

УДК 622.27:621.926.9

**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**

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

### НАУКОВІ ОСНОВИ ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ МЛІНІВ

*Постановка проблеми і стан її вивчення.* Розробка теоретичних основ дроблення і подрібнення корисних копалин завжди розглядалася дослідниками-збагачувальниками як одна з найбільш актуальних задач, з огляду на багатофакторність і високу енергоємність процесу, багатоваріантність способів і технічних засобів дроблення і подрібнення, тісну ув'язку цього підготовчого процесу з наступними основними процесами збагачення, його по суті визначальне значення для результатів вилучення корисного компонента в концентрат. Науковим основам дроблення і подрібнення руд присвячено ряд праць вітчизняних [1-8] і закордонних [9-14] вчених.

*Мета статті* – одержання аналітичних виразів для визначення продуктивності млина по готовому класу  $-0,074$  мм та швидкості обертання барабана, яка відповідає максимальна продуктивність кульового млина по готовому класу. Крім того, задачею статті є визначення потужності, що витрачається млином на корисну роботу.

*Виклад основного матеріалу.* З погляду механіки подрібнювального середовища, барабанні млини, як кульові, так і самоподрібнення ("Аерофол". "Каскад", рудногалькові) принципової відмінності не мають. Тому висновки приведені нижче досліджень можуть бути повною мірою віднесені до всіх барабанних млинів [15]. Відомо, що продуктивність барабанного млина по готовому класу практично пропорційна споживаній корисній потужності. Корисна потужність при каскадному і водоспадному режимах середовища, що дробить, може бути визначена з виразів:

$$N_{H.K.} = 3,63D_B^{2,5}L(\gamma + \mu\delta)\sin^3\frac{\Omega}{2}\psi\sin\Omega, \quad (1)$$

$$N_{H.B.} = 2,72D_0^{2,5}L(\gamma + \mu\delta)\psi \times \left[ \frac{9}{4}\psi^2(1-k^4) - \frac{4}{3}\phi^6(1-k^6) \right], \text{ кВт}, \quad (2)$$

де:  $N_{H.K.}$ ,  $N_{H.B.}$  – власне корисна потужність при каскадному і водопадному ре-

жимах роботи, кВт;  $D_0$  – внутрішній діаметр барабана за вирахуванням товщини футерування, м;  $L$  – внутрішня довжина барабана м;  $\gamma$  – об'ємна маса подрібнюючих тіл, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta$  – об'ємна маса подрібнювального матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – коефіцієнт, що враховує об'єм матеріалу, віднесений до об'єму подрібнюючих тіл;  $\Omega$  – центральний кут, відповідний сектору поперечного перетину подрібнюючого середовища, град;  $\psi$  – відносна швидкість обертання барабана частки одиниці;  $\theta$  – кут повороту подрібнюючого середовища, град;  $k$  – параметр, залежний від відносної швидкості і коефіцієнта заповнення барабана.

Відзначимо, що приведені формули виведені в припущенні відсутності ковзання шарів тіл, що дроблять, знаходяться на кругових траєкторіях щодо один одного а також щодо футерування.

Аналіз формул (1) і (2) показує, що максимальна продуктивність кульового млина по готовому класу обмежується робочою швидкістю обертання барабана яка береться в межах:

$$n = (0,7 + 0,85) n_k,$$

де  $n_k$  – критична швидкість, при якій починається центрифугування кульового навантаження.

При  $n_k$  корисна потужність млина зменшується, а відповідно зменшується і продуктивність. Крім того, на продуктивність і ефективність подрібнення в значній мірі впливає насипна маса подрібнюючих тіл.

Продуктивність млина істотно зростає, хоча і не цілком пропорційно, із збільшенням тиску вищерозміщених подрібнюючих тіл, а також із збільшенням кількості падаючих тіл.

