

УДК 622.788.36

М.І. СОКУР, д-р техн. наук

(Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського),

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук

(Україна, Харків, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"),

Д.П. БОЖИК, І.М.СОКУР,

Л.М.СОКУР, канд. техн. наук

(Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОХОДЖЕННЯ МАТЕРІАЛУ ЧЕРЕЗ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНІ ГРАТИ БАРАБАННОГО МЛИНА

Постановка проблеми і стан її вирішення. При моделюванні процесів які протікають у барабанному млині доцільно використовувати феноменологічну модель – схему, яка відображає послідовність та взаємозв'язок всіх елементарних фізичних процесів (субпроцесів), які мають місце при проведенні технологічного процесу. Вихідні величини кожного попереднього субпроцесу є вхідними для наступного. Вихідні величини останнього субпроцесу є вихідними величинами технологічного процесу в цілому [12].

У випадку барабанного млина доцільно розглядати мінімум два субпроцеси:

- 1) рух матеріалу в проточній частині барабанного млина;
- 2) процеси у розвантажувальному вузлі барабанного млина. При цьому суб-процес проходження матеріалу через розвантажувальні грати барабанного млина належить до другої позиції.

Розвантажувальна решітка є одним з основних елементів розвантажувального пристрою млина. Вона забезпечує підтримку необхідного рівня подрібнюваного матеріалу в барабані млина. Пропускна здатність ґрат залежить від площі отворів, їх форми, розмірів і профілю робочої поверхні ґрат.

Відомо ряд робіт з моделювання барабанного млина та його окремих вузлів, технологічного процесу подрібнення у млині. Так у [1-3] наведена динамічна модель барабанного млина, обґрунтоване розділення її на парціальні системи. Барабан з продуктами завантаження розглянуто як фізичний маятник. У роботі [4] застосовано декілька підходів до моделювання процесів у барабанному млині. По-перше, на підставі дослідження напружень у шматках породи в шарі завантаження методом скінченних елементів на базі пакета Solidworks показано вплив зсувних напружень на елементи завантаження. Показано, що механізм руйнування в барабані кульового млина з гумовою футеровкою заснований на наявності концентрації зсувних напружень. Розроблена модель [4] дозволяє розрахувати максимальні й мінімальні навантаження в елементах внутрішньомлинового завантаження (руда, кулі, вода, футерівка) при кульовому подрібненні магнетитових кварцитів з урахуванням форми й матеріалу футеровки. По-друге, в цій же роботі одержана стохастична модель кінетики подрібнення полідисперсної сировини з використанням ланцюгів Маркова. По-третє, виконано

імітаційне моделювання кінетики подрібнення. Як середовище моделювання було обрано AnyLogic [4]. Установлено, що при подрібненні магнетитових кварцитів у кульових млинах в умовах всебічного нерівномірно-компонентного стищення контактними силами має місце енергозберігаючий механізм руйнування, який реалізується за рахунок наявності концентрацій максимальних зсувних напружень, які виникають у точках поперечного перерізу шматка руди, розташованих на його нейтральній осі, що визначають концентрацію максимальних нормальних напружень у руді.

Авторами [5] подано основним математичний апарат опису технологічного процесу подрібнення корисних копалин у кульовому млині.

Автором [6] розглянуто задачу моделювання картин руху внутрішньокамерного завантаження барабанного млина. Застосовано аналітико-експериментальний метод досліджень. Побудована модель та виконано візуалізацію картин трифазного режиму руху завантаження у поперечному перерізі камери.

В роботі [7] запропонована комбінована модель технологічного процесу подрібнення рудних матеріалів в кульових барабанних млинах, що включає прогнозу, ідентифікуючу і нечітку складові. Вона адаптивна до зміни стану зовнішнього середовища. Для оцінки параметрів моделі пропонується використовувати апарат гібридних нейронних мереж. Розроблена модель може бути використана для управління процесом подрібнення.

У статті [8] представлений огляд існуючої методології та практики в області моделювання і управління процесом подрібнення в промислових кульових млинах.

У статті [9] крім огляду існуючих методів запропоновано авторський підхід до моделювання кульових млинів, який полягає, по-перше, у використанні суб-моделей, які успішно описують різні механізми подрібнення, враховують також масу зернистого матеріалу захопленого в кожному зіткненні, визначають ймовірність руйнування різними способами і враховують ефект ослаблення частинок при багаторазових зіткненнях. Підкреслено, що при моделюванні вихідна інформація, яка найбільше цікавить науковців і практиків – крупність та гранулометричний склад одержуваного матеріалу та енергетичні витрати на подрібнення (помел). Крім того, дається огляд літератури щодо застосування моделей на основі розподіленої інформації енергії зіткнення в барабанних млинах, зокрема кульових, аналізуються запропоновані критично різні підходи, оцінюється готовність різних моделей для використання при оптимізації роботи і проектуванні кульових млинів.

