. Прошунин // Горный журнал.– 2004.– №10.– С. 82–83.
10. Прошунин Ю.Е. О совершенствовании математической модели выпуска сыпучих материалов / Ю.Е. Прошунин // Известия Томского политехнического университета.– 2007.– Т. 310.– №3.– С. 44–49.
11. Минько Р.Н. Исследование динамики истечения сыпучих однородных материалов для повышения эффективности разгрузки отпускных бункеров в условиях длительного хранения: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» / Р.Н. Минько.– Рыбинск, 2013.– 16с.
12. Кондратець В.О. Дослідження випадкового процесу навантаження опорного ролика конвеєра в умовах осередненого потоку руди / В.О. Кондратець // 36. наук. праць Національного гірничого університету.– Дніпропетровськ: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2013.– №43.– С. 79–88.

Bibliography (transliterated)

1. Malyarov P.V. Osnovy intensifikatsii protsessov rudopodgotovki: [monografiya]. Malyarov P.V.– Rostov-na-Donu: ООО “Rostizdat”, 2004.– 320 p.
2. Izmelchenie. Energetika i tehnologiya: [uchebnoe posobie dlya vuzov]. [Pivnyak G.G., Vaysberg L.A., Kirichenko V.I. i dr.]– М.: Izd. dom “Ruda i metally”, 2007.– 296 p.
3. Pat. 40465 Ukrayina, MPK B 03 B 11/00, V 02 S 25/00. Pristriy avtomatichnoyi stabilizatsiyi rozridzheniya pulpi v mlinah z tsirkulyuyuchim navantazhennyam. Kondratets V.O., Serbul O.M.; zayavnik i patentovlasnik Kirovogradskiy nats. tehn. un-t.– #U200813005; zayavl. 10.11.08; opubl. 10.04.09, Byul.#7.
4. Katalymov A.V. Dozirovanie syipuchih i vyazkih materialov. A.V. Katalymov, V.A. Lyubartovich.– L.: Himiya, 1990.– 240 p.
5. Walters J.K. A Theoretical Analysis of Stresses in Silos with Vertical Walls. Chemical Engineering Science.– 1973.– V.28.– P. 13–21.
6. Bushmanova O.P. Issledovanie zadachi Yansena. O.P. Bushmanova, A.F. Revuzhenko. Fiziko-tehnicheskie problemyi razrabotki poleznyih iskopaemyih.– 1981.– #3.– P. 3–15.
7. Cowin S.C. The Theory of Static Loads in Bins. Journal of Applied Mechanics.– 1977.– V.44.– #9.– P. 409–412.
8. Takami A., Syoten O. A Theory of the Pressure Distribution in Powder in Equilibrium in a Cylindrical Vessel. Powder Technology.– 1974.– V.10.– P. 295–301.
9. Proshunin Yu.E. Matematicheskaya model istecheniya syipuchih materialov. Yu.E. Proshunin. Gorniy zhurnal.– 2004.– #10.– P. 82–83.
10. Proshunin Yu.E. O sovershenstvovanii matematicheskoy modeli vyipuska syipuchih materialov. Yu.E. Proshunin. Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta.– 2007.– Т. 310.– #3.– P. 44–49.
11. Minko R.N. Issledovanie dinamiki istecheniya syipuchih odnorodnyih materialov dlya povyisheniya effektivnosti razgruzki otpusknyih bunkerov v usloviyah dlitel'nogo hraneniya: avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tehn. nauk: spets. 01.02.06 «Dinamika, prochnost mashin, priborov i apparatury». R.N. Minko.– Rybinsk, 2013.– 16 p.



12. Kondratets V.O. Doslidzhennya vipadkovogo protsesu navantazhennya opornogo rolіka konveera v umovah oserednenogo potoku rudi. V.O. Kondratets. Zb. nauk. prats Natsionalnogo girnichogo universitetu.– Dnipropetrovsk: Derzhavniy vischiy navchalniy zaklad «Natsionalniy girnichiy universitet», 2013.– #43.– P. 79–88.

УДК 681.5.015

Кондратец В.А., Мацуй А.Н.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДРОБЛЕНОЙ РУДЫ ВДОЛЬ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ ПРИ РАЗГРУЗКЕ БУНКЕРОВ**

Показано, что разгрузка бункеров на обогатительных фабриках осуществляется циклично. В каждом цикле в зависимости от угла схождения, определяемого свойством и состоянием кусковой смеси, выделяется разное количество материала, который через определенное время с помощью питателя поступает на конвейерную ленту. Независимо от выделенного в цикле разгрузки объема сыпучего материала благодаря сегрегации он на конвейерной ленте распределяется в строгой последовательности – наиболее мелкий, средней крупности и самый крупный. Общая протяженность материала на конвейерной ленте за цикл разгрузки будет различной, различными будут и коэффициенты разрыхления на участках с отличающейся средневзвешенной крупностью кусков. Такой характер расположения материала вдоль конвейерной ленты сильно влияет на работу конвейерных весов и шаровой мельницы, качественную автоматическую загрузку которой возможно осуществить только с учетом отмеченных особенностей и изменения скорости движения рудного потока. Создаваемый при разгрузке бункера рудный поток возбуждает переменную составляющую нагрузки опорного ролика конвейерных весов в виде случайного процесса с различными на отдельных участках потока амплитудами и колебательностями, что вызывает дополнительную погрешность измерения.

Kondratets V.A., Matsui A.N.

**MODELING OF DISTRIBUTED CRUSHED ORE ALONG THE CONVEYING BELT IN OFFLOADING HOPPERS**

It is shown that the discharge hoppers at concentrators performed cyclically. In each cycle, depending on the angle of convergence, defines the properties and state of lumpy mixture allocated different amounts of material, which after a certain time with a runner arrives on a conveyor belt. Regardless of the selected cycle unloading volume of bulk material due to the segregation of it on the conveyor belt is distributed in strict sequence – most small, medium size and the largest. The total length of material on the conveyor belt for discharge cycle will be different, different factors will loosen in areas with different average particle size pieces. Such nature of the arrangement of the material along the conveyor belt strongly affects the weighing conveyor and ball mill, high-quality automatic downloading of which can only be done in view of the marked change in the features and speed of the ore stream. Created when unloading hopper ore flow excites variable component load bearing roller conveyor scales in the form of a random process with different on different segments and vibrational amplitudes flow, causing additional measurement error.