Легко відмітити, що при каскадному і водоспадному режимах роботи барабанних млинів близько половини подрібнюючих тіл недостатньо активно беруть участь в процесі подрібнення. Це викликано тим, що подрібнення матеріалу при каскадному режимі роботи здійснюється за рахунок стирання і роздавлювання, проте найбільше подрібнення матеріалу відбувається в основному в шарах дроблячих (подрібнюючи) тіл, що скочуються. Подрібнення матеріалу в шарах тіл піднімаються разом з барабаном, через слабке їх ковзання один щодо одного буде незначним. Крім того, в центрі конуса дроблячого завантаження є область, в якій тіла практично залишаються на місці, а тому в подрібненні майже не беруть участь. Збільшення швидкості обертання барабана приводить до інтенсивнішої циркуляції дроблячих (подрібнюючи) тіл, тобто до збільшення числа циклів і, природно, до пропорційного збільшення продуктивності млина. Проте принцип роботи подрібнюючих тіл при цьому залишається без змін.

Режим водоспаду застосовується у разі подрібнення крупнішого матеріалу. Подрібнення тут проводиться головним чином за рахунок ударів падаючих тіл. Основний недолік цього режиму: матеріал дуже слабо піддається подрібненню стиранням через мале ковзання один щодо одного шарів подрібнюючих тіл,

## **Підготовчі процеси збагачення**

"пов'язаних" з барабаном, тобто що знаходяться на кругових територіях.

Грінман і Блях відзначають, що основним механізмом подрібнення матеріалу вважається удар подрібнюючих тіл [15]. Стиранню і роздавлюванню відводиться неістотна роль в подрібненні, особливо при режимі водоспаду. Проте відомо, що і при каскадному режимі відбувається процес подрібнення.

Потужність, що витрачається млином на корисну роботу можна представити у вигляді двох незалежних складових:

$$N_{\Pi} = N_{\gamma} + N_{C}, \quad (3)$$

де  $N_{\Pi}$  – корисна потужність, споживана млином;  $N_{\gamma}$  – потужність, що витрачається на ударне подрібнення;  $N_{C}$ , – потужність, що витрачається на подрібнення стиранням.

Продуктивність млина по готовому класу – 0,074 мм

$$Q_{\gamma 4} = (\eta_{\gamma} N_{\gamma} + \eta_{C} N_{C}) G_{P.M.}, \quad (4)$$

де  $\eta_{C}$  і  $\eta_{\gamma}$  – коефіцієнти, які можна вважати постійними для конкретного млина і певного сорту руди;  $G_{P.M.}$  – кількість руди, що знаходиться усередині млина;  $N_{\gamma}$  і  $N_{C}$  можна представити частками від всієї корисної потужності:

$$N_{\gamma} = \alpha N_{\Pi}, \quad N_{C} = (1 - \alpha) N_{\Pi},$$

де:  $\alpha$  – коефіцієнт, що показує частку ударного механізму. Коефіцієнт  $\alpha$  залежить від швидкості обертання барабана млина, заповнення барабана і профілю футерувальних плит.

Використовуючи отримані рівняння, напишемо остаточно:

$$Q_{\gamma 4} = [\alpha \eta_{\gamma} + (1 - \alpha) \eta_{C}] N_{\Pi} G_{P.M.} \quad (5)$$

У області, близькій до робочого режиму, при збільшенні числа обертів млина потужність процесу водоспаду зменшується, тоді як робота внутрішнього тертя зростає. Отже, сумарна продуктивність по готовому класу досягає максимуму при більшій швидкості обертання барабана ніж потужність процесу водопаду.

Збільшення частки подрібнення за рахунок внутрішнього тертя дроблячого (подрібнюючого) середовища можна досягти за рахунок вибору гранулометричного складу самого середовища, а також шляхом вибору профілю футерування. Вибраний профіль повинен відповідати ковзанню дроблячого (подрібнюючого) середовища по поверхні футерування, оскільки це значно скорочує термін її служби, а також певною мірою знижує продуктивність подрібнювальної установки в цілому.

На продуктивність і ефективність подрібнення барабанного млина суттєво впливає рівень розвантаження млина. Високий рівень розвантаження демпфує удари падаючих подрібнюючих тіл, при швидкостях обертання барабана відповідних режиму водоспаду. При швидкостях каскадного режиму наявність високого рівня знижує зусилля тертя між подрібнюючими тілами, особливо при їх малій вазі.