У статті [10] авторства китайських та мексиканських дослідників підкреслюється, що навантаження кульового млина по пульпі є ключовим параметром для процесу, який впливає на продуктивність, якість і споживання енергії необхідної для подрібнення. Автори пропонують навантаження кульового млина оцінювати за вібрацією його корпусу. Зазначено, що сигнал від датчика піддають швидкому перетворенню Фур'є і аналізують також окремі гармоніки та пі-

Підготовчі процеси збагачення

ки. Визначають спектральну густину потужності – функцію, що описує розподіл потужності сигналу в залежності від частоти, тобто потужність, що припадає на одиничний інтервал частоти. Для визначення навантаження кульового млина застосовують метод опорних векторів. Експериментальні результати показують, що запропонована модель з т.зв. м'яким датчиком (soft sensor model) має більш високу точність і кращу прогностичну продуктивність, ніж інші нормальні підходи.

У статті [11] підкреслюється наявність великого числа експериментальних методів і опублікованих даних з подрібнення матеріалів у млинах. Водночас, порівняно мало інформації про механізм руйнування частинок у робочому просторі млина. Робота досліджує руйнування частинок від падаючої сталевий кульки в необмежених умовах, такі, як ті, які, ймовірно, мають місце в барабанних млинах. Досліджено вплив на подрібнення розміру часток, енергії удару, розміру кулі і конфігурації середовища, розроблена математична модель, яка описує вплив всіх цих змінних. Ця модель була відкалібрована і перевірена з використанням даних по кварцу, вапняку і мідній руді.

Мета статті – аналітичне моделювання процесу проходження матеріалу через розвантажувальні ґрати барабанного млина.

Виклад основного матеріалу. В даний час розвантажувальні ґрати барабанного млина виготовляються у вигляді радіальних секторів з круглими, квадратними або щілинними отворами. У разі рівномірного розташування отворів за площею секторів розвантажувальних ґрат, для характеристики їх пропускної спроможності (витрати пульпи із заданою величиною подрібнюючого матеріалу) введемо коефіцієнт, який залежить від конструкції ґрат і форми їх отворів:

$$k_0 = F_0 / F, \quad (1)$$

де F_0 – загальна площа всіх отворів ґрат, m^2 ; F – сумарна площа секторів ґрат, m^2 .

При одному і тому ж рівні пульпи в барабані млина витрата пульпи пропорційна k_0 .

Розглянемо потік пульпи з циліндрового барабана радіусом $= 0,5D$ (діаметр D млина в світлі) через вертикальні розвантажувальні ґрати.

Елементарний елемент розвантажувальних ґрат dF можна представити як елементарний майданчик отвору з площею dF_0

$$dF_0 = k_0 dF. \quad (2)$$

При безперервній рівномірній подачі матеріалу і води в млин потік пульпи через кожен отвір у вертикальній стінці відбувається при постійному напорі потоку H_i . Напір потоку H_i розглядаємо як питому енергію потоку в перетині на рівні вільної поверхні, відносно щодо центру перетину отвору. Тому середню швидкість пульпи в перетинах отворів, розташованих на глибині H_i під вільною

поверхнею знаходимо з рівняння Д. Бернуллі:

$$u_i = \varphi_i \sqrt{2gH} , \quad (3)$$

де u_i – середня швидкість пульпи, м/с; g – прискорення вільного падіння, м/с²; φ – коефіцієнт швидкості, враховує вплив гідравлічних опорів на швидкість закінчення.

До отворів частинки пульпи рухаються з усіх боків по криволінійних траєкторіях. Унаслідок інертності частинок струмінь стискається при виході пульпи з отвору. На стиснення струменя впливає форма отвору і наявність грудкуватого матеріалу перед отвором. Внаслідок цього перетин струменя істотно перетворюється. Особливість витoku пульпи з млинів – стиснення струменя на деякій частині периметра отвору. Коефіцієнт стиснення струменя e визначається за формулою

$$e = f_c / f_0 , \quad (4)$$

де f_c – площа перетину струменя, м²; f_0 – площа отвору, м².

Витрати через отвір дорівнюють:

$$Q_i = E_i k_0 f_0 \varphi_0 \sqrt{2gH_i} . \quad (5)$$

Введемо коефіцієнт витрати отвору α_1 :

$$\alpha_1 = E_1 \varphi_i . \quad (6)$$

Кожен отвір має свої значення коефіцієнта стиснення, коефіцієнта швидкості і коефіцієнта витрати α_p .

Загальні витрати через розвантажувальні грати барабанного млина представимо у вигляді суми витрат через n отворів, прийнявши середнє значення коефіцієнта витрати рівним α_p :

$$Q = k_0 \sum_{i=1}^n \alpha_p f_0 \sqrt{2gH_i} = k_0 \alpha_p f_0 \sqrt{2g} \sum_{i=1}^n \sqrt{H_i} . \quad (7)$$

При динамічній рівновазі рівень вільної поверхні пульпи перед ґратами встановлюється залежно від притоку і витрати пульпи через ґрати.

Встановимо аналітичну залежність між витратами пульпи Q і рівнем вільної поверхні H перед ґратами:

Підготовчі процеси збагачення

$$Q = \int dQ = \int u dF, \quad (8)$$

де $dF = 2k_0 b dh$ – елементарна площа отворів на глибині h .

Швидкість потоку на цій глибині рівна u :

$$u = \varphi \sqrt{2gH}. \quad (9)$$

Підставляючи значення швидкості у рівняння (8) отримаємо:

$$Q = 2\varphi \sqrt{2gk_0} \int_0^k b \sqrt{hd} h. \quad (10)$$

Виразимо ширину площадки b через радіус барабана:

$$b = \sqrt{R^2 - (R \cos \alpha_0 + h)^2}. \quad (11)$$

Позначимо

$$c = R \cos \alpha_0. \quad (12)$$

Розкладемо $b = (R^2 - (c + h)^2)^{0.5}$ в ряд за формулою бінома Ньютона:

$$b = R \left[1 - \left[\frac{c+h}{R} \right]^2 \right]^{0.5} = R \left[1 - \frac{1}{2} \left[\frac{c+h}{R} \right]^2 - \frac{1}{8} \left[\frac{c+h}{R} \right]^4 + \dots \right]. \quad (13)$$

Після інтегрування отримаємо залежність: $Q = \int (H)$

$$Q = 4k_0 \varphi \sqrt{2g} R H^{3/2} \left(\frac{1}{3} - \frac{c^2}{2R^2} - \frac{c^4}{8R^4} \right) + \frac{1}{5} \left(\frac{c}{R^2} + \frac{c^3}{2R^4} \right) H - \frac{1}{7} \left(\frac{3c^2}{4R} + \frac{1}{2R^2} \right) H^2 + \frac{c}{18R^4} H^3 \quad \text{м}^3/\text{с}. \quad (14)$$

Як показує аналіз отриманої залежності, її можна замінити наближеним значенням. Площу змоченого сегменту F_c визначимо з геометричних міркувань з параметрів:

$$F_c = \frac{2}{3} LH, \text{ м}^2, \quad (15)$$

де

$$L = 2\sqrt{R^2 - (R - H)^2} = 2\sqrt{H(2R - H)}, \text{ м.} \quad (16)$$

$$F_c = \frac{2}{3} 2H\sqrt{H(2R - H)} = \frac{4}{3} H\sqrt{H(2R - H)} = \varphi_n \pi R^2, \text{ м}^2 \quad (17)$$

де φ_n – ступінь заповнення барабана пульпою (частки одиниці); L, H – відповідно основа і висота сегменту.

Витрату пульпи виразимо через середню теоретичну швидкість потоку U_c в центрі ваги сегменту, прийнявши напір витікання H_c рівним:

$$H_c = \frac{1}{3} H + H_j, \quad (18)$$

де H_j – напір, обумовлений відцентровою силою при обертанні барабана

$$H_j = (R - \frac{2}{3} H)^2 \varpi^2 / 2g, \text{ м;} \quad (19)$$

ϖ – кутова швидкість обертання барабана.

$$Q = \alpha_p k_0 F_c U_c; \quad (20)$$

$$U_c = \sqrt{2gH_c} = \sqrt{\frac{2}{3} gH + R^2 \varpi^2 - \frac{4}{3} RH\varpi^2 + \frac{4}{9} H^2 \varpi^2}. \quad (21)$$

Після спрощення визначимо наближене значення швидкості закінчення:

$$U_c = \sqrt{H \frac{2}{3} g + 2R\varpi^2 - \frac{4}{3} R\varpi^2 + \frac{2}{9} R\varpi^2} = \sqrt{H(\frac{2}{3} g + R\varpi^2)}, \text{ м/с}, \quad (22)$$

де g – прискорення сили тяжіння, м/с^2 .