### *Висновки*

1. Одержано аналітичні вирази для визначення:
  - продуктивності млина по готовому класу -0,074 мм;
  - швидкості обертання барабана, яка відповідає максимальній продуктивності кульового млина по готовому класу;
  - потужності, що витрачається млином на корисну роботу.
2. Показано, що для збільшення продуктивності барабанних млинів необхідно прагнути працювати із зниженим рівнем розвантаження.
3. На підставі викладеного матеріалу розроблені шляхи підвищення продуктивності і ефективності подрібнення в барабанних млинів.

### **Список літератури**

1. N. Sokur, V. Biletskyy, L. Sokur, D. Bozyk, I. Sokur. Investigation of the process of crushing solid materials in the centrifugal disintegrators // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – 3/7(81). – P. 34-40.
2. Сокур М.І. Дезінтеграція мінеральних ресурсів: монографія / Сокур М.І., Кіяновський М.В., Воробйов О.М., Сокур Л.М., Сокур І.М. – Кременчук: Вид-во ПП Щербатих О. В., 2014 – 304 с.
3. Горобець Л.Ж. Розвиток наукових основ подрібнення твердих корисних копалин: дис ... д-ра техн. наук: 05.15.08 / Національний гірничий ун-т. – Д., 2004.
4. Підготовка корисних копалин до збагачення: монографія / М.І. Сокур, В.С. Білецький, О.І. Єгурнов та ін. – Кременчук: Кременчуцький національний ун-т ім. М.Остроградського, Академія гірничих наук України. ПП Щербатих О.В., 2017. – 392 с.
5. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1985. – 282 с.
6. Сокур Н.И. Соколовский А.К. Закономерности движения материала в разгрузочной части барабанной мельницы с принудительной разгрузкой // Горный журн. – 1981. – №6. – С. 51-53.
7. Сокур Н.И. К вопросу разрушения минерального сырья в поле центробежных сил // Новые технологии дня переработки руд: Отрасл. темат. сб. /Минпрем Украины. Кривой Рог, 1993.
8. Jankovic, A. Relationships between comminution energy and product size for a magnetite ore [Електронний ресурс] / A. Jankovic, H. Dundar, R. Mehta // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – March 2010. – Vol. 110. – Pp. 141–146. – Режим доступу : URL: <http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v110n3/07.pdf>.
9. Refahi, A. Comparison between bond crushing energy and fracture energy of rocks in a jaw crusher using numerical simulation [Електронний ресурс] / A. Refahi, J. Aghazadeh Mohandesi, B. Rezai // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – Dec. 2009. – Vol. 109. – Pp. 709-717. – Режим доступу : URL:

## **Підготовчі процеси збагачення**

---

<http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v109n12/03.pdf>.

10. Whittles, D. Laboratory and numerical investigation into the characteristics of rock fragmentation [Text] / D. Whittles, S. Kingman, I. Lowndes, K. Jackson // Minerals Engineering. – 2006. – Vol. 19. – Pp. 1418-1429.

11. Sibson, R.H. (1986). "Earthquakes and rock deformation in crustal fault zones" . Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 14: 156. Retrieved 2 July 2011.

12. Thomas, A; Filippov, L.O. (1999). "Fractures, fractals and breakage energy of mineral particles". International Journal of Mineral Processing. 57 (4): 285. doi:10.1016/S0301-7516(99)00029-0

13. Strohmayer, S. and Valery, W. Jr. SAG mill circuit optimisation at Ernest Henry Mining. 2001. URL: [http://www.metso.com/miningandconstruction/mct\\_service.nsf/WebWID/WTB-120106-22576-29D77/\\$File/057.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/mct_service.nsf/WebWID/WTB-120106-22576-29D77/$File/057.pdf)

14. Яшин В.П., Бортников В.П. Теория и практика самоизмельчения руд. – М.: Недра, 1978. – 227 с.

© Сокур М.І., Білецький В.С., Божик Д.П., 2017

*Надійшла до редколегії 12.09.2017 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*