Пропускна спроможність розвантажувальних решіток дорівнює:

Підготовчі процеси збагачення

$$Q = \alpha_p k_0 \frac{4}{3} H^2 (2R - H)^{0.5} \left(\frac{2}{3} g + R\omega^2 \right)^{0.5} \quad (23)$$

За експериментальними даними при ламінарному потоці пульпи через отвори розвантажувальних решіток коефіцієнт витрати α_p залежить від густини ρ пульпи і значення її коефіцієнта динамічної в'язкості μ :

$$\alpha_p = 0,131g \frac{4U\rho f}{\mu x} \quad (24)$$

де f – площа отвору, м²; x – змочений периметр отвору, м.

Із залежності (23) знайдемо наближене значення рівня пульпи перед розвантажувальними решітками:

$$H = 0,865Q^{0.5} / \alpha_p^{0.5} D^{0.25} \left(\frac{2}{3} g + 0,5D\omega^2 \right)^{0.25} \quad (25)$$

Оскільки коефіцієнт витрати α_p залежить від швидкості витікання пульпи рішення задачі можливе методом послідовних наближень.

Висновок

Одержані аналітичні залежності можуть бути використані як наукова основа для розробки нових конструкцій вузлів проточної частини барабанних млинів з урахуванням основних параметрів її роботи: витрати і швидкості потоку пульпи (формули 22 і 23) і рівня пульпи перед розвантажувальними ґратами (формула 25).

Окрім цього, ці викладки є теоретичною базою для розробки програми імітаційного моделювання кінетики руху пульпи в проточній частині барабанного млина та руху матеріалу через розвантажувальні ґрати.

Список літератури

1. Виноградов Б.В. Динаміка барабанних млинів / Б.В. Виноградов. – Д.: УДХТУ, 2004. – 127 с.
2. Виноградов Б.В. Динамічна модель приводу барабанного млина в сталому режимі роботи. // Науковий вісник НГУ, 2010, № 3. С. 72-76.
3. Сокур Л.М. Дробильно-сортировочное и транспортное оборудование: [монографія] / Л. М. Сокур, Е. К. Бабец, Н. И. Сокур, Ю. Н. Чебенко. – Кременчуг: Изд. ЧП Щербатых А.В., 2011. – 235 с.
4. Хміль І.В. Особливості технології подрібнення магнетитових кварцитів в умовах об'ємного нерівномірно-компонентного стиснення [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.08 / Хміль Ірина Віталіївна; Держ. ВНЗ "Криворізь. нац. ун-т". – Кривий Ріг, 2016. – 20 с.

5. Смирнов В. О., Білецький В. С., Шолда Р. О. Переробка корисних копалин (монографія). Донецьк: Східний видавничий дім. 2013. 600 с.
6. Науменко Ю.В. Моделювання трифазного режиму руху внутрішньо камерного завантаження барабанного млина. // Вісник НТУ "ХПІ". 2014. № 27. С. 45-52.
7. Андреев А. А. О модели процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице / А. А. Андреев, А. Г. Кулаков // Обогащение руд. 2009. – №4. – С. 3 – 7.
8. Grinding in Ball Mills: Modeling and Process Control. /Vladimir Monov, Blagoy Sokolov, Stefan Stoenchev. / The Journal of Institute of Information and Communication Technologies of Bulgarian Academy of Sciences. Volume 12, Issue 2 (Jun 2012). Published Online: <https://www.degruyter.com/view/j/cait.2012.12.issue-2/cait-2012-0012/cait-2012-0012.xml> 2013-03-16 | DOI: <https://doi.org/10.2478/cait-2012-0012>
9. Luís Marcelo Tavares. A Review of Advanced Ball Mill Modelling. // KONA Powder and Particle Journal. Vol. 34 (2017) p. 106-124. <http://doi.org/10.14356/kona.2017015>
10. Lijie Zhao ; Jian Tang ; Wen Yu ; Heng Yue ; Tianyou Chai. Modelling of mill load for wet ball mill via GA and SVM based on spectral feature. // Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA), 2010 IEEE Fifth International Conference on. 23-26 Sept. 2010. DOI: 10.1109/BICTA.2010.5645241 <http://ieeexplore.ieee.org/document/5645241/>
11. Gabriel K.P. Barrios, Rodrigo M. de Carvalho, Luís Marcelo Tavares. Modeling breakage of monodispersed particles in unconfined beds. Minerals Engineering. Volume 24, Issues 3–4, February–March 2011, Pages 308–318. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2010.09.018> <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687510002608>
12. Білецький В.С. Феноменологічний метод дослідження технологічних процесів у гірництві // Донецьк. Вісті Донецького гірничого інституту. №2, 2013. – С. 149-152.

© Сокур М.И., Белецкий В.С., Божик Д.П., Сокур И.М., Сокур Л.М., 2017

*Надійшла до редколегії 27.04.2017 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*